

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА
ПОЛІТЕХНІКА»**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту з дисципліни
„ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ВИСОКОЇ НАПРУГИ”
для студентів всіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

2020

Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни "Електричні апарати високої напруги" для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Укл. О. І. Афанасьєв, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 28с.

Укладачі: О.І. Афанасьєв, доцент, к.т.н.
В.В. Василевський, ст. викладач, к.т.н.

Рецензент: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: В. В. Василевський, ст. викладач, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Електричні і електронні апарати”.
Протокол № 2
від 07 вересня 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ЕТФ.
Протокол №2
від 22 жовтня 2020 р.

ЗМІСТ

1 Технічне завдання та зміст курсового проекту	4
2 Апарати комутації та захисту розподільчих пристроїв	8
2.1 Комплектний розподільчий пристрій (КРП)	9
2.2 Комплектний розподільчий пристрій з елегазовою ізоляцією (КРПЕ)	10
2.3 Роз'єднувач	11
2.4 Відокремлювач та заземлювач	12
2.5 Короткозамикач	13
2.6 Високовольтний ввід та прохідний ізолятор	14
2.7 Комплектний екранований струмопровід	15
3 Пристрій перемикання одпайок обмоток силових трансформаторів під навантаженням (РПН)	17
4 Струмообмежуючий реактор	19
5 Трансформатор струму	21
6 Трансформатор напруги	25
Перелік посилань	27

1 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ ТА ЗМІСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект за курсом "Електричні апарати високої напруги" виконується студентами спеціальності ЕА всіх форм навчання за індивідуальним завданням, яке видає керівник проекту.

Мета курсового проекту - навчитися на практиці використовувати інженерні методи розрахунку електричних апаратів у сполученні з конструкторською розробкою та рішенням питань з технології виготовлення як окремих вузлів, так і апарату в цілому. Робота над курсовим проектом сприяє більш поглибленому вивченню студентами курсів "Апарати високої напруги", „Основи інженерного проектування”, „САПР”, "Теорія надійності та ефективності", рішенням питань дипломного проектування.

Кількість пояснювальної записки 30 – 40 сторінок рукописного тексту з необхідними ескізами, малюнками, таблицями. Кількість графічної частини проекту - 2 листи форматом А1: перший лист - загальний вид апарату з необхідними видами та розрізами; другий - деталівка. Оформлення графічної частини та пояснювальної записки повинно задовольняти вимогам ДСТУ 3008:2015.

При виконанні розрахунків з використанням ПК пояснювальна записка повинна містити у собі роздруковку початкових даних та результатів розрахунку.

При розробці методичних вказівок за розділами: струмообмежуючий реактор, трансформатори струму та напруги були використані матеріали [1].

Зміст пояснювальної записки курсового або дипломного проекту, повинен містити у собі такі етапи:

- технічне завдання до розробки;
- вступ;
- техніко-економічне обґрунтування конструкції яка розробляється;
- загальна компоновка;
- розрахунок електричної ізоляції;
- електричний та електромагнітний розрахунки окремих елементів, пристрою в цілому;

- тепловий розрахунок апарату, або окремих елементів;
- механічні розрахунки окремих елементів;
- опис конструкції розробленого пристрою;
- висновки;
- перелік посилань.

Початкові дані параметрів для відповідного апарату обираються з таблиць. Додаткові відомості, необхідні при проектуванні, обираються студентом самостійно, за вимогами ДСТ з узгодженням у керівника проекту.

У вступі необхідно відобразити роль апарату, а також призначена їй ролі, апаратури н залежності під умов експлуатації (географічні, кліматичні, навколишнє середовище).

При виконанні техніко-економічного обґрунтування конструкції, яка розробляється, необхідно розглянути аналоги як вітчизняного, так і закордонного виробництва з параметрами, близькими до тих, які викладені у технічному завданні. Це повинно забезпечити технічний рівень апарату, який розробляється, не нижче світових зразків. Порівняння показників аналогів та конструкції, яка розробляється, корисно проводити в табличному вигляді, використовуючи не тільки абсолютні, але і питомі за відношенням до основного параметру (номінальному струму, напруги, потужності) показники. За даними створеної таблиці необхідно сформулювати основні переваги та недоліки конструкції, яка розробляється, та за допомогою найпростіших економічних розрахунків обґрунтувати ефективність нової розробки (зменшення маси, габаритів, вартості, підвищення надійності). Рекомендована література [2,3].

При вирішенні питань, які зв'язані з компоновкою та обранням принципової електричної схеми необхідно керуватися особливостями функціонування окремих вузлів та апарату в цілому з урахуванням вимог технічного завдання. Окрім цього необхідно урахувати, що вирішальний вплив на обрання загальних конструктивних форм та розмірів апарату в умовах високої напруги мають вид електричної ізоляції та величина ізоляційних відстаней. Тому, розрахунки електричної ізоляції та елементів струмоведучого контуру доповнюють один одного та проводяться в тісному взаємозв'язку.

Рівень загальної ізоляції апарату забезпечується між елементами конструкції, які мають різні потенціали, шляхом вибору відстані:

- по поверхні ізоляційних деталей, які визначають довжину шляху витоку струму;

- крізь товщину твердих, рідинних та газоподібних діелектриків (ізолятори, бар'єри, покриття, трансформаторне масло, повітря).

Ізоляційна конструкція розраховується за заданою номінальною напругою з урахуванням діючих експлуатаційних чинників (перенапруга, навколишнє середовище, електродинамічні та механічні навантаження та ін.).

Приклад розрахунку і обрання ізоляційних конструкцій на різні класи напруги приведений у [5,6]. Рекомендована література [5-10].

Розрахунок і проектування елементів струмоведучого контуру доцільно проводити в два етапи. На першому етапі виконується попереднє обрання розмірів перерізів шин, кабелів, контактних з'єднань, контактів, які не розмикаються, кількість та розміри ламелей та інших елементів. Оцінюються чисельні значення контактних натисків та перехідних опорів.

Початковими даними є:

- припустима температура нагріву і матеріали розрахункових ділянок контуру;
- параметри навколишнього середовища;
- режим роботи апарату.

Наведеному етапі розрахунок засновується на вживанні спрощених уявлень про тепловий стан контуру, наприклад, закон Ньютона, що відповідає рівню попереднього теплового розрахунку. На другому етапі виконується повірительний тепловий розрахунок струмоведучого контуру. Тут здійснюється оцінка температури нагріву елементів, які проектуються, у сталому режимі з урахуванням їх геометрії, теплофізичних параметрів матеріалів струмоведучого контуру та ізоляційної конструкції, а також навколишнього середовища. Розрахункові розміри температур зрівнюються з припустимими. При отриманні незадовільних результатів здійснюється коригування попередньо обраних параметрів перерізів, або інших параметрів, далі розрахунок повторюється.

Рекомендована література: [2,3,11 - 13].

Оцінка термічної стійкості містить в собі визначення температури нагріву елементів струмоведучого контуру під дією струмів короткого замикання.

Розрахунок на електродинамічну стійкість містить в собі визначення електродинамічних зусиль між окремими елементами контуру, між контуром та феромагнітними частинами. Розраховуються електродинамічні сили відкидання контактів та сили взаємодії ламелей. Визначаються струм зварювання контактів та уточнюються обрані раніше значення контактних натисків.

Перевіряється механічна міцність ізоляційної конструкції (опорні ізолятори, елементи конструкції, натяг проводів та ін.).

Рекомендована література: [2,3,12- 14].

Механічні розрахунки виконуються для окремих елементів пристрою за узгодженням з керівником проекту. Як правило, ними є найбільш відповідальні і навантажені деталі:

- ізоляційні вали та тяги;
- пружини;
- елементи приводного механізму;
- осі, шарніри передавальних механізмів;
- оболонки, баки, запобіжні клапани та ін.

Об'єм механічних розрахунків повинен бути достатнім для обґрунтування механічної міцності пристрою (блоку, вузлу, деталі) та його надійної експлуатації.

Опис конструкції розробленого апарату повинен охоплювати як електричну, так і кінематичну схему пристрою, особливості їх конструкції та функціонування. Для апаратів, які мають складну структуру, необхідно описати конструкції головних функціональних вузлів, їх взаємодію в процесі експлуатації.

У висновках належить відобразити призначення розробленого апарату, його головні переваги і недоліки, пропозиції автора щодо вдосконалення розробленої конструкції.

2 АПАРАТИ КОМУТАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ

Виконання курсового проекту починається з викладу призначення апарату, розробки принципової електричної схеми і принципу його дії, особливостей функціонування окремих елементів, їх головних параметрів і характеристик, галузі використання відповідно до рекомендованого змісту пояснювальної записки.

Проектування містить такі етапи:

а) компоновка виробу і функціональне призначення окремих вузлів;

б) розрахунок і обрання елементів струмоведучого контуру:

1) вибір матеріалів, форми та перерізів шин по довго припустимому струму (попередній та повіряльний розрахунок); перевірка шин щодо термічної та динамічної стійкості;

2) розрахунок температури нагріву шин номінальним струмом; розрахунок розеткових контактів;

3) розрахунок розбірних з'єднань, які не розмикаються (попередній і порівняльний);

в) розрахунок електричної ізоляції;

г) вибір апаратури головних кіл;

д) опис конструкції;

є) оцінка надійності конструкції.

Для різних видів апаратів такими загальними параметрами є:

- рід встановлення (внутрішнє і зовнішнє);
- номінальний струм;
- номінальна напруга;
- струми термічної та динамічної стійкості.

Окрім перерахованих, окремі апарати характеризуються специфічними параметрами:

-вимикачі: конструктивне виконання, номінальний струм (потужність) вимикання в режимі короткого замикання, вид приводу;

-трансформатори струму: конструктивне виконання, номінальний вторинний струм, призначення (для вимірювання або живлення релейного захисту), клас точності та вторинне навантаження;

- трансформатори напруги: конструктивне виконання, клас точності, вторинне навантаження, вид приводу(джерело постачання);
- розрядники: конструктивне виконання, волі, і секундна характеристика (значення розрядної напруги);
- запобіжники: конструктивне виконання, найбільший струм, який вимикається (потужність), швидкодія.

Форма шин має великий вплив на умови роботи ізоляційної конструкції. Для зменшення неоднорідності електричного поля доцільно обирати плоскі шини із скругленими кутами (в колах з номінальною напругою 6 - 10 кВ) або круглі пустотілі шини (в колах 35 кВ та вище).

2.1 Комплектний розподільчий пристрій (КРП)

В процесі розробки КРП комплектується великою кількістю апаратів, які значно відрізняються за своїм функційним призначенням. Обираючи їх, необхідно узгоджувати основні параметри з вимогами технічного завдання на проектування КРП (рід встановлення, номінальні параметри, умови праці в режимі короткого замикання, можливі рівні перенапруги та ін.).

Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.1.

Рекомендована література [2 - 6, 11 - 17, 28, 29].

Таблиця 2.1 - Початкові дані для курсового проекту на тему
“Комплектний розподільчий пристрій”

Варіант	Номінальна напруга U_H , кВ	Тип вимикача	Номінальний струм I_H , А	Номінальний струм вимикання I_H , кА	Струм термічної стійкості I_T , кА	Час протікання s	Струм динамічної стійкості I_d , кА
1	10	ВВ	400	31,5	20	4	51
2	10	ВВ	630	20	31,5	3	83
3	10	ВВ	1250	31,5	22	2	72
4	10	ВВ	2000	22	24	1	54
5	10	ВВ	3150	24	21	2	76
6	10	ВМП	1000	26	23	3	58
7	10	ВМП	800	28	26	4	60
8	10	ВВ	1600	30	28	3	62
9	10	ВК	1800	27	25	2	64
10	10	ВК	2400	23	27	1	76
11	10	ВЕ	1450	31,5	21	3	55
12	10	ВЕ	2500	20	30	2	57
13	10	ВЕ	3600	29	22	4	59
14	10	ВК	1500	27	29	3	68
15	10	ВК	3000	28	23	2	52
16	35	ВВ	2000	31,5	20	2	80

2.2 Комплектний розподільчий пристрій з елегазовою ізоляцією(КРПЕ)

КРПЕ - це сукупність комутаційних, вимірювальних та інших апаратів і пристроїв, які розташовані в герметичній металевій оболонці, заповненій елегазом. Для суміщення кожного з них оболонки мають фланці, роз'ємні контакти та ущільнення. Умови експлуатації КРПЕ, особливості конструкції та основні технічні характеристики приведені в [6, 14, 15,17].

Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.2.

Рекомендована література [2,3,5,6,14 - 18].

Таблиця 2.2 - Початкові дані для курсового проекту на тему
"Комплектний розподільчий пристрій з елегазовою ізоляцією"

Варіант	Номінальна напруга U_n , кВ	Номінальний струм I_n , А	Ударний струм $I_{уд}$, кА	Струм термічної стійкості I_T , кА	Тип комірки	Збірні шини	
						Кількість систем	Кількість полюсів
1	220	1250	60	25	Виходяча лінія	2	1
2	330	---	130	63	3 трансформатором напруги	1	1
3	220	2500	110	50	Шиноз'єднувальна	2	1
4	110	2000	95	40	Секційний вимикач	2	3
5	110	1600	80	31	Повітряний ввід	1	3

На початку розрахунку складається принципова електрична схема проєктуемого КРПЕ на основі якої обираються стандартні модулі і з'єднуються між собою згідно вимогам проєктування КРПЕ.

2.3 Роз'єднувач

При проєктуванні роз'єднувача необхідно враховувати наступні його особистості.

У вимкнутому положенні він повинен мати видимий повітряний проміжок, який гарантує безпеку праці на вимкненій частині кола.

Може мати прилаштовані заземлюючі ножі для заземлення вимкнутих частин кола.

Повинен мати блоківку головних та заземлюючих ножів для виключення помилкових комутаційних операцій.

Початкові дані та варіанти завдань на самостійну роботу приведені в таблиці 2.3.

Рекомендована література [2,3,6,7,11 - 15,17,29].

Таблиця 2.3 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Роз'єднувач"

Варіант	Номинальна напруга U_n , кВ	Номинальний струм I_n , А	Ударний струм $I_{уд}$, кА	Струм термічної стійкості I_T , кА	Ножі заземлення	Кількість полюсів, вид ізоляторів	Хід контактів	Висота встановлення Н, м
1	10	400	41	16	--	1 прохідн	Верт	2500
2	10	1000	100	40	1	3 опорн	Верт	3000
3	10	630	35,5	12,5	--	3 опорн	Гор	1500
4	35	2000	80	31,5	1	3 опорн	Гор	1000
5	110	2500	125	50	1	3 опорн	Гор	1800
6	220	1500	110	45	1	3 опорн	Гор	400
7	330	3000	140	60	2	1 опорн	Гор	2200
8	500	3500	160	80	1	1 опорн	Підвісний	2800
9	1150	4000	100	40	1	1 опорн та підвісн	Підвісний	800
10	500	3200	160	63	--	3 опорн та підвісн	Підвісний	1600

2.4 Відокремлювач та заземлювач

На відокремлювачі розповсюджуються всі особливості, які належать роз'єднувачам. Крім того, особливістю відокремлювача слід рахувати його підвищену швидкодію, яка складає (0,3 - 0,5) с., відповідно, вимоги до механічної міцності елементів конструкції.

Заземлювачі у вигляді окремого апарату використовуються для заземлення вимкнутих ділянок екранованих струмопроводів, для заземлення централей силових трансформаторів, для заземлення нерухомих контактів підвісних роз'єднувачів та ін. Особливостями заземлювачів є підвищена електродинамічна та термічна стійкість, низька швидкодія, максимальна уніфікація елементів конструкції.

Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.4

Рекомендована література [3,5,6,11 - 14,17,29]

Таблиця 2.4 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Відокремлювач та заземлювач"

Варіант	Номинальна напруга U_n , кВ	Номинальний струм I_n , А	Ударний струм $I_{уд}$, кА	Струм термічної стійкості I_T , кА	Кількість ножів заземлення	Кількість полюсів	Висота встановлення Н, м
1	35	630	80	12,5	3	3	2500
2	110	1000	81	31,5	1	1	2800
3	220	1000	100	31,5	1	1	3100
4	150	1250	90	25	1	1	800
5	24	--	235	90/1	---	3	3200
6	110	--	16	63/3	---	1	2300
7	330	---	160	63/1	---	1	300
8	500	--	120	40/1	--	1	2100

2.5 Короткозамикач

При проектуванні короткозамикача необхідно враховувати наступні його особливості:

- підвищена в зрівнянні з відокремлювачем швидкодія (0,15 - 0,25с);
- підвищена термічна та електродинамічна стійкість до струмів короткого замикання.

Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.5.

Рекомендована література [3,6,7,11,13,14,17,29].

Таблиця 2.5 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Короткозамикач"

Варіант	Висота встановлення Н, м	Ударний струм $I_{уд}$, кА	Струм термічної стійкості I_T , кА	Час протікання струму к.з. с	Ножі заземлення	Кількість полюсів	Кліматичне виконання
1	1800	42	12,5	4	1	2	Т
2	2200	32	15	3	1	1	У
3	2700	51	22	4	1	1	ХЛ
4	3100	51	18	3	---	1	УХЛ

2.6 Високовольтний ввід та прохідний ізолятор

При проектуванні високовольтного вводу необхідно враховувати наступні його особливості:

- вид встановлення (внутрішні або зовнішні) та особливості середовища;

- оптимальне сполучення ізоляційних матеріалів в залежності від номінальної напруги;

- у якості зовнішньої ізоляції рекомендується встановлювати фарфорові покришки, як найбільш зручні в умовах експлуатації;

- конструкції на номінальну напругу 10 кВ мають один фарфоровий елемент, а на клас 36кВ й вище - один або два елемента;

- максимальна напруженість поля має місце біля середнього заземленого фланцю;

- підвищення електричної міцності ізоляції досягається підвищенням зовнішнього діаметру вводу або використанням конденсаторних обкладок з фольги;

- густина струму обирається у межах від 0,5 до 2 А/мм². В ізоляторах з масляною та твердою ізоляцією густина струму обирається менш для зменшення тепловиділення. В ізоляторах з маслобар'єрною ізоляцією - обирається близькою до 2 А/мм².

Початкові лані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.6.

Рекомендована література [2,3,5,6,11,29].

Таблиця 2.6 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Високовольтний ввід та прохідний ізолятор"

Варіант	Номінальна напруга U_n , кВ	Номінальний струм I_n , А	Ізоляція	Середовище	Вид герметизації	Вид апарату	Навантаження P , кН	Висота встановлення H , м
1	10	1250	Зовнішня	Повітря	--	ВВ	4	2400
2	66	400	Зовнішня-внутрішня	Повітря-масло	герметична	ВВ	5	600

Продовження таблиці 2.6

3	20	1800	Внутрішня	Повітря-вакуум	Герметична	ВВ	7	2100
4	35	2500	Зовнішня - внутрішня	Повітря-масло	Негерметична	ВВ	6	800
5	110	1600	Зовнішня - внутрішня	Повітря-масло	Герметична	ВВ	4	1700
6	220	2800	Зовнішня - внутрішня	Повітря-елегаз	Герметична	ВВ	2	1000
7	330	1000	Зовнішня - внутрішня	Повітря-масло	Негерметична	ВВ	1	1500
8	150	630	Зовнішня - внутрішня	Повітря-масло	Герметична	ВВ	3	1200
9	20	2000	Зовнішня	Повітря	Негерметична	ПІ	9	2700
10	35	800	Зовнішня з підвищеним забрудненням	Повітря	Негерметична	ПІ	7	3000
11	10	3150	Внутрішня - внутрішня	Повітря	Негерметична	ПІ	8	3400

2.7 Комплектний екрановий струмопровід

При проектуванні екранованих струмопроводів необхідно враховувати наступні їх особливості.

Нагрів елементів струмоведучого контуру повинен задовольняти ГОСТ 8024-90. В загальному випадку температура нагріву основних складових частин не повинна перевищувати: іііін-120° С; екранів-110° С, місць з вбудованою апаратурою та доступних доторканню-80° С.

Всередині екрану (оболонки) магнітна індукція знижується, що зменшує електродинамічні зусилля у декілька разів.

Елементи кріплення оболонки повинні бути ізольовані від металоконструкцій.

Економічна густина струму у шинах з алюміній обирається у межах 0,5 - 0,75 А/мм² [3].

Перевищення температури повітря всередині оболонки не повинно бути більш, ніж 15...30⁰ С.

Підключення шин до апаратних виводів здійснюється гнучкими або штепсельними роз'ємами.

Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 2.7.

Рекомендована література [2,3 - 6,11 - 13,29 - 32].

Таблиця 2.7 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Комплектний екранований струмопровід"

Варіант	Номинальна напруга, Ун, кВ	Номинальний струм, Ін, кА	Ударний струм, Іуд, кА	Струм термічної стійкості, Іт, кА	Висота встановлення, Н, м	Вбудоване обладнання	Тип струмопроводу
1	6	1600	81	20	3200	Прохідний ізолятор, трикутник	Екранований
2	10	2000	100	31,5	2400	Лінійний	Екранований
3	15	3200	128	50	1600	Прохідний ізолятор, лінійний	Екранований
4	10	4000	250	90	1800	Гнучкий ввід	Пофазно-екранований
5	15	5000	270	110	2000	Трансформатор струму	Пофазно-екранований
6	20	16200	560	220	2200	Розрядник	Пофазно-екранований
7	35	10000	300	120	1400	Трансформатор напруги	Пофазно-екранований

3 ПРИСТРІЙ ПЕРЕМИКАННЯ ОДПАЙОК ОБМОТОК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ (РПН)

Виконання курсового проекту починається з викладу призначення РПН, розробки принципової функціональної та електричної схеми пристрою та принципу його дії, особливості функціонування окремих елементів пристрою, їх основних параметрів і характеристик.

Проектування РПН містить такі основні етапи:

- а) компоновка виробу та функціональне призначення окремих вузлів;
- б) обрання та розрахунок електричної ізоляції;
- в) проектування та розрахунок розмірів елементів струмоведучого контуру;
- г) розрахунок температури нагріву елементів струмоведучого контуру у сталому режимі;
- д) оцінка термічної та електродинамічної стійкості конструкції РПН;
- є) оцінка дугостійкості комутуючих контактів;
- ж) обрання та розрахунок елементів тиристорного блоку (для гібридних схем РПН);
- з) механічні розрахунки (елементи механізмів швидкодії, перемикання та ін.);
- і) оцінка надійності конструкції.

В конструкції РПН вживається комбінована ізоляція - тверда паперово-бакелітова ізоляція, яка знаходиться в середовищі трансформаторного масла. В цьому випадку необхідно здійснити обрання ізоляційних відстаней:

- крізь товщу твердої ізоляції;
- по поверхні твердої ізоляції в повітрі та в маслі;
- крізь товщу трансформаторного масла.

Обираючи ізоляційні відстані треба враховувати, що внаслідок високої частоти комутаційних циклів масло забруднюється (продукти руйнування масла, частки металу та електродів) та знижує свої ізоляційні якості.

Розрахунок струмообмежуючого резистору містить обрання матеріалу, розрахунок довжини та перерізу, температури нагріву в короткочасному та повторно-короткочасному режимах праці.

Електрична зносостійкість контактів дугогасіння визначається з врахуванням розрахунку масового (об'ємного) та лінійного зносу, а також змінювання провалу контактів у процесі праці. За результатами розрахунку оцінюється кількість перемикань під навантаженням до виходу контактів з ладу.

Механічному розрахунку підлягають такі елементи конструкції РПН:

- а) ізоляційні вали та стойки;
- б) мальтійські шестерні та елементи передавального механізму (муфти та ін.);
- в) пружини;
- г) бак РПН;

Обирається потужність приводного електродвигуна.

На підставі оцінки крутячих моментів та моментів опору при замиканні рухомих контактів з нерухомими визначаються напруги у деталях приводу та ізоляційної конструкції і уточнюються їх розміри.

Окрім перелічених, розрахунки щодо механічної міцності повинні виконуватись для усіх знов розроблених елементів, зазнаючих механічні впливи.

При розробці схем РПН спеціальної конструкції з тиристорним блоком (гібридні РПН) для бездугової комутації електричних кіл окрім перелічених ще необхідно розробити такі питання:

- обрання принципової схеми силового блоку та системи керування тиристорами;

- схему гуртового з'єднання та тип тиристорів, які вживаються з врахуванням номінального та аварійних режимів праці [18];

- конструктивне виконання тиристорного блоку [17].

Рекомендована література [3,6,11,13,16,17,18,19,29].

Початкові дані для обрання завдання до курсового проекту приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Пристрій РПН"

Варіант	Номинальна напруга U_n , кВ	Напруга регулювання, В	Номинальний струм, I_n , А	Діапазон регулювання, %	Кількість фаз	Тип контактору
1	10	200	400	8	3	Контактний
2	35	1000	1000	10	1	Гібридний
3	35	600	104	9	3	Контактний
4	35	500	125	5	3	Контактний
5	110	1400	1600	6	1	Гібридний
6	35	400	630	9	3	Гібридний
7	220	1200	2000	7	1	Контактний

4 СТРУМООБМЕЖУЮЧИЙ РЕАКТОР

Проектування струмообмежуючого реактору містить в собі такі основні етапи:

а) вибір перерізу кабелю струмоведучого контуру реактора (обмотки);

б) розрахунок індуктивності та розмірів реактора;

в) розрахунок втрат і температури нагріву обмотки реактора в номінальному та аварійному режимах, оцінка термічної стійкості реактора;

г) оцінка внутрішньої та зовнішньої електродинамічної стійкості;

д) розрахунок і вибір опорних ізоляторів;

є) розрахунок і проектування виводів;

ж) оцінка надійності;

з) конструктивна розробка реактора.

Приклад розрахунку наведений у [14].

В результаті розрахунку реактора визначаються основні конструктивні параметри реактора, його вузлів та деталей.

Нагрів реактора в номінальному режимі розраховується з врахуванням всіх можливих втрат активної потужності для найбільш навантаженої у тепловому відношенні частини реактора в залежності від способу встановлення в розподільчому пристрої.

Оцінюючи електродинамічну стійкість необхідно визначити:

-зусилля, які діють на витки в характерних точках, а також механічні напруги до розриву, які виникають в матеріалі кабелю;

-динамічну стійкість колонок реактора з оцінкою зусиль, діючих на колонки та механічних напруг, які в них виникають;

-зусилля в опорних ізоляторах для струмів короткого замикання з врахуванням завданого способу встановлення трифазного комплекту реакторів.

Опорні ізолятори обираються за заданою номінальною напругою з врахуванням динамічної стійкості бетонних колонок та способом монтажу трифазного комплекту реакторів [8]. Початкові дані та варіанти завдань на курсовий проект приведені в таблиці 4.1

Рекомендована література [8,14,17,20,29].

Таблиця 4.1 - Початкові дані для курсового проекту на тему "Струмообмежуючий реактор"

Варіант	Номінальна напруга U_n , кВ	Номінальний струм I_n , А	Індуктивний опір X_p , Ом	Час струму К.З.	Засіб встановлення	Конструкція
1	3	2200	0,56	5	Вертикальний	Бетонний
2	6	800	0,24	3	Уступ	Збірний
3	10	500	0,11	4	Вертикальний	Бетонний
4	10	2*1000	0,28	6	Горизонтальний	Збірний подвійний
5	15	2700	0,48	3	Вертикальний	Бетонний
6	15	2*1500	0,41	5	Уступ	Збірний подвійний
7	20	2*1800	0,46	2	Уступ	Збірний подвійний
8	20	3500	0,52	3	Вертикальний	Бетонний
9	27	2*400	0,21	4	Горизонтальний	Бетонний подвійний
10	27	3000	0,48	5	Уступ	Збірний
11	24	1250	0,22	4	Вертикальний	Бетонний
12	24	2*2500	0,37	2	Горизонтальний	Збірний подвійний
13	35	2*2000	0,32	4	Горизонтальний	Бетонний подвійний
14	35	4000	0,56	3	Уступ	Збірний
15	6	2*1800	0,3	7	Вертикальний	Бетонний подвійний

5 ТРАНСФОРМАТОР СТРУМУ

Виконання курсового проекту починається з викладу призначення трансформатора струму, схеми вмикання в мережу розподільного пристрою, основних функціональних характеристик та конструктивного виконання. Проектування трансформатора струму містить такі етапи:

- а) розрахунок параметрів первинної обмотки;
- б) розрахунок перерізу та геометричних розмірів магнітопроводу;
- в) розрахунок параметрів вторинної обмотки;
- г) розрахунок похибок трансформатора струму;
- д) розрахунок граничної кратності первинного струму;
- є) розрахунок ЕРС на вторинній обмотці;
- ж) розрахунок температури нагріву трансформатора струму у номінальному режимі;
- з) розрахунок термічної стійкості;
- і) розрахунок електродинамічної стійкості;
- к) конструктивна розробка.

Приклад розрахунку трансформатора струму з литою ізоляцією приведений у [6,14,22].

Переріз струмопроводу. Розрахунок виконується за припустимою густиною струму; яка складає $(1,5 \dots 1,8) \text{ А/мм}^2$

Менші величини відповідають більшим значенням номінальних струмів. Для трансформатора струму з вбудованою первинною обмоткою в залежності від типу виконання може вживатися мідна шина з співвідношенням сторін поперечного перерізу 1/8, 1/10, 1/20 або мідний струмопровід круглого, або трубчатого перерізу. Для трансформатора струму без вбудованої первинної обмотки, наприклад, типу ТШЛ, вікно для розміщення первинної обмотки розраховується з врахуванням параметрів шини первинної обмотки, елементів кріплення та величини переміщення шини при монтажу та під дією електродинамічних зусиль.

Кількість витків первинної обмотки визначається з врахуванням потрібного класу точності трансформатора струму, електротехнічних параметрів матеріалу магнітопроводу, величини номінального первинного струму [21, с.378].

Розрахунок перерізу магнітопроводу виконується на основі величини вторинного навантаження та індукції в магнітопроводі, яка обирається в межах

$$B_m = (0.04-0.1) \text{ Тл}$$

Розрахований переріз магнітопроводу, треба збільшити з врахуванням коефіцієнту заповнення сталі магнітопроводу K_{zs} , значення якого обирається із умов:

$K_{zs} = (0.9 - 0.95)$ - для тороїдальних витих магнітопроводів,

$K_{zs} = (0.85 - 0.9)$ - для шихтованих магнітопроводів.

Геометричні розміри магнітопроводу визначаються з врахуванням таких параметрів [6,14,22]:

-розмірів первинної обмотки d_1 ; для багатоквіткової конструкції, величина d_1 визначається з врахуванням міді обмотки та міжквіткової ізоляції;

-товщини буферної ізоляції, яка необхідна для запобігання розтріскування епоксидної ізоляції через різні величини коефіцієнтів лінійного розширення міді первинної обмотки та епоксидного компаунду. При $U = 35 \text{ кВ}$, буферна ізоляція виконується у вигляді намотки чотирьох шарів склострічки марки АЕС-0.15 x 25мм;

-товщини електростатичного екрану, який вживається для поліпшення режиму роботи буферної ізоляції. Екран виконується з алюмінієвої фольги, товщина якої 0.05 мм, намотаної у півнапуска на буферну ізоляцію, на екран подається потенціал первинної обмотки. Екранування вживається при $U_n > 10 \text{ кВ}$. Зверху фольги намотується ще один шар склострічки. Намотка ізоляції та екрану виконується в півнапуска;

-головної ізоляції з епоксидного компаунду, товщина якої визначається величиною номінальної напруги;

-зовнішньої ізоляції вторинної обмотки, яка виконана одним-двома шарами ізоляційної стрічки. На збільшені напруги додатково встановлюються накладки з електрокартону.

Ізоляція магнітопроводу виконується на підставі рекомендацій [6,22].

Розрахунок кутової та струмової похибок трансформатора струму проводиться у статичному режимі при різних величинах первинного струму в межах $(0.1 - 1.2) I_{1n}$ при номінальному значенні навантаження Z_{2n} [14,21].

Кут втрат для обраного раніш сорту сталі визначається за кривими $\varphi=f(H)$ або таблицями, які приведені у [6].

За результатами обчислювань будується графік струмової похибки $I_p=f(I_1/I_{1H})$, яка розраховується, та припустимої для даного класу точності [7, 8, 22]. Зрівнюючи отримані криві робиться висновок про експлуатаційні можливості трансформатора, необхідність виткової корекції і т.д.

Розрахунок граничної кратності первинного струму виконується для обмотки, призначеної для релейного захисту. Коефіцієнти граничної кратності визначаються за методикою, яка викладена у [14, 22-24].

Граничне значення індукції B_m не повинно перебільшувати:

-1.8 Т - для тороїдальних магнітних систем, виготовлених із електротехнічних сталей марок 3411, 3413, 3414;

-1.6 Т - для магнітопроводів, виготовлених з сталей марок 3411, 3413, 3414 методом шихтовки прямокутних пластин;

-1.75 Т - для магнітопроводів, виготовлених зі сталей 1511, 1512.

Розрахунок ЕРС на розімкненій вторинній обмотці приведем у [14,21].

Розрахунок нагріву трансформатора струму у тривалому режимі, а також термічної та динамічної стійкості виконується на підставі [13, 14, 21].

Початкові дані для обрання завдання до курсового проекту приведені в таблиці 5.1. Для всіх варіантів прийняти:

$I_{2H}=5A$, $\cos \varphi_2 = 0,8$;

Час термічної стійкості (3 - 4) с.

Рекомендована література [2,6,7,8,13,14,17,21-25].

Таблиця 5.1 - Початкові дані для курсового проекту на тему
"Трансформатор струму"

Варіант	Номинальна напруга U_n , кВ	Номинальний струм I_n , А	Номинальне вторинне навантаження для обмотки вимірювань Z_{2n} , Ом	Потужність обмотки релейного захисту Z_{2n} , ВА	Струм дінамічності $I_{уд}$, кА	Струм термічної стійкості I_t , кА	Клас точності вторинних обмоток	Тип первинної обмотки
1	6	800	0,1	10	125	25	0,5/10р	Вбудована
2	6	2000	0,12	12	—	40	0,5/10р	Без вбуд
3	10	1000	0,15	14	100	31	1/5р	Вбудована
4	10	3000	0,18	16	—	35	1/5р	Без вбуд
5	15	600	0,2	18	115	16	0,5/5р	Вбудована
6	15	6000	0,23	20	—	20	0,5/5р	Без вбуд
7	20	400	0,26	19	105	16	0,2/5р	Вбудована
8	20	4000	0,29	17	—	23	0,2/5р	Без вбуд
9	24	5000	0,27	15	—	35	1/10р	Без вбуд
10	24	6000	—	23	—	18	10р/10р	Без вбуд
11	27	900	0,22	11	115	32	1/10р	Вбудована
12	27	8000	0,17	29	—	20	3/5р	Без вбуд
13	35	1200	0,14	8	100	24	0,5/10р	Вбудована
14	35	10000	0,25	—	—	16	0,2	Без вбуд

6 ТРАНСФОРМАТОР НАПРУГИ

Виконання курсового проекту починається із викладу призначення трансформатора напруги, конструктивного виконання та основних функціональних характеристик. Проектування трансформатора напруги проводять у такій послідовності:

- розрахунок магнітної системи;
- розрахунок параметрів обмоток;
- перевірка електричної міцності ізоляції;
- розрахунок похибок трансформатора напруги;
- розрахунок електродинамічної стійкості;
- розрахунок термічної стійкості;
- розрахунок припустимого навантаження трансформатора напруги.

Розрахунок магнітної системи виконують на підставі [6, 14, 26]. Розрахунок параметрів обмоток наведений у [6, 14, 27]. Обмотка низької напруги (вторинна обмотка) конструктивно розташована ближче до магнітопроводу через порівняльно невелику величину напруги U_{2H} . Обмотка великої напруги (первинна обмотка) конструктивно може бути виконана двох типів: шарова та котушечна. Так як потужність трансформатора напруги невелика і не перебільшує 500 ВА, струм первинної обмотки для класів напруги до 35кВ складає декілька десятків міліампер, густина струму приймається в межах $(0.2 - 0.5) \text{ А/мм}^2$. Котушечна конструкція первинної обмотки містить в собі окремі секції, які мають послідовне відповідне сполучення один з одним. Для запобігання перехрещення з'єднувальними проводами витків секцій, які знаходяться під високою напругою, намотка поряд розташованих секцій виконується у протилежних напрямках.

Розрахунок похибок трансформатора напруги приведений у [6, 14].

При розрахунку похибок враховуються:

- індуктивний опір вторинної обмотки;
- магнітні характеристики сталі магнітопроводу;
- гранично-припустимі значення похибок [27].

За необхідністю треба виконати корекцію похибок на основі рекомендацій [14]. В однофазних трансформаторах - відмоткою відповідної кількості витків первинної обмотки, в трифазних - за

допомогою додаткової обмотки. Електродинамічна стійкість трансформатора напруги оцінюється за методикою, яка приведена у [14]. Електродинамічні зусилля, які діють на витки обмоток, намагаються зтиснути поперечний переріз обмоток та розтягнути периметр обмотки. Розрахунок термічної стійкості складається з визначення фiktивного часу, протягом якого температура обмоток досягне граничної припустимої величини в режимі короткого замикання для завданого матеріалу обмоток. Фиктивний час повинен перевищувати час дії короткого замикання.

Приклад розрахунку приведем у [6, 14].

Рекомендована література [3, 6, 14, 17, 23, 26-28].

Початкові дані для вибору завдання на курсовий проект приведені у таблиці 6.1.

Окрім даних таблиці 6.1 для всіх варіантів прийняти: напруга вторинної обмотки $U_{2H} = 100$ В; частота мережі $f = 50$ Гц; коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,8$; виконання трансформатора однофазне.

Таблиця 6.1 – Початкові дані для курсового проекту на тему „Трансформатор напруги”

Варіант	Номинальна напруга U_n , кВ	Клас точності	Номинальна потужність S_{2H} , ВА	Виконання загальної ізоляції	Тип встановлення
1	3	0,5	30	З природним повітряним охолодженням (суха)	Внутрішня
2	6	1	50	Суха	Внутрішня
3	6	3	130	Лита	Зовнішня
4	10	0,5	80	Лита	Внутрішня
5	10	1	120	З природним масляним охолодженням (масляна)	Зовнішня
6	15	1	110	Лита	Внутрішня
7	20	3	150	Масляна	Зовнішня
8	20	0,5	60	Лита	Внутрішня
9	24	0,5	25	Лита	Внутрішня
10	24	3	40	Масляна	Зовнішня
11	27	1	90	Масляна	Внутрішня
12	35	3	70	Масляна	Зовнішня
13	35	0,5	100	Масляна	Внутрішня

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Методические указания к курсовому проектированию по курсу "Аппараты высокого напряжения". Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А., Соколов В.Л. / Под ред. А.З. Изотова. - М. Энерг. ин-т, 1987-36с.
- 2 Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия., 1977г. - 560с.
- 3 Проектирование электрических аппаратов. / Под ред. Г.Н. Александрова. - Л.: Энергоатомиздат, 1985г. -448с.
- 4 Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоиздат, 1981г.-392с.
- 5 Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Под ред. В.В. Афанасьева. - Л.: Энергоатомиздат, 1987г.-173с.
- 6 Электротехнический справочник. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. / Под ред. профессоров МЭИ гл. ред. И.П. Орлов. -М.: Энергоатомиздат, 1986г. -712с.
- 7 Электротехнический справочник. / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергия, 1985г., Т.1 -418с.
- 8 ДСТУ 1516.3-96 Електрообладнання змінного струму на напруги від 1 до 750 кВ. Вимоги до електричної міцності ізоляції
- 9 Залесский А.М., Кукеков П.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. - Л.: Энергия, 1967г. -380с.
- 10 Кудрявцев Е.П., Долин А.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств.
- 11 Теория электрических аппаратов: Учебник. / Под ред. Г.Н. Александрова - М.; Энергия, 1985г. -312с.
- 12 Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения: Учебное пособие для вузов. -М.: Энергоатомиздат, 1985г. -432с.
- 13 Дорошев К.И. Эксплуатация КРУ 6-220 кВ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. -338с.
- 14 Электрические аппараты высокого напряжения. / Под ред. Г. Н. Александрова. -Л.: Энергоатомиздат, 1989. -344с.

- 15 Силовые полупроводниковые приборы Справочник. О. Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин - М.: Энергоатомиздат. 1985 -400с.
- 16 Порудоминский И. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. - М.: Энергия. 1974. -288с.
- 17 ДСТУ EN 60076-6:2015 Силові трансформатори. Частина 6. Реактори (IEC 60076-6(2004), IDT).
- 18 Электротехнический справочник. Т.2. / Под ред. В.Г. Герасимова и др. Изд. 6-е, / М.: Энергия, 1985. -640с.
- 19 Трансформаторы тока. / Афанасьев В.В., Адоньев П.М., Жалалис Л.В. и др. - Л.: Энергия, 1980. - 344с.
- 20 Казанский В. Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. - М.: Энергия, 1978. -262с.
- 21 Казанский В.Е. Трансформаторы тока. - Л.: Энергия, 1980. - 344с.
- 22 Тихомиров П.М. Расчет Трансформаторов. - М.: Энергия, 1976. -544с.
- 23 ДСТУ EN 61869-3:2017 Трансформатори вимірювальні. Частина 3. Додаткові вимоги до індуктивних трансформаторів напруги (IEC 61869-3:2011, IDT).
- 24 Дымков А.М., Кибель В.М., Трансформаторы напряжения. - М.: Энергия, 1975. -201с.
- 25 Дорошев К.И. Выключатели и измерительные трансформаторы в КРУ 6 - 220 кВ. -М.: Энергоатомиздат. 1990. -152с.
- 26 Справочник по электрическим установкам напряжения. / Под ред. И.А. Баумштейна. С.А. Бажанова. - М.: Энергоатомиздат. 1989. - 768с.
- 27 Дорошев К.И. Токопроводы и шинопроводы для электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1996. - 288с.
- 28 А.М. Семчинов Токопроводы промышленных предприятий.- Л.: Энергоиздат, 1982. -208с.
- 29 Эл. часть станций и подстанций Под ред. А.А Васильева. -М.: Энергоатомиздат, 1990. -576с.