

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ
ТА ПІДСТАНЦІЙ»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм
навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія,
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійні програми «Електротехнічні системи
електроспоживання», «Світлотехніка та дизайн світлового середовища»,
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електромеханіка»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітньо-професійні програми «Електротехнічні системи електроспоживання», «Світлотехніка та дизайн світлового середовища», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електромеханіка») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. В. М. Охріменко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 93 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. В. М. Охріменко

Рецензент

В. Ф. Харченко, доктор технічних наук, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 1 від 29.08.2025.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
ПРАКТИЧНА РОБОТА 1 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ	
АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ І ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ВУЗЛОВІЙ	
ПІДСТАНЦІЇ	9
1.1 Загальні відомості	9
1.2 Методика вибору автотрансформаторів і трансформаторів	10
1.2.1 Складання узагальненої моделі типу «чорний ящик»	11
1.2.2 Аналіз вихідних даних і уточнення узагальненої моделі для заданої	
підстанції.....	12
1.2.3 Формування структурної моделі заданої підстанції	13
1.2.4 Розрахунок потужності трансформаторів і автотрансформаторів	15
1.3 Завдання для самостійної роботи	19
Контрольні запитання до практичного заняття	20
ПРАКТИЧНА РОБОТА 2 РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ	
ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТРАНСФОРМАТОРІ	21
2.1 Методика розрахунку	21
2.2 Приклад розрахунку	23
2.3 Завдання для самостійної роботи	25
Контрольні запитання до практичного заняття	26
ПРАКТИЧНА РОБОТА 3 ВИБІР І ПЕРЕВІРКА ВИМИКАЧІВ	
ТА РОЗ'ЄДНУВАЧІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ	27
3.1 Загальні відомості	27
3.2 Методика вибору високовольтних вимикачів і роз'єднувачів	27
3.3 Приклад вибору	31
3.4 Завдання для самостійної роботи	32
Контрольні запитання до практичного заняття	33

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4 ВИБІР І РОЗРАХУНОК ШИН

ТА ІЗОЛЯТОРІВ	34
4.1 Загальні відомості про електротехнічні шини	34
4.1.1 Основні властивості, переваги та недоліки електротехнічних шин	36
4.2 Вибір і перевірка шин	37
4.2.1 Перевірка шин на електродинамічну стійкість	38
4.2.2 Перевірка шин на термічну стійкість	45
4.3 Вибір ізоляторів	46
4.4 Приклад вибору шин і ізоляторів	47
4.5 Завдання для самостійної роботи	49
Контрольні запитання до практичного заняття	50

ПРАКТИЧНА РОБОТА 5 ВИБІР ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

СТРУМУ І НАПРУГИ	51
5.1 Загальні відомості	51
5.2 Вибір трансформаторі струму	51
5.3 Вибір трансформаторів напруги	55
Контрольні запитання до практичного заняття	56

ПРАКТИЧНА РОБОТА 6 РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЕННЯ ПОНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

.....	57
6.1 Загальні відомості	57
6.2 Приклад розрахунку	60
6.3 Завдання для самостійної роботи	62
Контрольні запитання до практичного заняття	62

ПРАКТИЧНА РОБОТА 7 РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЇ ВІД

УДАРІВ БЛИСКАВКИ	63
7.1 Методика розрахунку	63
7.2 Приклади розрахунку	70
7.2.1 Одностержньовий захист	70
7.2.2 Подвійний тросовий захист	73

7.3 Завдання для самостійної роботи	75
Контрольні запитання до практичного заняття	76
8 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ	77
8.1 Мета та завдання дисципліни	77
8.2 Тематика лекцій	79
8.3 Тематика практичних занять	81
8.4 Тематика лабораторних занять	83
8.5 Види завдань самостійної роботи і оцінювання знань	84
9 ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ПІДСУМКОВОГО ЕКЗАМЕНУ ..	86
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	89
ДОДАТОК А Зразок оформлення основного напису.....	91
ДОДАТОК Б Зразок оформлення структурної схеми підстанції.....	92

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АТ – автотрансформатор

ВН – висока напруга

ВРПС – вузлова розподільна підстанція

ГЗШ – головна заземлююча шина

ГРП – головний розподільний пристрій

ЕЕ – електрична енергія

ЄСКД – єдина система конструкторської документації

КЗ – коротке замикання

ЛЕП – лінія електропередачі

НН – низька напруга

ПС – підстанція

РУ – розподільне устаткування

СН – середня напруга

ТС – трансформатор струму

ВСТУП

Одним з найважливіших елементів системи електропостачання є електричні станції та підстанції. Нормальне функціонування генераторів, трансформаторів, синхронних компенсаторів та комутаційної апаратури забезпечує надійність генерування, передачі та розподілу електричної енергії. Широке застосування електроенергії пояснюється її цінними властивостями, можливістю ефективного перетворення в інші види енергії (механічну, теплову, хімічну) з метою приведення в дію машин і механізмів, отримання теплоти й світла, зміни хімічного складу речовини, виробництва та обробки матеріалів. На сьогодні багато електрообладнання електричних станцій та підстанцій застаріло та потребує ремонту або заміни.

Такий стан силового обладнання електричних станцій і підстанцій вимагає поглибленого вивчення характеристик і особливостей впровадження сучасного нового електротехнічного обладнання ще на етапі навчального процесу у вищій школі. Самостійна робота студентів як один з основних методів опанування навчальною дисципліною покращує засвоєння необхідних умінь і практичних навичок передбачених програмою дисципліни.

Основними видами самостійної роботи студента є підготовка та виконання практичних та лабораторних робіт, підготовка до проміжного та підсумкового контролю, виконання завдань для самостійного опрацювання, вивчення питань для поглибленого ознайомлення з навчальною дисципліною.

Мета викладання навчальної дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій» полягає у формуванні у здобувачів вищої освіти знань та вмінь в галузі виробництва і передачі електричної енергії, влаштування електроустаткування електричних станцій та підстанцій, оснащення їх сучасним електрообладнанням, проєктування та ефективної експлуатації цього обладнання.

Дане видання методичних рекомендацій до проведення практичних занять та організації самостійної роботи студентів є удосконаленням і переробленим варіантом попередніх видань методичних рекомендацій [1, 2].

У методичних рекомендаціях розглянуте основне силове обладнання підстанцій, його функції й особливості вибору для забезпечення ефективних режимів роботи систем електропостачання.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні знати:

- основні положення теорії електричних кіл щодо розрахунків режимів роботи високовольного обладнання електричних станцій та підстанцій;
- фізику роботи джерел електричної енергії, силових та вимірювальних трансформаторів, комутаційних пристроїв і апаратів;
- технологію вибору і перевірки силового електротехнічного обладнання електричних станцій і підстанцій;
- принципи побудови головних схем електричних з'єднань та схем власних потреб електростанцій та підстанцій, підходи до вибору обладнання для заданих умов роботи.

Мета цих методичних вказівок – надати допомогу студентам у виконанні і захисті звітів з практичних робіт, у процесі яких вони знайомляться з конструкціями, вивчають принципи дії і характеристики характерних груп силового обладнання електричних станцій і підстанцій.

Кожна практична робота передбачає оформлення студентом звіту з виконаної роботи згідно з заданим варіантом вихідних даних. Склад звіту студенти погоджують з викладачем під час виконання практичної роботи.

Закінчений і повністю оформлений звіт з виконаної практичної роботи студент надає викладачу для реєстрації на наступному практичному занятті. Захист звітів з виконаних практичних робіт проводиться протягом наступного практичного заняття.

Студент, який не оформив звіт з виконаної попередньої практичної роботи *не допускається до виконання наступної практичної роботи.*

Захист звіту. Під час захисту звіту студент має *показати розуміння* розглянутого матеріалу, *вміння* пояснювати мету роботи, призначення, характеристики, конструктивні особливості, переваги й недоліки дослідженого устаткування, відповідати на контрольні запитання до виконаної практичної роботи.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ І ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ВУЗЛОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ

1.1 Загальні відомості

Вузлові підстанції здійснюють зв'язок окремих районів енергосистеми або різних енергосистем. Зазвичай це підстанції з напругою 220–750 кВ.

Вузлова розподільна підстанція (ВРПС) – це така центральна підстанція району електричних мереж, яка виконує функцію розподілу електричної енергії (ЕЕ) між підстанціями (ПС) на території району електричних мереж. На ПС ЕЕ подається від енергосистеми на напрузі від 110 кВ до 220 кВ. На ПС вона розподіляється, з частковою трансформацією або взагалі без трансформації на напругах від 35 кВ до 220 кВ і видається до ПС, які розташовані на території району електричних мереж.

Найчастіше на ВРПС встановлюють два трансформатори чи автотрансформатори. Наявність двох джерел ЕЕ (трансформаторів чи автотрансформаторів) забезпечує надійне живлення споживачів навіть при аварійному відключенні одного з них (виконання вимог ПУЕ [3] щодо електропостачання споживачів першої категорії надійності електропостачання).

На двох трансформаторних підстанціях в перші роки експлуатації, коли навантаження не досягає розрахункового, можлива установка одного трансформатора. Протягом цього періоду забезпечують резервування електропостачання споживачів мережами середньої чи низької напруги. Надалі при збільшенні навантаження до розрахункового на ВРПС встановлюють другий трансформатор. Якщо при установці одного трансформатора забезпечити резервування мережами середньої напруги (СН) і низької напруги (НН) неможливо або повне розрахункове навантаження підстанції очікується раніше ніж через 3 роки після її введення в експлуатацію, то підстанція споруджується за кінцевою схемою, тобто з двома трансформаторами.

Спорудження одно трансформаторних підстанцій забезпечує значну економію капітальних витрат, але не виключає перерв електропостачання, тому рекомендована гранична потужність [4] таких підстанцій за наявності пересувного трансформаторного резерву складає до 25 МВА при напрузі 110 кВ, до 6,3 МВА при напрузі 35 кВ. У випадку відсутності пересувного резерву гранична потужність таких підстанцій складає 2,5 – 6,3 МВА при напрузі 110 кВ, чи 2,5 – 4,0 МВА при напрузі 35 кВ.

1.2 Методика вибору автотрансформаторів і трансформаторів

Алгоритм вибору автотрансформаторів і трансформаторів на ВРПС передбачає послідовне виконання наступних процедур:

- складання моделі ВРПС типу «чорний ящик»;
- складання структурної моделі ВРПС;
- розрахунок потужності автотрансформаторів і трансформаторів.

Розглянемо порядок виконання цих процедур на прикладі ВРПС з такими вихідними даними.

Задана ВРПС на якій розташовані чотири розподільних устаткування (РУ): високої напруги (ВН) 220 кВ – РУ ВН 220 кВ; середньої напруги 110 кВ – РУ СН1 110 кВ; середньої напруги 35 кВ – РУ СН2 35 кВ; низької напруги 10 кВ – РУ НН 10 кВ.

На РУ ВН 220 кВ по лінії електропередачі (ЛЕП) 220 кВ подається ЕЕ потужністю $S_{\text{лєп}}$ 137 МВА від електростанції системного значення.

РУ СН1 110 кВ здійснює зв'язок ВРПС з енергосистемою на напрузі 110 кВ з можливістю видачі ЕЕ в енергосистему або її отримання з енергосистеми.

До шин РУ СН2 35 кВ підключені електроспоживачі потужністю $P_{\text{нав.1}} = 30$ МВт з коефіцієнтом активної потужності $\cos\varphi_{\text{нав.1}} = 0,9$.

До шин РУ НН 10 кВ підключені електроспоживачі потужністю $P_{\text{нав.2}} = 50,0$ МВт з $\cos\varphi_{\text{нав.2}} = 0,85$.

Завдання. Скласти структурну схему ВРПС і обрати для підстанції автотрансформатори і трансформатори.

Алгоритм рішення завдання, передбачає виконання наступних кроків:

- складання узагальненої моделі типу «чорний ящик»;
- аналіз вихідних даних і уточнення узагальненої моделі для заданої підстанції;
- формування структурної моделі заданої підстанції;
- розрахунок потужності трансформаторів та автотрансформаторів.

Розглянемо хід виконання цих кроків алгоритму рішення завдання.

1.2.1 Складання узагальненої моделі типу «чорний ящик»

Як відомо з теорії систем модель типу «чорний ящик» є узагальненою абстрактною моделлю, яка описує будь-яку систему. Задану ВРПС розглядаємо як систему і складаємо узагальнену модель цієї системи, модель типу «чорний ящик» (рис. 1.1) [5, стр. 59–62]. Ця модель є абстрактною моделлю не прив'язаною до конкретної системи і характеризується такими **узагальненими параметрами**: потоки входу і виходу; границі системи; зовнішнє середовище і завади системи.

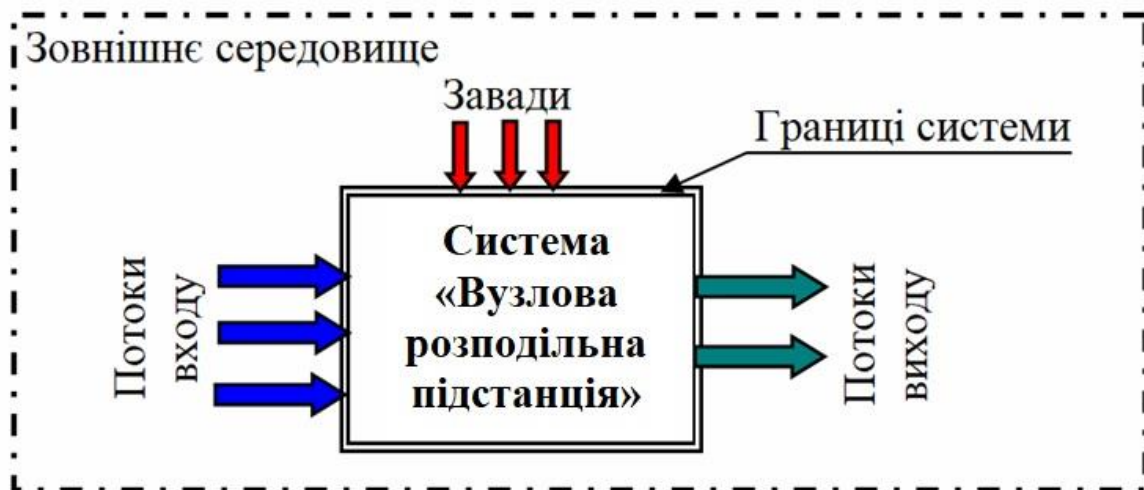


Рисунок 1.1 – Модель типу «чорний ящик» [5]

1.2.2 Аналіз вихідних даних і уточнення узагальненої моделі для заданої підстанції

Уточнення узагальненої моделі для заданої підстанції проводимо шляхом аналізу вихідних даних і їх прив'язки до досліджуваної ПС. Узагальнені параметри моделі «чорний ящик» співвідносимо з реальними параметрами заданої ВРПС. А саме: виконуємо уточнення вхідних і вихідних потоків, границь і зовнішнього середовища системи «ВРПС»; аналізуємо завади, які потрібно враховувати в роботі підстанції.

Потоками входу для ПС любого типу є потоки електричної енергії, які зовні поступають на ПС. Потоки виходу – це потоки електричної енергії яка виходить з підстанції і подається до електроспоживачів або розподіляється між іншими підстанціями району електричних мереж. Границею системи «Підстанція» є огороження яке перешкоджає несанкціонованому доступу на територію ПС. Завадами для підстанцій найчастіше є кліматичні фактори, які впливають на роботу електрообладнання на підстанції. У нашому випадку це грозова діяльність і необхідність проектування системи блискавки захисту.

Потоки входу. Аналіз даних показує, що потоками входу для заданої вузлової підстанції є наступні потоки:

- електрична енергія потужністю $S_{\text{лєп}} = 137$ МВА, що поступає по ЛЕП 220 кВ на РУ ВН 220 кВ;
- електрична енергія що поступає з ЛЕП 110 кВ на РУ СН1 110 кВ ВРПС у випадку негативного (від'ємного) балансу потужності по підстанції.

Потоки виходу. До потоків виходу відносимо електричну енергію що отримують споживачі $P_{\text{сп.1}} = 30$ МВт на напрузі 35 кВ, $P_{\text{сп.2}} = 50$ МВт на напрузі 10 кВ і потужність, яка на напрузі 110 кВ подається з РУ СН1 110 кВ до енергосистеми у випадку позитивного (додатного) балансу потужності по ВРПС.

Границі системи. У нашому випадку границями системи є територія вузлової розподільної підстанції. Подальше уточнення параметра «границі

системи» завданням не передбачено.

Завади. Завданням на виконання даної роботи розгляд завад не передбачений. Як завади для ПС можна розглядати фактори впливу зовнішнього середовища, зокрема грозову діяльність (див. практичну роботу 7).

Зовнішнє середовище нашої ВРПС не розглядаємо, оскільки завданням розгляд взаємодії ВРПС із зовнішнім середовищем не передбачений.



Рисунок 1.2 – Уточнена модель типу «чорний ящик» для заданої ВРПС

Як результат конкретизації параметрів узагальненої моделі типу «чорний ящик», маємо таку уточнену модель типу «чорний ящик», яка відповідає вихідним умовам для заданої ВРПС (рис. 1.2).

1.2.3 Формування структурної моделі заданої підстанції

Структурна модель системи, на відміну від узагальненої моделі «чорний ящик» показує основні складові системи і зв'язки між цими складовими. Ця модель дозволяє пояснити яким чином вхідні потоки системи перетворюються у вихідні потоки.

Теоретично структурна модель є уточненням (подальшим розвитком) моделі «чорний ящик» з потрібним рівнем деталізації складу системи та зв'язків між складовими. Залежно від мети дослідження системи можлива побудова деякої множини структурних моделей, які відрізняються ступенем деталізації як складових системи, так і зв'язків між ними.

Структурну модель ПС отримують на підставі аналізу вихідних даних: потужностей і класу напруги ЕЕ на вході та на виході підстанції.

В цій роботі структурну модель ВРПС подаємо у вигляді структурної схеми, яка зазвичай входить до комплексу проектно-конструкторської документації підстанції, що підлягає будівництву. Згідно зі стандартами Єдиної системи конструкторської документації (ЕСКД) [6] на структурній схемі показують основні функціональні частини об'єкта дослідження, їхнє призначення і взаємозв'язки між цими функціональними частинами.

На підставі аналізу вихідних даних і отриманої уточненої моделі типу «чорний ящик» для заданої ВРПС (рис. 1.2) можемо скласти структурну модель, яка подана на рисунку 1.3. Ця модель одночасно є структурною схемою [6] заданої ВРПС. На структурній схемі показуємо значення напруг й потужностей на елементах заданої ВРПС. Рішення щодо встановлення двох автотрансформаторів АТ1 і АТ2 та двох трансформаторів Т1 і Т2 зумовлене вимогами щодо надійності електропостачання споживачів $P_{сп.1} = P_{нав.1}$ і $P_{сп.2} = P_{нав.2}$. У реальних проєктах виконується аналіз даних на вимоги щодо надійності електропостачання споживачів та схеми електропостачання в цілому. За результатами аналізу приймається рішення щодо кількості трансформаторів і автотрансформаторів.

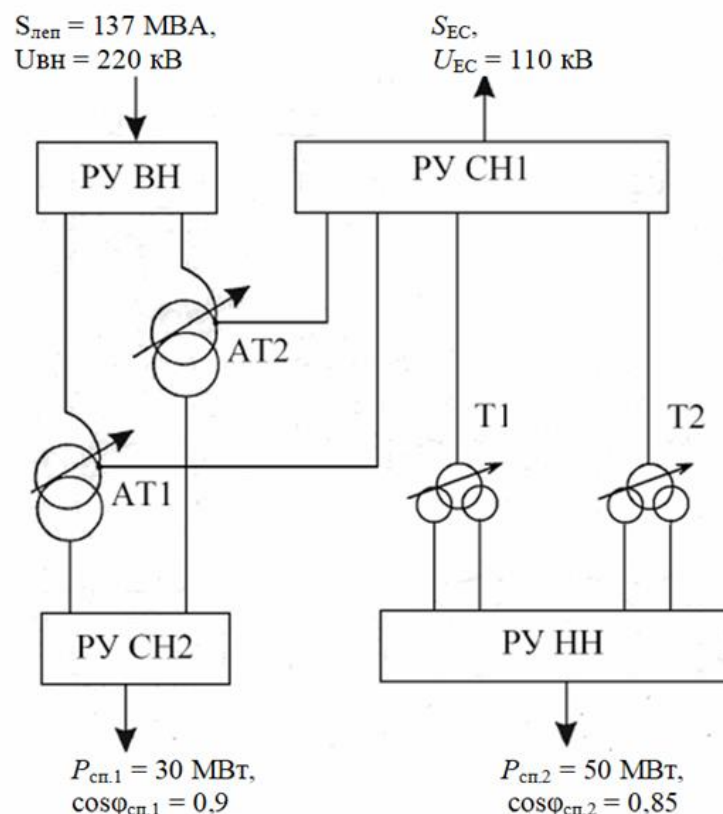


Рисунок 1.3 – Структурна схема вузлової розподільної підстанції [1]

1.2.4 Розрахунок потужності трансформаторів і автотрансформаторів

У випадку ухвалення рішення про встановлення на ВРПС двох трансформаторів (автотрансформаторів) повинна виконуватися умова щодо номінальної потужності трансформаторів

$$S_{н.тр} \geq 0,7S_{макс.пр}, \quad (1.1)$$

де $S_{макс.пр}$ – максимальна прохідна потужність, МВА.

Якщо обирають автотрансформатори (АТ), то виконують перевірку на перевантажувальну здатність обмотки низької напруги автотрансформатора:

$$S_{спож.нн} < S_{тип}, \quad (1.2)$$

де $S_{спож.нн}$ – навантаження споживачів обмотки низької напруги, МВА;

$S_{тип}$ – типова потужність АТ, яка визначається

$$S_{тип} = k_{виг} S_{н.ат} n_{ат}; \quad (1.3)$$

де $S_{н.ат}$ – номінальна потужність обраного АТ;

$n_{ат}$ – кількість АТ, підключених до навантаження низької напруги;

$k_{виг}$ – коефіцієнт вигідності АТ розраховується

$$k_{виг} = 1 - \frac{1}{k_{т(ВН-СН)}}, \quad (1.4)$$

де $k_{т(ВН-СН)}$ – коефіцієнт трансформації обмоток АТ

$$k_{т(ВН-СН)} = \frac{U_{ВН}}{U_{СН}}, \quad (1.5)$$

де $U_{ВН}$, $U_{СН}$ – значення напруги обмоток ВН, СН, кВ.

Визначають баланс потужностей по ВРПС:

$$S_{EC} = S_{ЛЕП} - S_{сп.1} - S_{сп.2}, \quad (1.6)$$

де S_{EC} – потужність зв'язку з енергосистемою, МВА;

$S_{ЛЕП}$ – потужність що приходить по ЛЕП 220 кВ, МВА;

$S_{сп.1}, S_{сп.2}$ – потужності споживачів, МВА.

Якщо отриманий результат має знак "плюс", то надлишок потужності, яка приходить по ЛЕП 220 кВ віддається в енергосистему, а якщо знак "мінус", то недостача потужності береться з енергосистеми. Визначають коефіцієнт завантаження автотрансформаторів

$$k_{з(AT)} = \frac{S_{\text{макс.пр}}}{n_{AT} S_{н.ам}}; \quad (1.7)$$

і відповідно коефіцієнт завантаження трансформаторів

$$k_{з(ТР)} = \frac{S_{\text{макс.пр}}}{n_{ТР} S_{н.тр}}; \quad (1.8)$$

де n_{AT} і $n_{ТР}$ – кількість автотрансформаторів і трансформаторів відповідно.

Розглянемо розрахунок потужності автотрансформаторів і трансформаторів для наведеного вище у п.1.2 прикладу вихідних даних по ВРПС.

Визначаємо повні потужності споживачів $S_{сп.1}$ і $S_{сп.2}$:

$$S_{сп.1} = \frac{P_{сп.1}}{\cos \varphi_1} = \frac{30}{0,9} = 33,3 \text{ МВА};$$

$$S_{сп.2} = \frac{P_{сп.2}}{\cos \varphi_2} = \frac{50}{0,85} = 58,8 \text{ МВА}.$$

Визначаємо розрахункові потужності автотрансформаторів та трансформаторів:

$$S_{\text{ат}} \geq S_{\text{р.ат}} = 0,7 \times S_{\text{ЛЕП}} = 0,7 \times 137 = 95,9 \text{ МВА};$$

$$S_{\text{т}} \geq S_{\text{р.т}} = 0,7 \times S_2 = 0,7 \times 58,8 = 41,2 \text{ МВА}.$$

За довідниковими даними [7] обираємо автотрансформатори й трансформатори. Паспортні дані обраного обладнання заносимо у таблицю 1.1

Таблиця 1.1 – Паспортні дані обраного обладнання

Два автотрансформатори АТДЦТН 125000-220/110/35	Два трансформатори ТРДН 63000-110/10
$U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}; U_{\text{СН}} = 110 \text{ кВ};$ $U_{\text{НН}} = 38,5 \text{ кВ};$	$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 10,5 - 10,5 \text{ кВ}$
$\Delta P_{\text{xx}} = 65 \text{ кВт}$	$\Delta P_{\text{xx}} = 50 \text{ кВт}$
$\Delta P_{\text{кз(ВН-СН)}} = 315 \text{ кВт}; U_{\text{кз(ВН-СН)}} = 11\%$	$\Delta P_{\text{кз}} = 245 \text{ кВт}$
$\Delta P_{\text{кз(ВН-НН)}} = 280 \text{ кВт}; U_{\text{кз(ВН-НН)}} = 45\%$	$I_{\text{xx}} = 0,5\%$
$\Delta P_{\text{кз(СН-НН)}} = 275 \text{ кВт}; U_{\text{кз(СН-НН)}} = 28\%$	

Розраховуємо отримані коефіцієнти завантаження автотрансформаторів $k_{з(АТ)}$ і трансформаторів $k_{з(Т)}$:

$$k_{з(АТ)} = \frac{S_{\phi.АТ}}{n_{АТ} S_{Н.АТ}} = \frac{137}{2 \times 125} = 0,55. \quad k_{з(Т)} = \frac{S_{\phi.Т}}{n_{Т} S_{Н.Т}} = \frac{58,8}{2 \times 63} = 0,47.$$

Перевіряємо АТ на допустимість роботи згідно з умовою (1.2)

$$S_{\text{ТИП}} \geq S_{\text{сп.1}}; \tag{1.9}$$

$$S_{\text{ТИП}} = k_{\text{виг}} S_{\text{н.ат}} = 0,5 \times 125 = 62,5 \text{ МВА},$$

де 0,5 – значення коефіцієнту вигоди $k_{\text{виг}}$, отримане розрахунком

$$k_{\text{виг}} = 1 - \frac{1}{k_{\text{Т(ВН-СН)}}} = 1 - \frac{1}{2} = 0,5.$$

Умова (1.9) $2 \times 62,5 \geq 33,3$ виконується навіть при роботі одного автотрансформатора.

Визначаємо баланс потужностей (1.6) по ВРПС

$$S_{\text{ЕНС}} = S_{\text{ЛЕП}} - S_1 - S_2 = 137 - 33,3 - 58,8 = 44,9 \text{ МВА.}$$

Позитивне значення $S_{\text{ЕНС}}$ означає, що ВРПС повністю забезпечує споживачів електричною енергією, а 44,9 МВА віддає в енергосистему на напрузі 110 кВ.

Висновок. За результатами розрахунку для заданих вихідних даних по ВРПС обрано два автотрансформатори потужністю 125 МВА і два трансформатори потужністю 63 МВА. Автотрансформатори працюють з коефіцієнтом навантаження 0,55, а трансформатори – з коефіцієнтом – 0,47. Таким чином, у перспективі можливе збільшення навантаження по підстанції на 15–20 %.

За результатами виконаної практичної роботи студент оформлює звіт, який має містити:

- вихідні дані на розрахунок згідно з заданим варіантом (див. таблицю 1.2);
- уточнену модель ВРПС типу «чорний ящик» (рис. 1.2);
- структурну схему ВРПС, виконану згідно з вимогами ЄСКД (зразок оформлення наведено у додатку Б);
- результати розрахунку потужностей автотрансформаторів і трансформаторів, результати перевірки їхнього режиму роботи;
- таблиці з паспортними даними обраних трансформаторів і автотрансформаторів;
- результати розрахунку балансу потужності по ВРПС ($S_{\text{ЕНС}}$).
- висновки по роботі.

1.3 Завдання для самостійної роботи

У таблиці 1.2 наведені варіанти вихідних даних для виконання індивідуального завдання.

Таблиця 1.2 – Варіанти завдань до практичного заняття 1

Варіант	S _{ЛЕП} , МВА	U _{ЛЕП} , кВ	U _{ЕНС} , кВ	Споживач 1			Споживач 2		
				P ₁ , МВт	U ₁ , кВ	cosφ ₁	P ₂ , МВт	U ₂ , кВ	cosφ ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	187	220	110	63	6,3	0,8	25	35	0,95
2	280	330	150	125	10	0,81	400	20	0,94
3	198	220	110	250	6,3	0,82	63	10	0,93
4	297	330	110	200	35	0,83	80	6,3	0,92
5	210	220	150	200	6,3	0,84	40	35	0,91
6	420	330	110	250	10	0,85	630	20	0,90
7	176	220	150	125	6,3	0,86	125	10	0,89
8	290	330	110	250	35	0,87	80	6,3	0,88
9	190	220	110	125	6,3	0,88	63	35	0,87
10	390	330	150	63	10	0,89	530	20	0,86
11	195	220	110	125	6,3	0,90	125	10	0,85
12	314	330	150	200	35	0,91	80	6,3	0,84
13	195	220	110	200	6,3	0,92	80	35	0,83
14	380	330	110	125	10	0,93	400	20	0,82
15	205	220	150	200	6,3	0,94	80	10	0,81
16	320	330	110	250	35	0,95	63	6,3	0,80
17	194	220	150	200	6,3	0,94	80	35	0,81
18	510	330	110	200	10	0,93	400	20	0,82
19	197	220	110	125	6,3	0,92	80	10	0,83
20	360	330	150	200	35	0,91	80	6,3	0,84
21	145	220	110	63	6,3	0,90	63	35	0,85
22	370	330	150	250	10	0,89	630	20	0,86
23	215	220	110	125	6,3	0,88	125	10	0,87
24	385	330	110	250	35	0,87	80	6,3	0,88
25	245	220	110	140	10	0,84	105	10	0,85

Контрольні запитання до практичного заняття

1. Які функції виконує вузлова розподільна підстанція?
2. Які основні параметри узагальненої моделі системи типу «чорний ящик»?
3. Яка різниця між структурною моделлю системи та структурною схемою, яка виконана згідно з вимогами ЄСКД?
4. Скільки трансформаторів встановлюється на підстанціях?
5. За яких умов можлива установка одного силового трансформатора?
6. Які переваги та недоліки одно трансформаторних підстанцій?
7. Як визначають баланс потужності по підстанції?
8. У чому полягає доцільність спорудження одно трансформаторних підстанцій?
9. Надайте пояснення основним параметрам моделі типу «чорний ящик»?
10. Поясніть методику вибору трансформаторів і автотрансформаторів для вузлової підстанції?

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТРАНСФОРМАТОРІ

2.1 Методика розрахунку

Загальну величину втрат активної потужності ($\Delta P_{\text{тр}}$, кВт) в трансформаторі визначають за формулою:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{об}} k_3^2, \quad (2.1)$$

де $\Delta P_{\text{ст}}$ – втрати в сталі, кВт; (при номінальній напрузі $U_{\text{ном}}$ від навантаження не залежать, а залежать тільки від потужності трансформатора);

$\Delta P_{\text{об}}$ – втрати в обмотках, кВт, (залежать від навантаження);

$\Delta P_{\text{об}} \approx \Delta P_{\text{кз}}$ (втрати короткого замикання (КЗ), кВт); $\Delta P_{\text{ст}} \approx \Delta P_{\text{хх}}$;

k_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора, відносні одиниці. Це відношення фактичного навантаження трансформатора $S_{\text{ф.тр}}$ до його номінальної потужності $S_{\text{н.тр}}$:

$$k_3 = \frac{S_{\text{ф.тр}}}{S_{\text{н.тр}}} \quad (2.2)$$

Загальну величину втрат реактивної потужності $\Delta Q_{\text{тр}}$ (квар) в трансформаторі визначають за формулою

$$\Delta Q_{\text{тр}} = \Delta Q_{\text{ст}} + \Delta Q_{\text{розс}} k_3^2 \quad (2.3)$$

де $\Delta Q_{\text{ст}}$ – втрати реактивної потужності на намагнічування (квар) визначається за формулою

$$\Delta Q_{\text{ст}} \approx I_{\text{хх}} S_{\text{н.тр}} 10^{-2}, \quad (2.4)$$

де $I_{\text{хх}}$ – паспортні дані струму холостого ходу трансформатора, %;

$S_{\text{н.тр}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА

$\Delta Q_{\text{розс}}$ – втрати реактивної потужності розсіювання в трансформаторі (квар) при номінальному навантаженні:

$$\Delta Q_{\text{розс}} \approx U_{\text{кз}} S_{\text{н.тр}} 10^{-2}; \quad (2.5)$$

$I_{\text{хх}}$ – струм холостого ходу трансформатора, %;

$U_{\text{кз}}$ – напруга короткого замикання, %;

$S_{\text{н.тр}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Значення $\Delta P_{\text{хх}}$, $\Delta P_{\text{об}}$, $I_{\text{хх}}$, $U_{\text{кз}}$ приймаються за даними каталогів для конкретного трансформатора.

На підставі розрахунку втрат потужності можна визначити втрати електроенергії. Для визначення втрат електроенергії застосовують метод, заснований на поняттях часу найбільших втрат (τ) і часу використання максимального навантаження ($T_{\text{м}}$). Час максимальних втрат (τ) – умовне число годин, протягом якого максимальний струм, що протікає безперервно, створює втрати енергії, рівні дійсним втратам енергії за рік.

Час використання максимуму навантаження ($T_{\text{м}}$) – умовне число годин, протягом якого при максимальному навантаженні передається чи споживається за рік стільки енергії, скільки при роботі по наведеному графіку. $\tau = F(\cos\phi, T_{\text{м}})$ визначається за графіком (рис. 2.1).

Загальна втрата активної енергії (кВт×год) в трансформаторі визначається за формулою

$$\Delta W_{\text{А.ТР}} = \Delta W_{\text{СТ}} + \Delta W_{\text{ОБ}} = \Delta P_{\text{СТ}} \times t + \Delta P_{\text{ОБ}} \times k_3^2 \times \tau. \quad (2.6)$$

де t – кількість годин роботи трансформатора.

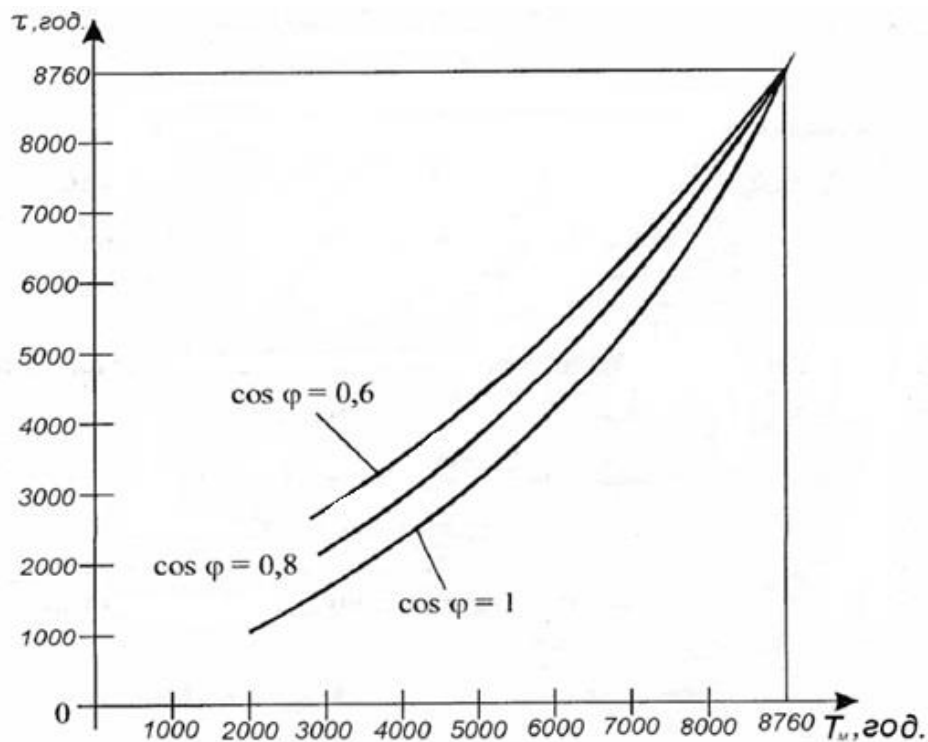


Рисунок 2.1 – Графік залежності $\tau = F(\cos\varphi, T_m)$

Загальна втрата реактивної енергії (квар×год) в трансформаторі визначається за формулою:

$$\Delta W_{P,TP} = S_{HT}(I_{XX}t + U_{K3}k_3^2\tau) \times 10^{-2}. \quad (2.7)$$

2.2 Приклад розрахунку

Дано. Трансформатор – ЕС-Бл, тип – ТД 80000-220/10,5: $\Delta P_{XX} = 79$ кВт;
 $\Delta P_{K3} = 315$ кВт; $U_{K3} = 11\%$; $I_{XX} = 0,45 \%$; $k_3 = 0,99$; $\cos\varphi = 0,8$; $T_m = 5\,000$ год.;
 $t = 5500$ год.

Необхідно визначити:

- втрати потужності за рік (ΔP_{TP} , ΔQ_{TP} , ΔS_{TP});
- втрати енергії за рік ($\Delta W_{a,TP}$, $\Delta W_{p,TP}$, ΔW_{TP}).

Рішення.

Втрати активної потужності в трансформаторі:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{ст.} + \Delta P_{об} \times k_3^2 = 79 + 315 \times 0,99^2 = 387,7 \approx 3,9 \times 10^2 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{об} \approx \Delta P_{кз} = 315 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{ст} \approx \Delta P_{хх} = 79 \text{ кВт}.$$

Втрати реактивної потужності в трансформаторі:

$$\Delta Q_{тр} = \Delta Q_{ст} + \Delta Q_{рас} k_3^2 = 3,6 \times 10^2 + 88 \times 10^2 \times 0,99 = 89,9 \times 10^2 \text{ квар}.$$

$$\Delta Q_{ст} \approx I_{хх} \times S_{н.тр} \times 10^{-2} = 0,45 \times 80\,000 \times 10^{-2} = 360 \text{ квар}.$$

$$\Delta Q_{рас} \approx U_{кз} \times S_{н.тр} \times 10^{-2} = 11 \times 80\,000 \times 10^{-2} = 88 \times 10^2 \text{ квар}.$$

Повні втрати потужності в трансформаторі

$$\Delta S_{TP} = \sqrt{\Delta P_{TP}^2 + \Delta Q_{TP}^2} = \sqrt{(3,9 \times 10^2)^2 + (89,9 \times 10^2)^2} = 90,1 \times 10^2 \text{ кВА}.$$

Втрати активної енергії в трансформаторі

$$\begin{aligned} \Delta W_{а.тр} &= \Delta W_{ст} + \Delta W_{об} = \Delta P_{ст} \times t + \Delta P_{об} \times k_3^2 \tau = \Delta P_{ст} \times t + \Delta P_{кз} \times k_3^2 \tau = \\ &= 79 \times 5\,500 + 315 \times 0,99^2 \times 3\,500 = 1,5 \times 10^6 \text{ кВт} \times \text{год}. \end{aligned}$$

За графіком (рисунок 2.1) визначаємо

$$\tau = F(\cos \phi, T_M) = F(0,8; 5\,000) = 3\,500 \text{ год}.$$

Втрати реактивної енергії в трансформаторі

$$\begin{aligned} \Delta W_{р.тр} &= S_{н.тр} (I_{хх} \times t + U_{кз} \times k_3^2 \times \tau) \times 10^{-2} = 80\,000 (0,45 \times 5\,500 + \\ &+ 11 \times 0,99^2 \times 3\,500) \times 10^{-2} = 32,2 \times 10^6 \text{ квар} \cdot \text{год}. \end{aligned}$$

Повні втрати енергії в трансформаторі

$$\Delta W_{TP} = \sqrt{\Delta W_{а.тр}^2 + \Delta W_{р.тр}^2} = \sqrt{(1,5 \times 10^6)^2 + (32,2 \times 10^6)^2} = 34,5 \times 10^6 \text{ кВА} \times \text{год}.$$

Відповідь. Річні втрати в блоковому трансформаторі електростанції:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{тр}} &= 3,9 \times 10^2 \text{ кВт}; & \Delta W_{\text{а.тр}} &= 1,5 \times 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \\ \Delta Q_{\text{тр}} &= 89,9 \times 10^2 \text{ квар}; & \Delta W_{\text{р.тр}} &= 32,2 \times 10^6 \text{ квар} \cdot \text{год}; \\ \Delta S_{\text{тр}} &= 90,1 \times 10^2 \text{ кВА}; & \Delta W_{\text{тр}} &= 34,5 \times 10^6 \text{ кВА} \cdot \text{год}.\end{aligned}$$

2.3 Завдання для самостійної роботи

Дані щодо варіантів індивідуального завдання для самостійної роботи студентів наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань до практичного заняття 2

Варіант	Місце установки*)	k_z	$\cos\varphi$	T_m , ГОДИН	t , годин
1	2	3	4	5	6
1	ВРП	0,65	0,88	3 000	4 000
2	ЕС-ГРУ	0,78	0,82	4 500	8 000
3	ЕС-Бл.	0,82	0,79	3 500	5 000
4	ВРП	0,58	0,87	5 500	7 500
5	ЕС-ГРУ	0,67	0,83	4 000	6 000
6	ЕС-Бл.	0,79	0,84	6 500	7 500
7	ВРП	0,66	0,86	4 500	7 000
8	ЕС-ГРУ	0,59	0,78	6 500	7 500
9	ЕС-Бл.	0,8	0,85	5 000	8 000
10	ВРП	0,65	0,88	3 500	4 000
11	ЕС-ГРУ	0,78	0,82	4 500	5 500
12	ЕС-Бл.	0,82	0,79	4 200	5 000
13	ВРП	0,58	0,86	4 600	5 500
14	ЕС-ГРУ	0,67	0,78	5 100	6 000
15	ЕС-Бл.	0,79	0,85	6 000	6 500
16	ВРП	0,66	0,87	5 300	7 000
17	ЕС-ГРУ	0,59	0,83	6 000	7 500
18	ЕС-Бл.	0,8	0,84	5 400	8 000

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
19	ВРП	0,65	0,86	5 900	6 700
20	ЕС-ГРУ	0,78	0,78	3 800	4 500
21	ЕС-Бл.	0,82	0,85	3 400	5 000
22	ВРП	0,58	0,84	4 100	5 500
23	ЕС-ГРУ	0,67	0,86	4 800	6 000
24	ЕС-Бл.	0,79	0,78	5 400	6 500
25	ВРП	0,66	0,85	5 500	7 000
*ВРП – вузлова розподільна підстанція; ЕС – електростанція; ГРУ – генераторне розподільне устаткування; Бл. – блоковий розподільний пристрій.					

Контрольні запитання до практичного заняття

1. На які види поділяються втрати в трансформаторі?
2. Від чого залежать втрати активної потужності?
3. Від чого залежать втрати реактивної потужності?
4. На величину яких втрат енергії впливає час найбільших втрат τ ?
5. Надайте пояснення часу найбільших втрат.
6. Надайте пояснення часту максимальних втрат.
7. Як визначають коефіцієнт завантаження трансформатора?
8. Поясніть одиниці вимірювання потужності трансформатора?
9. Як визначають річні втрати в трансформаторі?

ПРАКТИЧНА РОБОТА З ВИБІР І ПЕРЕВІРКА ВИМИКАЧІВ ТА РОЗ'ЄДНУВАЧІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

3.1 Загальні відомості

Високовольтний вимикач це комутаційний апарат, призначений для оперативних вмикань та вимикань окремих електричних кіл або електрообладнання в енергосистемі в нормальних чи аварійних режимах при ручному, дистанційному або автоматичному керуванні [1].

Високовольтні вимикачі характеризуються такими параметрами.

Номінальна напруга $U_{н.мер}$ – напруга мережі в якій працює вимикач.

Номінальний струм $I_{н.}$ – струм який проходить через вимикач, за умови якого він може працювати тривалий час.

Номінальний струм вимкнення $I_{н.вимкн}$ – найбільший струм короткого замикання (чинне значення), який вимикач зданий вимкнути за напруги, яка дорівнює найбільшій робочій напрузі при заданих умовах відновлюваної напруги і заданому циклі операцій.

Стійкість при наскрізних струмах короткого замикання (КЗ) яка характеризується струмами термічної стійкості I_T і граничним наскрізним струмом $I_{гр.наскр.}$

Номінальний струм вмикання – струм КЗ який вимикач з відповідним приводом здатний увімкнути без приварювання контактів і інших пошкоджень при $U_{н.}$ і заданому циклі.

Власний час вимкнення – проміжок часу від моменту подачі команди на вимикання до моменту початку розходження дугогасних контактів.

3.2 Методика вибору високовольтних вимикачів і роз'єднувачів

Високовольтні вимикачі вибирають за напругою, струмом, категорією розміщення, конструктивним виконанням і комутаційною здатністю [7].

Вибір за напругою виконують за такої умови

$$U_{н.мер} \leq U_{н.вим}, \quad (3.1)$$

де $U_{н.мер}$ – номінальна напруга мережі, кВ;

$U_{н.вим}$ – номінальна напруга вимикача, кВ.

Вибір за струмом виконують за такої умови

$$I_{розр} \leq I_{н.вим}, \quad (3.2)$$

де $I_{розр}$ – розрахунковий струм що буде вимикатися вимикачем;

$I_{н.вим}$ – номінальний тривалий струм вимикача.

Розрахунковий струм $I_{розр}$ вибирають за умови найбільш несприятливого експлуатаційного режиму. Наприклад, при наявності двох паралельних ліній $I_{розр}$ визначають за умови відключення однієї з них. Тобто $I_{розр} = 2 \times I_{роб}$ ($I_{роб}$ – тривалий робочий струм однієї лінії).

Для тупикової підстанції

$$I_{роб} = \frac{0,7 S_{н.тр}}{\sqrt{3} U_{н.мер}}, \quad (3.3)$$

де $S_{н.тр}$ – номінальна потужність силового трансформатора, МВА.

Для прохідної підстанції, якщо відома потужність транзиту

$$I_{роб} = \frac{S_{тран}}{\sqrt{3} U_{н.мер}}, \quad (3.4)$$

де $S_{транз}$ – найбільша транзитна потужність, МВА.

Якщо потужність транзиту невідома, то струм прохідного вимикача визначають як струм перевантаженого на 40 % трансформатора.

Високовольтні вимикачі перевіряються за такими параметрами.

Перевірка на здатність вимикати коло:

– за симетричною (періодичною) складовою струму КЗ, що відповідає розрахунковому часу τ відключення короткого замикання:

$$I_{пт} \leq I_{н. \text{ вимкн}}; \quad (3.5)$$

– за номінальним аперіодичним струмом відключення, $i_{ат}$

$$i_{ат} \leq i_{а.ном} = \sqrt{2} \beta_{ном} I_{н. \text{ вимкн}}, \quad (3.6)$$

де $i_{а.ном}$ – номінальний аперіодичний струм відключення вимикача;

$\beta_{ном}$ – номінальна відносна складова аперіодичного струму відключення для часу τ (% або відносні одиниці);

i_a – аперіодична складова струму КЗ кола, яке розраховується

$$i_a = \sqrt{2} I_{п,0} \times e^{\frac{-t}{T_a}}, \quad (3.7)$$

де T_a – час затухання аперіодичної складової струму КЗ, с;

t – власний час вимикання вимикача, с.

При $I_{пт} \leq I_{відкл.ном.}$, а $i_{ат} \geq i_{а.ном}$ допускається виконання умови

$$i_{ат} = \sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq I_{відкл.ном.} \times (1 + \beta_{ном.}). \quad (3.8)$$

Перевірка на динамічну стійкість до струмів КЗ:

– за початковим періодичним струмом КЗ

$$I_{п0} \leq I_{гр.наскр.}, \quad (3.9)$$

де $I_{гр.наскр.}$ – граничний наскрізний струм (діюче значення періодичної складової), припустимий для розглянутого вимикача;

– за ударним струмом КЗ

$$i_{уд} \leq i_{гр.наскр.}, \quad (3.10)$$

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \times I_{n0} \times k_{y\partial}, \quad (3.11)$$

де $i_{\text{Гр.наскр.}}$ – номінальний струм електродинамічної стійкості вимикача (амплітудне значення граничного повного струму, припустимого для даного апарату);

$k_{\text{уд}}$ – ударний коефіцієнт.

Перевірка на термічну стійкість струмам КЗ за умовою:

$$B_K \leq I_{T.HOM}^2 \times t_\tau, \quad (3.12)$$

де B_K – інтеграл Джоуля, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$.

Інтеграл Джоуля приблизно визначають за формулою

$$B_K \approx I_{n0}^2 \times (t_{\text{відкл.}} + T_a), \quad (3.13)$$

де $t_{\text{відкл.}} = t_z + t_{\text{вим}}$ (t_z – час дії релейного захисту, с, можна прийняти рівним часові спрацювання резервного захисту, який дорівнює 4 с);

$t_{\text{вим}}$ – час вимикання вимикача (за каталогом).

У цій роботі рекомендується передбачати застосування вакуумних, елегазових чи маломасляних вимикачів.

Отже, вимикачі й роз'єднувачі високої напруги вибираються за напругою (умова 3.1), за струмом (умова 3.2), категорією розміщення і конструктивним виконанням. Потім виконується перевірка за динамічної (3.10) і термічною стійкістю (3.13) до струмів КЗ.

3.3 Приклад вибору

Вибрати вимикачі і роз'єднувачі для відкритої розподільної установки підстанції за наступних умов: $U_{\text{ном}} = 110$ кВ; $I_{\text{роб.макс}} = 184$ А; $I_{\text{п.0}} = 11,1$ кА; $k_{\text{уд}} = 1,7$; $T_a = 0,025$ с; $I_{\text{т.ном}} = 20$ кА; $t_T = 3$ с; $I_{\text{п.т}} = 11,1$ кА.

Вибір виконуємо в табличній формі (табл. 3.1). Попередньо за довідниковими даними [7] приймаємо маломасляний вимикач зовнішньої установи типу ВМТ–110Б-20/1000 УХЛ1 для якого $t = 0,08$ с., $\beta = 25$ %.

Розраховуємо аперіодичну складову струму за формулою (3.7) і ударний струм КЗ за формулою (3.11)

$$i_a = \sqrt{2} \times I_{\text{п.0}} \times e^{-t/T_a} = \sqrt{2} \times 11,1 \times e^{-0,08/0,025} = 0,64 \text{ кА},$$

$$i_y = \sqrt{2} \times I_{\text{п.0}} \times k_y = \sqrt{2} \times 11,1 \times 1,7 = 26,61 \text{ кА}.$$

Інтеграл Джоуля для струму КЗ визначаємо за (3.13)

$$B_{\kappa} = I_{\text{п.0}}^2 (t_{\text{відкл}} + T_a) = 11,1^2 (0,08 + 0,025) = 12,94 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Таблиця 3.1 – Вибір вимикачів

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{\text{м.ном}} \leq U_{\text{ном}}$	110 кВ	110 кВ
$I_{\text{розр.}} \leq I_{\text{ном}}$	184 А	1 000 А
$I_{\text{п0}} \leq I_{\text{гр.наскр.}}$	11,1 кА	20 кА
$i_y \leq i_{\text{гр.наскр.}}$	26,71 кА	52 кА
$I_{\text{пт}} \leq I_{\text{від.ном}}$	11,1 кА	20 кА
$i_{\text{а.т}} \leq i_{\text{а.ном.т}}$	0,64 кА	$1,41 \times (25/100) \times 20 = 7,1$ кА
$B_{\kappa} \leq I_{\text{т}}^2 \times t_T$	12,94 кА ² с	$20^2 \times 3 = 1\,200$ кА ² с

Як видно з таблиці 3.1, вимикач ВМТ–110Б-20/1000 УХЛ1 відповідає умовам вибору.

За довідниковими даними [7] попередньо приймаємо роз'єднувач зовнішньої установи типу РДЗ.1–110/1000–УХЛ1 з одним комплектом заземлювальних ножів. Результати заносимо у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Вибір роз'єднувача

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{м.ном} \leq U_{ном}$	110 кВ	110 кВ
$I_{розр.} \leq I_{ном}$	184 А	1 000 А
$i_y \leq i_{гр.наскр.}$	26,71 кА	80 кА
$B_k \leq I_T^2 \times t_T$	12,94 кА ² с	$31,52 \times 4 = 3\,969$ кА ² с

Згідно з даними таблиці 3.2 роз'єднувач типу РДЗ.1–110/1000–УХЛ1 відповідає умовам вибору.

3.4 Завдання для самостійної роботи

Варіанти завдання для самостійної роботи студентів подані у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Варіанти завдань до практичного заняття 3

Варіант	Місце установки	$U_{ном},$ кВ	$I_{розр},$ кА	$I_{п.0},$ кА	$k_{уд},$ кА	$T_a,$ с	$I_{п.т},$ кА
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ЗРУ	6	630	18	1,6	0,04	18
2	ВРУ	35	100	19	1,5	0,05	19
3	ЗРУ	10	2 000	30	1,4	0,06	30
4	ВРУ	110	550	14	1,3	0,025	14
5	ЗРУ	35	300	16	1,2	0,081	16
6	ВРУ	35	350	17	1,1	0,068	17
7	ЗРУ	10	1200	25	1,07	0,07	25
8	ВРУ	110	450	18,5	1,08	0,03	18,5
9	ЗРУ	10	2 100	29	1,7	0,04	29
10	ВРУ	35	250	20	1,5	0,11	20
11	ЗРУ	10	1 500	26	1,4	0,092	26
12	ВРУ	110	740	22	1,3	0,03	22
13	ЗРУ	10	2 500	23	1,6	0,027	23
14	ВРУ	35	340	20,5	1,5	0,054	20,5
15	ЗРУ	6	2 200	14	1,4	0,64	14

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
16	ВРУ	110	750	21	1,3	0,025	21
17	ЗРУ	6	1 400	22	1,2	0,073	22
18	ВРУ	35	360	13	1,1	0,062	13
19	ЗРУ	6	2 800	15	1,07	0,025	15
20	ВРУ	110	390	16	1,08	0,03	16
21	ЗРУ	35	420	20	1,7	0,085	20
22	ВРУ	110	790	24	1,5	0,04	24
23	ЗРУ	35	650	17	1,4	0,07	17
24	ВРУ	110	590	23	1,3	0,045	23

Контрольні запитання до практичного заняття

1. Пояснити призначення вимикачів.
2. За якими критеріями вибираються вимикачі?
3. За якими критеріями перевіряються вимикачі?
4. За якими критеріями вибираються роз'єднувачі?
5. За якими критеріями перевіряються роз'єднувачі?
6. Класифікація вимикачів за способом гасіння дуги.
7. Пояснити призначення роз'єднувачів.
8. Яка принципова різниця між призначенням високовольного вимикача і високовольного роз'єднувача?
9. Яка принципова різниця між високовольними вимикачами навантаження і вакуумними вимикачами?

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4 ВИБІР І РОЗРАХУНОК ШИН ТА ІЗОЛЯТОРІВ

4.1 Загальні відомості про електротехнічні шини

Електротехнічні шини – це провідники з низьким опором (активним та реактивним), до яких можуть бути приєднаними окремі електричні ланцюги (у низьковольтних установках та мережах) або високовольтні пристрої (електричні підстанції, високовольтні РУ тощо). Використання шин забезпечує економію площі установки, матеріальних та трудових витрат.

Електротехнічні шини **класифікують** за такими ознаками.

Матеріал виготовлення: мідні, алюмінієві, сталесполуменієві (що складаються з осердя, набраного з оцинкованих сталевих проводів з повивами з алюмінієвих проводів навколо осердя) та сталеві.

Виконання: жорсткі / м'які, гнучкі;

Наявність / відсутність ізоляції: ізольовані або неізольовані.

Наявність / відсутність перфорації: суцільні, перфоровані. Шини з перфорацією використовуються в електротехнічних шафах, вони легкі у складанні та монтажі.

Геометрична форма поперечного перерізу: прямокутна, дво- / три / чотирисмугова, коробчаста, трубчаста (рис. 4.1).

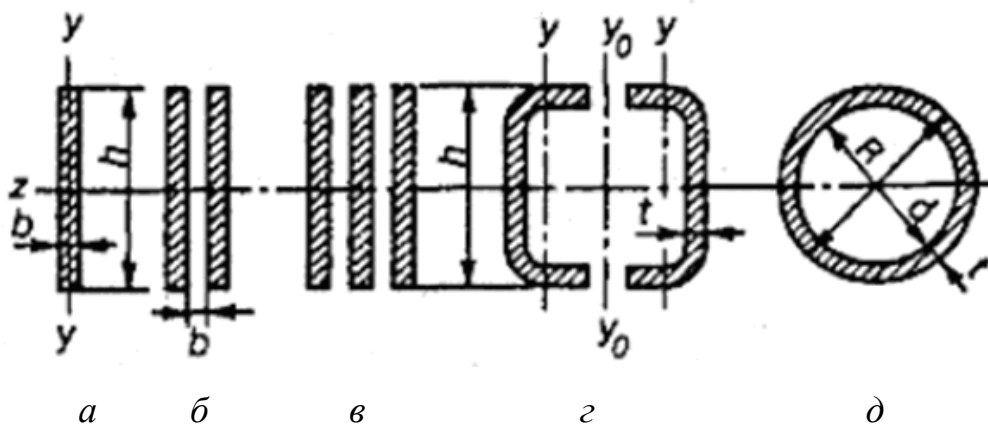


Рисунок 4.1 – Форми поперечного перерізу шин:

a – прямокутник; *б* – пакет з двох смуг; *в* – пакет із трьох смуг;

г – коробчасті шини; *д* – трубчасті шини

Класифікація шин за призначенням: збірні, силові, розподільні, заземлення, для кріплення на DIN-рейці.

Збірна шина – це шина, до якої можуть підключатися розподільні шини та блоки вводу/виводу.

Силова шина (шина електроживлення) – шина, яка слугує передачі енергії всередині силових блоків і між елементами потужних перетворювальних пристроїв і характеризується високими значеннями струмів і напруг. Силова шина може становити тверду неізольовану шину, тверду шину в ізоляції або конструкцію з набору провідних та ізоляційних шарів, що чергуються, мідну плетену шину в ізоляції або без ізоляції. Тверда неізольована мідна шина застосовується з ізоляційними шино утримувачами різних типів і ізоляційними екранами, що виключають безпосередній доступ до клем силових шин. Як матеріал силових шин використовується мідь або алюміній. За способом кріплення силові шини можуть бути вертикальні, горизонтальні, ізольовані, задні / східчасті та універсальні (мультистандартні).

Шина заземлення – головна деталь заземлювальної системи електроустановок та електромереж. Її також називають **головною заземлювальною шиною (ГЗШ)**. З шиною заземлення з'єднується робочий нуль, захисні нульові провідники та проводи зовнішніх заземлень. Зазвичай ГЗШ є мідною пластиною з перфорованими отворами, може мати захисні покриття – олово або нікель. Також застосовуються сталеві ГЗШ. Перед підключенням до ГЗШ проводи заземлення зазвичай опресовують наконечником для кабелів або сполучною гільзою, а потім вже підключають на болт з гайкою. Шина також комплектується опорними ізоляторами із кріпленням (рис. 4.2).

Розподільна шина – це шина, підключена до збірної шини і живлення пристрою виведення. Ця шина входить до складу однієї секції низьковольтного пристрою розподілу та управління. Одним із видів розподільних шин є **сполучні** або **гребінчасті шини**. Вони призначені для паралельного включення модульних автоматів, пристроїв захисного відключення, диференціальних

автоматів, контакторів тощо. Гребінчасті шини виконуються з мідної пластини прямокутного перерізу та поміщаються у пластиковий корпус.

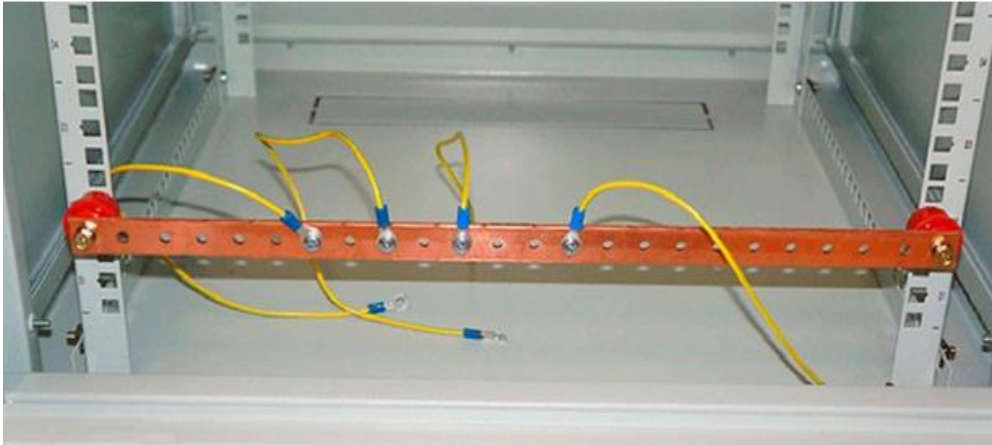


Рисунок 4.2 – Шина заземлення на опорних ізоляторах
із проводами заземлення

Шини для кріплення на DIN-рейці – шини, які застосовуються для кріплення на монтажних рейках в електричних щитах або шафах керування. Даний тип шин найчастіше виробляють із лудженої міді, а діелектрична основа, якою здійснюється кріплення до монтажних рейок, з поліаміду. Шинами на din-рейку є нульові шини, що комутують у щитах нульові дроти й дроти заземлення, або розподільні шини. Зустрічаються шини на din-рейку в корпусі. Такі шини називаються розподільними шинами у блоці або розподільними блоками.

4.1.1 Основні властивості, переваги та недоліки електротехнічних шин

Гнучкі шини не повинні перекручуватися, мати високий ступінь тяжіння (окремо взяті смуги з шини повинні мати однаковий ступінь тяжіння).

Для виключення додаткових механічних навантажень, крім власної ваги, ваги ожеледиці, сили вітру тощо, кількість відгалужувальних та сполучних затискачів повинна бути зведена до мінімуму.

Жорсткі шини обладнуються віброгасниками та шинними компенсаторами температурних натягів, що змінюють їх довжину. Плоскі шини прямокутного перерізу добре відводять тепло. При використанні їх на великих струмах від 2 000 А і вище збирається 2 чи 3 або 4-смуговий шинний пакет. Недолік таких збірних шин – складності, пов'язані з проведенням монтажних робіт, наявність індуктованого, нерівномірно розподіленого струму, погіршене охолодження, погана механічна стійкість, до струмів КЗ.

Коробчасті та плоскі шини використовуються в мережах напругою 10–35 кВ, при виборі їх необхідно враховувати виникнення коронного розряду, що з'являється при нерівномірному розподілі струмів між смугами. Приклад використання коробчастих шин – відкритий струмопровід для з'єднання блоку турбогенераторів.

Трубчаста форма вважається найбільш ефективною: добре відводить тепло та відрізняється високими характеристиками за міцністю. Навколо трубчастої шини рівномірно розподіляється електричне поле, що перешкоджає появі коронування.

На жорсткі електротехнічні шини можуть наноситися кольори фазного фарбування, крім ідентифікації фаз, фарбування збільшує тепловіддачу, це сприяє збільшенню максимального струму навантаження. Багато дротяні гнучкі шини не фарбуються. Для трифазної мережі застосовують такі кольори: фаза А – жовтий; фаза В – зелений; фаза С – червоний; нульова робоча шина – синій; захисна заземлювальна – жовто-зелений, що чергуються, або чорний колір.

4.2 Вибір і перевірка шин

Шини розподільних установок вибирають за номінальними параметрами, які відповідають нормальному режиму й умовам навколишнього середовища. Для вибору електротехнічних шин використовують значення максимального робочого струму і стійкість до струмів короткого замикання. Вибирають шини за способом кріплення, ізоляцією та розмірами.

Згідно з ПУЕ [3] збірні шини електроустановок і ошиновку в межах відкритих і закритих РУ всіх напруг за економічною густиною струму не перевіряють.

Вибір перерізу шин здійснюють за нагрівом (за припустимим струмом). При цьому враховують не тільки нормальні, а й після аварійні та ремонтні режими. Умова вибору

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп}} \quad (4.1)$$

де $I_{\text{доп}}$ – допустимий струм в шині обраного перерізу, який для неізолюваних проводів та шин визначається за виразом

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном}} \sqrt{\frac{70 - \theta_0}{45}}, \quad (4.2)$$

де $I_{\text{доп.ном}}$ – допустимий струм за таблицями при температурі повітря $\theta_{0.\text{ном}} = 25^\circ\text{C}$;
 θ_0 – дійсна температура повітря.

4.2.1 Перевірка шин на електродинамічну стійкість

Перевірка шин на динамічну стійкість зводиться до механічного розрахунку шинної конструкції при КЗ. Електродинамічні сили, які виникають при КЗ, мають коливальний характер і мають періодичні складові з частотою 50 і 100 Гц. Ці сили приводять шини й ізолятори, які є динамічною системою, в коливальний рух. Деформація елементів конструкції і відповідні механічні напруги в матеріалі залежать від складових електродинамічної сили і від власної частоти елементів, приведених в коливання.

Особливо великі механічні напруги виникають в умовах резонансу, коли власні частоти системи «шини – ізолятори» виявляються близькі до 50 або 100 Гц.

Якщо ж власні частоти системи менше ніж 30 або більше ніж 200 Гц, то механічного резонансу не виникає і перевірка шин на електродинамічну стійкість проводиться в припущенні, що шини й ізолятори є статичною системою з навантаженням, рівним максимальній електродинамічній силі при КЗ.

В більшості використовуваних конструкцій шин ці умови виконуються, і ПУЕ не вимагають перевірки шин на електродинамічну стійкість з урахуванням механічних коливань.

В окремих випадках, наприклад при проектуванні нових конструкцій РУ з жорсткими шинами, визначається частота власних коливань за такими виразами:

для алюмінієвих шин

$$f_0 = \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}}; \quad (4.3)$$

для мідних шин

$$f_0 = \frac{125,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}}, \quad (4.4)$$

де l – відстань (проліт) між ізоляторами, м;

S – площа поперечного перерізу шини, см²;

J – момент інерції поперечного перерізу шини щодо осі, перпендикулярної напрямку згинаючої сили, см⁴.

$$J = \frac{k \times b \times h^3}{12} \quad (4.5)$$

де b – товщина шини, см;

h – ширина шини, см;

$k = 2$ – кількість шин у пакеті.

Змінюючи довжину прольоту і форму перерізу шин, добиваються, щоб механічний резонанс був виключений, тобто щоб $f_0 > 200$ Гц. Якщо це не вдається, то проводиться спеціальний розрахунок шин з урахуванням динамічних зусиль, що виникають при коливаннях шинної конструкції.

При розрахунках шин, як статичної системи, виходять з допущення, що шина кожної фази є балкою яка має багато прольотів і вільно лежить на жорстких опорах, з рівномірно розподіленим навантаженням. В цьому випадку згинальний момент визначається виразом

$$M_0 = \frac{f \times l^2}{10}, \quad (4.6)$$

де f – сила, що припадає на одиницю довжини шини, Н/м.

В найважчих умовах знаходиться середня фаза, яка приймається за розрахункову; а за розрахунковий вид КЗ приймається трифазне. Максимальна сила, що припадає на одиницю довжини середньої фази при трифазному КЗ

$$F = \frac{0,176 \times k_\phi \times i_{y0}^2}{a}, \quad (4.7)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми, що враховує розміщення шин на головці ізолятора;

i_{y0} – ударний струм КЗ, кА;

a – відстань між осями суміжних фаз, м;

Механічна напруга (в мегапаскалях), що виникає в матеріалі шини

$$\sigma_{розр.} = \frac{M}{W}, \quad (4.8)$$

де W – момент опору шини, м³.

Ця напруга повинна бути менше або рівною допустимій напрузі $\sigma_{\text{доп}}$ (див. табл. 4.1).

$$\sigma_{\text{розр.}} \leq \sigma_{\text{доп.}} \quad (4.9)$$

Таблиця 4.1 – Допустима механічна напруга в матеріалі шин

Матеріал	$E \times 10^4$, МПа	$\sigma_{\text{доп}}$, МПа
Алюміній А0, А1	7	82,3
Алюмінієвий сплав АД0	–	41,2–48
Алюмінієвий сплав АД31Т	–	89,2
Алюмінієвий сплав АД331Т	–	137,2
Мідний сплав МГМ	10	171,5–178,4
Мідний сплав МГТ	10	171,5–205,8
Сталь Ст3	20	260,7–322,4

Момент опору залежить від форми перерізу шин, їх розмірів і взаємного розташування (рис. 4.1, 4.2).

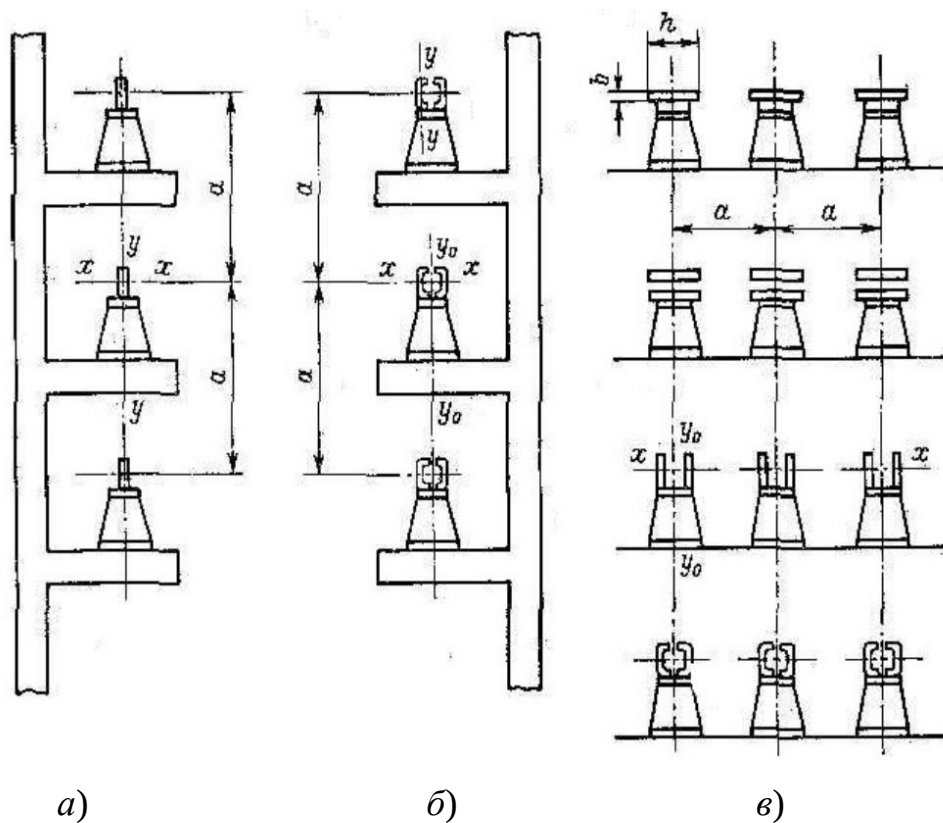


Рисунок 4.1 – Різні способи установки шин

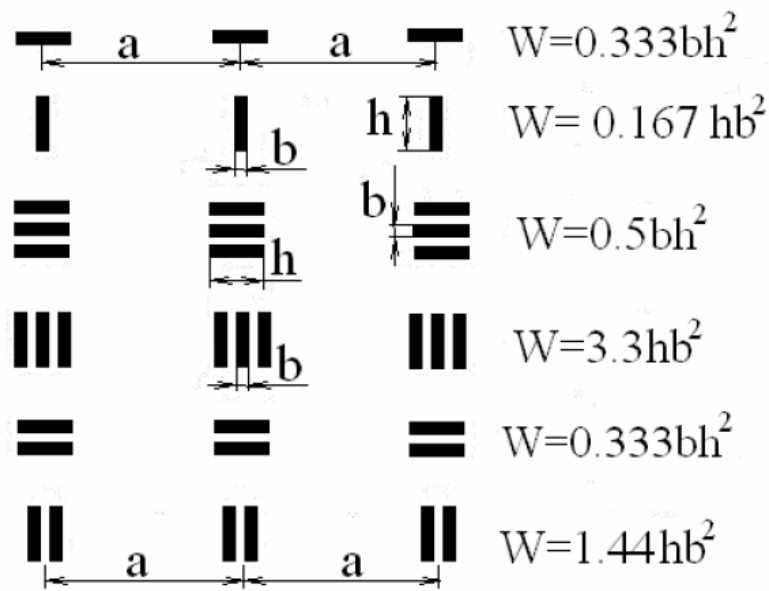


Рисунок 4.2 – Моменти опору для характерних профілів і варіантів розташування шин

Виконання умови електродинамічної стійкості шин забезпечується відповідним вибором відстані між шинами a , прольоту між опорними ізоляторами l , а також розташування і форми перерізу шин. Відстань a приймається відповідно до типових конструкцій універсальних РУ в межах 40–80 см. Проліт l вибирається в межах 1,5–2 м залежно від конструктивного виконання РУ. Для шин збірних РУ значення l рекомендується брати рівним або кратним кроку комірки.

Обраний проліт не повинен перевищувати найбільшого допустимого значення $l_{\text{макс}}$, яке визначається за виразом

$$l_{\text{макс.}} = \sqrt{\frac{10M_{\text{макс.}}}{f}} = \sqrt{\frac{10\sigma_{\text{дон}} W}{f}}. \quad (4.10)$$

В багатосмугових шинах, коли в пакет входять дві або три смуги, виникають електродинамічні зусилля між фазами, і між смугами всередині пакету. Зусилля між смугами не повинні приводити до їх доторкування.

Для додання пакету жорсткості й запобігання доторкуванню смуг встановлюють прокладки з матеріалу шини (рис. 4.3). Відстань між ними l_{Π} вибирають так, щоб електродинамічні сили при КЗ не викликали зіткнення смуг:

$$l_{\Pi} < 0.216 \sqrt{\frac{a_{\Pi}}{i_y^3}} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\Pi}}{k_{\phi}}}, \quad (4.11)$$

де $i_{уд}$ – ударний струм трифазного КЗ;

a_n – відстань між осями смуг, см;

$J_{\Pi} = hb^3/12$ – момент інерції смуги, см⁴;

k_{ϕ} – коефіцієнт форми шин (рис. 4.4), що враховує вплив поперечних розмірів провідника на сили взаємодії.

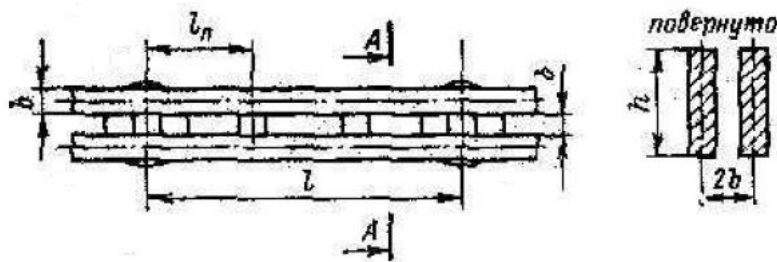


Рисунок 4.3 – Двосмугові шини

Щоб не відбулося різкого збільшення зусиль в смугах в результаті механічного резонансу, частота власних коливань системи повинна бути більш ніж 200 Гц. Виходячи з цього значення l_{Π} вибирається ще за однією умовою:

$$l_n < 1,33 \times 10^{-3} \sqrt[4]{EJ_n / m_n}, \quad (4.12)$$

де m_n – маса смуги на одиницю довжини, кг/м.

Враховується менше з двох отриманих значень.

Повна напруга в матеріалі шини складається з двох складових – σ_{Π} і σ_{ϕ} .

Напруга від взаємодії фаз σ_ϕ знаходиться так само як і для односмугових шин (W_ϕ приймається відповідно до рис. 4.2).

При визначенні напруги від взаємодії смуг σ_π приймають наступний розподіл струму між смугами: у двосмугових шинах – по $0,5i_y$ на смугу; в трьох смугових – $0,4i_y$, в крайніх і $0,2i_y$ в середній. Смуги розглядають як балку із заземленими кінцями і рівномірно розподіленим навантаженням; максимальний згинаючий момент (в ньютон-метрах) і σ_n (в мегапаскалях) визначають за виразами:

$$M_n = f_n l_n^2 / 12; \quad \sigma_n = f_n l_n^2 / (12 W_n). \quad (4.13)$$

Зусилля f_a при будь-якому розташуванні багатосмугових шин діє на широку грань шини і момент опору

$$W_\pi = b^2 h / 6. \quad (4.14)$$

Умова механічної міцності шин відповідає рівнянню

$$\sigma_{\text{розр.}} = \sigma_\phi + \sigma_\pi \leq \sigma_{\text{доп.}}. \quad (4.15)$$

Якщо ця умова не дотримується, то необхідно зменшити f_ϕ або f_π , що можна зробити, зменшивши l_ϕ чи l_π або шляхом збільшення a чи W_ϕ .

Максимально допустима відстань між прокладками

$$l_{n.\text{макс}} = \sqrt{12(\sigma_{\text{доп.}} - \sigma_\phi) W_n / f_n}. \quad (4.16)$$

Остаточні значення l_π приймають з конструктивних міркувань (довжина l_π повинна бути кратною l).

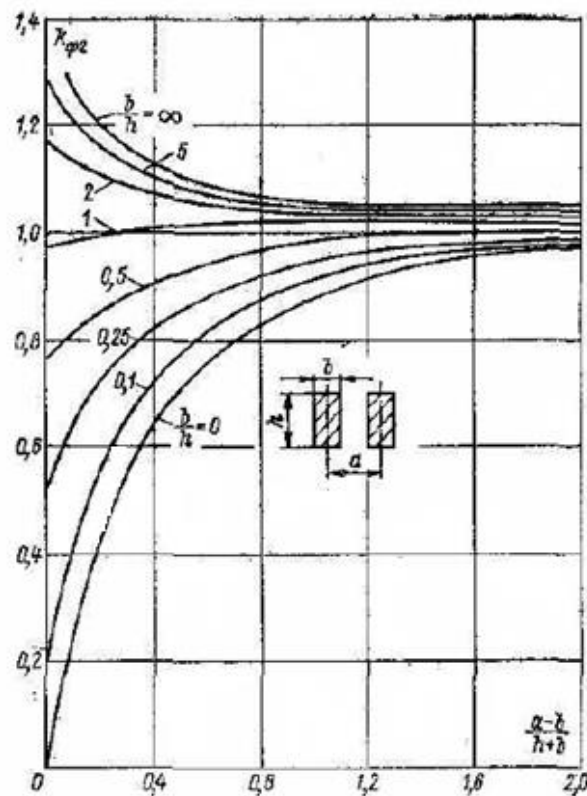


Рисунок 4.4 – Криві для визначення коефіцієнта форми шин

4.2.2 Перевірка шин на термічну стійкість

Перевірка шин на термічну стійкість при коротких замиканнях виконується за умовою

$$S_{\min} \leq S, \quad (4.17)$$

де $S_{\min}$ – мінімальний переріз за термічною стійкістю, мм^2

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B}}{C}, \quad (4.18)$$

де C – функція, значення якої встановлюють за спеціальними таблицями.

Остаточно приймають більший переріз.

4.3 Вибір ізоляторів

Опорні й прохідні ізолятори розподільних установок вибирають за умов

$$U_{\text{ном.уст}} \leq U_{\text{ном.із}} , \quad (4.19)$$

$$F_{\text{розр}} \leq F_{\text{доп}}, \quad (4.20)$$

де $U_{\text{ном.уст}}$, $U_{\text{ном.із}}$ – номінальна напруга установки й ізолятора відповідно;

$F_{\text{розр}}$ – розрахункове зусилля, що діє на ізолятор, Н;

$F_{\text{доп}}$ – допустиме зусилля на ізолятор, Н.

Розрахункове зусилля для опорних ізоляторів визначають за формулою

$$F_{\text{розр.}} = F_{\phi} \times l \times k_h, \quad (4.21)$$

де k_h – виправний коефіцієнт на висоту шини; якщо шини встановлені пліском,

то $k_h = 1$, якщо на ребро, то $k_h = \frac{H}{H_{\text{із}}} (H_{\text{із}} + b + \frac{h}{2})$. У цій формулі

$H_{\text{із}}$ – висота ізолятора, H – висота від основи ізолятора до середини шини.

Розрахункове зусилля для прохідних ізоляторів

$$F_{\text{розр.}} = 0,5 \times f_{\phi} \times l. \quad (4.22)$$

Крім того, прохідні ізолятори необхідно вибрати за припустимим струмом, виходячи з умови

$$I_{\text{макс.}} \leq I_{\text{ном.}} \quad (4.23)$$

Припустиме зусилля $F_{\text{доп}}$ приймають рівним $0,6 \times F_{\text{руйн.}}$, а значення руйнівного зусилля наводиться в каталогах на ізолятори.

4.4 Приклад вибору шин і ізоляторів

Завдання. Вибрати шини, прохідні і опорні ізолятори для кола закритої розподільної установки струм у якому складає $I_{\text{розр}} = 2\,549\text{ А}$, напруга установки 10 кВ , відстань між фазами $a = 0,5\text{ м}$, відстань між опорними ізоляторами $l = 1,5\text{ м}$. Ударний струм короткого замикання $i_{\text{уд}} = 26,6\text{ кА}$, інтеграл Джоуля $B_k = 8,9\text{ кА}^2\text{с}$.

Рішення. Ошиновку закритих РУ 10 кВ виконують твердими шинами. Для струму $I_{\text{розр}} = 2\,549\text{ А}$ згідно з таблицею 7.3 [7] приймаємо двосмугові прямокутні алюмінієві шини $120\text{ мм} \times 8\text{ мм}$ зі сплаву АД 31Т, для яких $I_{\text{прип}} = 2\,650\text{ А}$. За термічною стійкістю до струмів КЗ переріз має бути рівним

$$S_{\text{мін}} = \frac{\sqrt{B}}{C} = \frac{\sqrt{8,9}}{91 \times 10^{-3}} = 32,8\text{ мм}^2 < 19,2\text{ мм}^2.$$

Прийнятий переріз відповідає умовам термічної стійкості.

Частота власних коливань для алюмінієвих шин визначається за (4.3), а момент інерції – за (4.5):

$$J = \frac{k \times b \times h^3}{12} = \frac{2 \times 0,8 \times 12^3}{12} = 230,4\text{ см}^4,$$

$$f_0 \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}} = \frac{173,2}{1,5^2} \sqrt{\frac{230,4}{19,2}} = 267\text{ Гц}.$$

Розрахунок f_0 показує, що власна частота коливань шин не потрапляє в зону резонансних явищ.

Розрахункова механічна напруга для двосмугових шин визначається за (4.15), механічна напруга від взаємодії фаз – за (4.8), а від взаємодії смуг – за (4.13).

$$F_{\phi} = \frac{0,176 \times k_{\phi} \div i_{\text{yo}}^2}{a} = \frac{0,171 \times 1 \times 26,6^2}{0,5} = 249,1\text{ Н}$$

$$M_{\phi} = \frac{F \times l^2}{10} = \frac{249,1 \times 1,5^2}{10} = 56,1 \text{ Н} \times \text{м}$$

$$W = \frac{k \times b \times h^2}{6} = \frac{2 \times 0,8 \times 12^2}{6} = 38,4 \text{ см}^3$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{M}{W} = \frac{56,01}{38,4} = 1,46 \text{ МПа}$$

$$F_n = 0,025 \frac{k_{\phi} \times i_y^2}{b} = 0,025 \frac{1 \times 13,3^2}{0,8} = 5,53 \text{ Н.}$$

Це зусилля при будь-якому розташуванні багатосмугових шин діє на широку грань, тому:

$$W_n = \frac{b^2 h}{6} = \frac{0,8^2 \times 12}{6} = 1,28 \text{ см}^3;$$

$$\sigma_n = \frac{F_n \times l_n^2}{12 \times W_n} = \frac{5,53 \times 0,75^2}{12 \times 1,28} = 0,21 \text{ МПа};$$

$l_n = 0,75 \text{ м}$ – відстань між прокладками;

$$\sigma_{\text{розр.}} = \sigma_{\phi} + \sigma_n = 1,46 + 0,21 = 1,67 \text{ МПа} < 90 \text{ МПа.}$$

Механічна напруга в матеріалі шин не перевищує допустимої.

Розрахункове зусилля для опорних ізоляторів визначають за (4.21)

$$F_{\text{розр.}} = F_{\phi} \times l \times k_h = 249,1 \times 1,5 \times 1 = 373,7.$$

За таблицею 5.7 [7] обираємо ізолятор внутрішньої установки И 4-80 УХЛЗ з мінімальним руйнівним зусиллям на згинання 4 000 Н. Припустиме зусилля для цього ізолятора складає

$$F_{\text{доп}} = 0,6 \times F_{\text{руйн}} = 0,6 \times 4 000 = 2 400 \text{ Н} > 373,7 \text{ Н.}$$

За таблицею 5.8 [7] обираємо опорний ізолятор внутрішньої установки «ІП 10/3150-3000 У2» з мінімальним руйнівним зусиллям на згин 30 кН і допустимим струмом $I_{\text{ном}} = 3150 \text{ А}$.

Прохідний ізолятор перевіряється за струмом (4.23)

$$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}; 2549 \leq 3150.$$

Відповідь. Приймаємо алюмінієві шини АД 31Т перерізом 120×80, опорний ізолятор «И 4 – 80 УХЛ 3» і прохідний «ІП 10/3150-3000 У2».

4.5 Завдання для самостійної роботи

Варіанти завдання для самостійної роботи студентів подані у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдання для самостійної роботи

Варіант	Напруга, кВ	Розрахунковий струм, $I_{\text{розр}}, \text{ А}$	Відстань між фазами, а, м	Відстань між ізоляторами, l, м	Ударний струм КЗ $i_{\text{уд}}, \text{ кА}$	Інтеграл Джоуля, $\text{кА}^2\text{с}$
1	2	3	4	5	6	7
1	6,3	1 000	0,4	1,0	3,5	25
2	10	1 200	0,5	1,2	4,0	30
3	6,3	1 400	0,5	1,3	5,5	35
4	35	100	1,0	1,4	4,0	15
5	6,3	1 800	0,4	1,5	3,5	25
6	10	2 000	0,5	1,6	4,0	30
7	6,3	2 200	0,5	1,7	5,5	35
8	35	800	1,0	1,8	4,0	15
9	6,3	2 600	0,4	1,9	3,5	25
10	10	2 800	0,5	2,0	4,0	30
11	6,3	3 000	0,5	2,1	5,5	35
12	35	900	1,0	2,2	4,0	15
13	6,3	1 000	0,4	1,0	10,0	30
14	10	1 200	0,5	1,2	12,5	40

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7
15	6,3	1 400	0,5	1,3	14,8	60
16	35	600	1,0	1,4	8,5	20
17	6,3	1 800	0,4	1,5	10,0	30
18	10	2 000	0,5	1,6	12,5	40
19	6,3	2 200	0,5	1,7	14,8	60
20	35	400	1,0	1,8	8,5	20
21	6,3	2 600	0,4	1,9	10,0	30
22	10	2 800	0,5	2,0	12,5	40
23	6,3	3 000	0,5	2,1	14,8	60
24	35	700	1,0	2,2	8,5	20
25	10	1 400	0,5	1,3	10,0	30

Контрольні запитання до практичного заняття

1. З яких матеріалів виготовляються шини розподільних установок?
2. Якого перерізу шини використовуються найчастіше?
3. Для чого шини фарбують?
4. В які кольори фарбують шини?
5. На якій відстані одна від одної встановлюються прокладки у двосмугових шинах?
6. Як можна вийти за зону резонансних явищ системи шин?
7. Поясніть різницю між шиною заземлення і розподільною шиною?
8. Поясніть призначення збірних шин.
9. У чому полягають основні переваги застосування електротехнічних шин?
10. Поясніть фізичний сенс перевірки шин на електродинамічну стійкість.
11. Поясніть особливості умови вибору шин за припустимим струмом.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 5 ВИБІР ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ

5.1 Загальні відомості

Для розширення меж вимірювання приладів змінного струму застосовують вимірювальні трансформатори струму і напруги. Ці трансформатори відокремлюють кола високої напруги від кіл вимірювання, що забезпечує безпеку обслуговування приладів і спрощує ізоляцію струмопровідних частин. Вмикання вимірювальних трансформаторів дає можливість користуватися стандартними амперметрами з номінальним значенням 5 або 1 ампер і вольтметрами з номінальним значенням 100 вольт. Такі трансформатори застосовуються також в колах захисних реле.

Трансформатори струму і напруги застосовують, по-перше, для ізоляції вимірювальних приладів і апаратів автоматичного захисту від кола високої напруги, що забезпечує безпеку вимірювання, і, по-друге, для розширення меж вимірювання вимірювальних приладів.

Трансформатори напруги застосовують для включення вольтметрів, частотомірів і кіл напруги інших вимірювальних приладів (ватметрів, лічильників, фазометрів) і реле, трансформатори струму – для вмикання амперметрів і кіл струму вимірювальних приладів і реле.

5.2 Вибір трансформаторів струму

Трансформатори струму (ТС) вибирають:

– за напругою установки

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}; \quad (5.1)$$

– за струмом

$$I_{роб} \leq I_{ном}, \quad I_{макс} \leq I_{ном}. \quad (5.2)$$

Номінальний струм ТС $I_{ном}$ має бути якомога ближчим до робочого струму установки $I_{роб}$, оскільки недовантаження первинної обмотки призводить до збільшення погрішностей;

– за конструкцією і класом точності;

– за електродинамічною стійкістю

$$i_{уд} \leq k_{ед} \sqrt{2} I_{ном}, \quad i_{уд} \leq i_{дин}, \quad (5.3)$$

де $i_{уд}$ – ударний струм КЗ за розрахунком;

$k_{ед}$ – кратність електродинамічної стійкості за каталогом;

$I_{ном}$ – номінальний первинний струм трансформатора струму;

$i_{дин}$ – струм електродинамічної стійкості.

Електродинамічна стійкість шинних трансформаторів струму визначається стійкістю самих шин розподільної установки, внаслідок цього такі трансформатори за цією умовою не перевіряються;

– за термічною стійкістю:

$$B_k \leq (k_T I_{ном})^2 \times t_{тер}; \quad B_k \leq I_{тер}^2 \times t_{тер}, \quad (5.4)$$

де B_k – тепловий імпульс за розрахунком;

k_T – кратність термічної стійкості за каталогом;

$t_{тер}$ – час термічної стійкості за каталогом;

$I_{тер}$ – струм термічної стійкості;

– за вторинним навантаженням

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (5.5)$$

де Z_2 – вторинне навантаження трансформатора струму;

$Z_{2ном}$ – номінальне допустиме навантаження трансформатора струму у вибраному класі точності (Ом).

Індуктивний опір струмових кіл невеликий, тому $Z_2 \approx R_2$. Вторинне навантаження складається з опору приладів $r_{прил}$, з'єднувальних проводів $r_{пр}$ і перехідного опору контактів r_k :

$$r_2 \approx r_{прил} + r_{пр} + r_k. \quad (5.6)$$

Опір приладів визначається за виразом

$$r_{прил} = \frac{S_{прил}}{I_2^2}, \quad (5.7)$$

де $S_{прил}$ – потужність, споживана приладами;

I_2 – вторинний номінальний струм приладу.

Опір контактів приймається 0,05 Ом при двох-трьох приладах і 0,1 Ом при більшому числі приладів. Опір з'єднувальних проводів залежить від їх довжини і перерізу. Щоб трансформатор струму працював у вибраному класі точності, необхідно витримати умову

$$r_{прил} + r_{пр} + r_k \leq Z_{2ном},$$

звідки

$$r_{прил} = Z_{2ном} - r_{пр} - r_k. \quad (5.8)$$

Знаючи $r_{пр}$, можна визначити переріз з'єднувальних проводів:

$$q = \frac{\rho \times l_{розр}}{r_{пр}}, \quad (5.9)$$

де ρ – питомий опір матеріалу проводу. Проводи з мідними жилами ($\rho = 0,0175$) застосовуються у вторинних колах основного і допоміжного устаткування потужних електростанцій з агрегатами 100 МВт і більше, а також на підстанціях з вищою напругою 220 кВ і вище. В решті випадків у вторинних колах застосовуються проводи з алюмінієвими жилами ($\rho = 0,0283$);

$l_{\text{розр}}$ – розрахункова довжина проводів, залежна від схеми з'єднання трансформаторів струму.

Довжину з'єднувальних проводів від трансформатора струму до приладів (в один кінець) можна прийняти для різних приєднань приблизно рівною, м:

- всі кола головного розподільного пристрою (ГРП) 6 – 10 кВ, окрім ліній до споживачів 40–60;
- кола генераторної напруги блокових електростанцій 20–40;
- лінії 6–10 кВ до споживачів 4 – 6.

Всі кола РУ:

- | | |
|--------------|----------|
| – 35 кВ | 60–75; |
| – 110 кВ | 75–100; |
| – 220 кВ | 100–150; |
| – 330–500 кВ | 150–175. |

Синхронні компенсатори	25–40.
------------------------	--------

Для підстанцій вказані довжини знижують на 15–20 %.

Як з'єднувальні провідники застосовують багатожильні контрольні кабелі з паперовою, гумовою, поліхлорвініловою або поліетиленовою ізоляцією у свинцевій, гумовій, поліхлорвініловій або спеціальній теплостійкій оболонці. За умовами міцності переріз не повинен бути менше ніж 4 мм² для алюмінієвих жил і 2,5 мм² для мідних жил (див. ПУЕ [4] § 3.4.4). Переріз більше ніж 6 мм² зазвичай не застосовується.

5.3 Вибір трансформаторів напруги

Трансформатори напруги вибираються:

– за напругою установки

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{н}}; \quad (5.10)$$

– за конструкцією і схемою з'єднання обмоток;

– за класом точності;

– за вторинним навантаженням

$$S_{2\Sigma} \leq S_{\text{ном}}, \quad (5.11)$$

де $S_{\text{ном}}$ – номінальна потужність у вибраному класі точності.

Водночас варто мати на увазі, що для однофазних трансформаторів, з'єднаних в зірку, необхідно узяти сумарну потужність всіх трьох фаз, а для з'єднаних за схемою відкритого трикутника – подвоєну потужність одного трансформатора;

$S_{2\Sigma}$ – навантаження всіх вимірювальних приладів і реле, приєднаних до трансформатора напруги, ВА.

Для спрощення розрахунків навантаження приладів можна не розділяти по фазах, тоді

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(S_{\text{прил}} \cos \varphi)^2 + (S_{\text{прил}} \sin \varphi_{\text{приб}})^2} = \sqrt{P_{\text{прил}}^2 + Q_{\text{прил}}^2}. \quad (5.12)$$

Якщо вторинне навантаження перевищує номінальну потужність у вибраному класі точності, то встановлюють другий трансформатор напруги і частину приладів приєднують до нього.

Переріз проводів в колах трансформаторів напруги визначається за допустимою втратою напруги. Згідно з ПУЕ втрата напруги від трансформаторів напруги до розрахункових лічильників повинна бути не більше 0,5 %, а до щитових вимірювальних приладів – не більше 1,5 % при нормальному навантаженні.

Контрольні запитання до практичного заняття

1. Пояснити призначення трансформаторів струму.
2. Пояснити призначення трансформаторів напруги.
3. За якими критеріями вибираються трансформатори струму?
4. За якими критеріями перевіряються трансформатори струму?
5. За якими критеріями вибираються трансформатори напруги?
6. За якими критеріями перевіряються трансформатори напруги?
7. Який мінімальний переріз провідників допускається у колі трансформаторів напруги.
8. Наведіть приклади і надайте пояснення основних схем вмикання трансформаторів струму.
9. Наведіть приклади і надайте пояснення основних схем вмикання трансформаторів напруги.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 6 РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЕННЯ ПОНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

6.1 Загальні відомості

Згідно з Правилами улаштування електроустановок [3] мережі напругою 110 кВ і вище належать до мереж з великими струмами замикання на землю (≥ 500 А) і працюють з ефективно заземленою нейтраллю. Для таких мереж опір пристрою заземлення повинен бути ≤ 0.5 Ом.

Розрахунок пристрою заземлення виконуємо згідно з методикою наведеною в [7].

Опір сітки заземлення з вертикальними електродами визначається за формулою:

$$R = 0,443 \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_2}{L + n \times l_e}, \quad (6.1)$$

$$\text{де } g = \frac{2H}{\sqrt{S} + n l_e}; \quad l_e = l_1 + \frac{l_2 \rho_1}{\rho_2};$$

ρ_1 – питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом · м;

ρ_2 – питомий опір нижнього шару ґрунту, Ом · м;

L – сумарна довжина горизонтальних смуг, м;

l_e – еквівалентна довжина вертикального електрода, м (рис. 6.1);

n – кількість вертикальних електродів, шт.;

S – площа сітки, м².

Після розрахунку пристрою заземлення рекомендується врахувати опір $R_{\text{пр}}$ природних заземлювачів (система трос – опора, оболонки кабелів, обсадних труб свердловин і т. д). Його значення можна прийняти рівним 2–4 Ом.

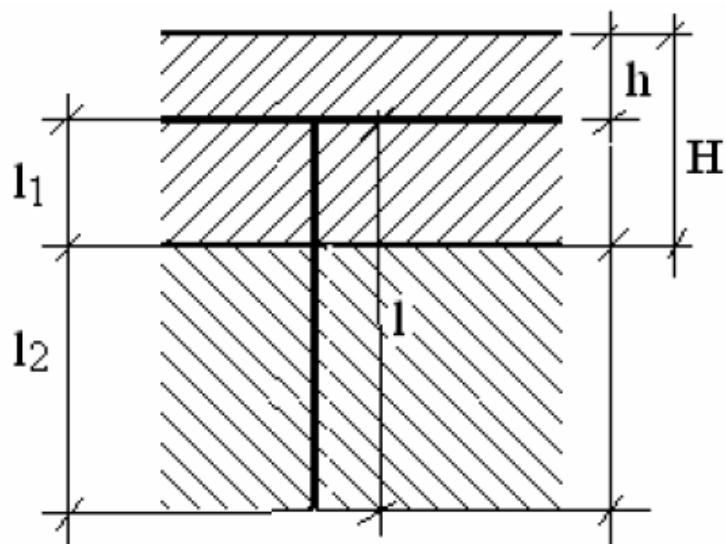


Рисунок 6.1 – Схема, яка пояснює розрахунок еквівалентної довжини вертикального провідника у двошаровому ґрунті

Загальний опір заземлення визначають за формулою:

$$R_z = \frac{R \times R_e}{R + R_e} . \quad (6.2)$$

Ця величина має бути $\leq 0,5$ Ом (для мережі з ефективно заземленою нейтраллю).

Якщо вказана умова не виконується, необхідно виконати розрахунок заземлення за напругою дотику $U_{\text{дот}}$

$$U_{\text{дот}} = I_z R_z \alpha_{\text{дот}} \beta_{\text{дот}} , \quad (6.3)$$

де I_z – струм однофазного короткого замикання, А;

$$\alpha_{\text{дот}} = M \left(\frac{\alpha \sqrt{S}}{l \times L} \right)^{0,45} , \quad (6.4)$$

$a = P/n$ – відстань між вертикальними електродами, м;

P – периметр сітки, м;

M – функція відношення ρ_1/ρ_2 (сезонний коефіцієнт, див. таблицю 6.1);

$$\beta_{\text{ом}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + 1,5\rho_{\text{с}}}, \quad (6.5)$$

$R_{\text{л}} = 1\,000$ Ом – розрахунковий опір тіла людини;

$\rho_{\text{с}}$ – питомий опір верхнього шару землі, Ом · м.

Таблиця 6.1 – Параметр M

ρ_2/ρ_1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
M	0,37	0,40	0,43	0,46	0,48	0,50	0,60	0,66	0,72	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81	0,82

Розрахункове значення напруги дотику не повинне перевищувати значення припустимої напруги дотику (див. таблицю 6.2).

Таблиця 6.2 – Припустима напруга дотику

Тривалість дії струму, t , с	до 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Більше 1,0 до 5,0
Припустима напруга $U_{\text{прип}}$, В	500	400	200	130	100	65

Час дії струму залежить від часу спрацювання захисту і вимикача, який вимикає коротке замикання (рекомендується для мережі з ефективно заземленою нейтраллю прийняти $t = 0,2$ с).

Потенціал пристрою заземлення ϕ_3 не повинен перевищувати 10 кВ

$$\phi_3 = I_3 \times R_3. \quad (6.6)$$

Вертикальні електроди розташовують по периметру підстанції, їх кількість приймають такою, щоб відстань між ними була більшою від їхньої довжини.

6.2 Приклад розрахунку

Розрахувати пристрій заземлення для підстанції 110/10 кВ за таких умов:
 $S = 4\,500 \text{ м}^2$ ($75 \times 60 \text{ м}$); $l = 8 \text{ м}$; $n = 30$ шт; $H = 2 \text{ м}$; $h = 0,5 \text{ м}$; $\rho_1 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $I_3 = 4\,000 \text{ А}$.

План пристрою заземлення показаний на рисунку 6.2. Він виконаний горизонтальними й вертикальними електродами (показані не заштрихованими колами). Сумарна довжина горизонтальних електродів складає

$$L = 3 \times 75 + 5 \times 60 = 525 \text{ м.}$$

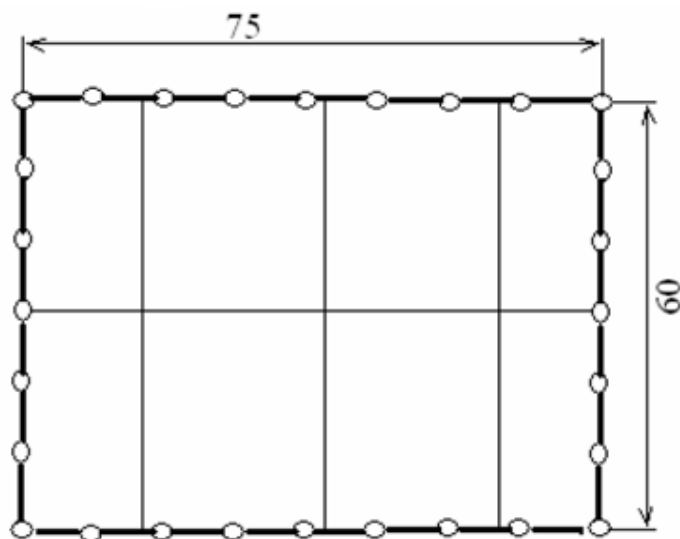


Рисунок 6.2 – План пристрою заземлення підстанції

Визначаємо опір пристрою заземлення згідно з (6.1)

$$R = 0,443 \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_2}{L + nl_e} = 0,443 \frac{100}{\sqrt{4500}} \left(\frac{120}{100} \right)^{0,0116} + \frac{100}{525 + 30 \times 9,3} = 0,784 \text{ Ом,}$$

$$\text{де } l_e = l_1 + \frac{l_2 \rho_1}{\rho_2} = 1,5 + \frac{6,5 \times 120}{100} = 9,3 \text{ м;}$$

$$g = \frac{2H}{\sqrt{S} + nl} = \frac{2 \times 2}{\sqrt{4500} + 30 \times 9,3} = 0,0116.$$

Як видно з розрахунку опір штучного пристрою заземлення не відповідає нормі (0,5 Ом). Врахуємо опір природних заземлювачів. Такими будемо врахати систему «троси – опори», опір яких складає зазвичай 2–4 Ом. Тоді загальний опір заземлення з урахуванням природних заземлювачів буде

$$R_3 = \frac{RR_e}{R + R_e} = \frac{0,784 \times 3}{0,784 + 3} = 0,62 \geq 0,5 \text{ Ом.}$$

Норма опору не виконується і в цьому разі необхідно перевірити пристрій заземлення за напругою дотику.

$$\alpha_{\text{dot}} = M \left(\frac{a\sqrt{S}}{IL} \right)^{0,45} = 0,5 \left(\frac{9,0\sqrt{4500}}{8 \times 525} \right)^{0,45} = 0,089,$$

де $a = \frac{P}{n} = \frac{270}{30} = 9,0$ м; сезонний коефіцієнт $M = 0,5$.

Коефіцієнт і напруга дотику

$$\beta_{\text{dot}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + 1,5\rho_c} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \times 120} = 0,847,$$

$$U_{\text{дот}} = I_3 \times R_3 \times \alpha_{\text{дот}} \times \beta_{\text{дот}} = 4\,000 \times 0,62 \times 0,089 \times 0,847 = 190 \text{ В.}$$

Припустиме значення напруги дотику при $t = 0,2$ с складає 400 В. Розрахункове значення нижче нормативного – умова захисту виконується.

Потенціал пристрою заземлення

$$\varphi_3 = I_3 \cdot R_3 = 4\,000 \times 0,62 = 2\,520 \text{ В} < 10\,000 \text{ В.}$$

Пристрій заземлення не відповідає вимогам першої норми (за опором), але розрахунок за другою нормою (напругою дотику) вказує на те, що він відповідає умовам безпеки при струмові короткого замикання 4 000 А.

6.3 Завдання для самостійної роботи

Варіанти завдання для самостійної роботи студентів подані у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Варіанти завдання для самостійної роботи

Варіант	Розміри підстанції, м	Товщина верхнього шару ґрунту, м	Питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом×м	Питомий опір нижнього шару ґрунту, Ом×м	Струм короткого замикання, А	Довжина верхніх електродів, м	Глибина закладення горизонтальних смуг, м
1	35 × 45	1,5	50	150	1 500	5	0,5
2	35 × 50	1,6	60	140	1 800	8	0,6
3	35 × 55	1,7	70	130	2 000	6	0,7
4	35 × 60	1,8	80	120	2 200	4	0,8
5		1,9	85	110	2 400	5	0,5
6		2,0	90	100	2 600	8	0,6
7		2,1	100	90	2 800	6	0,7
8		2,2	110	80	3 000	4	0,8
9		2,3	120	70	3 200	5	0,5
10		1,5	130	60	3 400	6	0,6
11		1,6	140	50	3 600	7	0,7
12		1,7	150	85	3 800	8	0,8
13		1,8	50	150	3 800	4	0,5
14		1,9	60	140	3 600	5	0,6
15		2,0	70	130	3 400	6	0,7
16		2,1	8	120	3 200	7	0,8
17		2,2	0	110	3 000	8	0,5
18		2,3	90	100	2 600	4	0,6
19		1,5	100	90	2 400	5	0,7
20		1,6	110	80	2 200	6	0,8
21		1,7	120	70	2 000	7	0,5
22		1,8	130	60	1 800	8	0,6
23		1,9	140	50	1 500	4	0,7
24		1,5	150	85	2 800	5	0,6

Контрольні запитання до практичного заняття

1. Пояснити призначення пристроїв заземлення.
2. За якими критеріями виконується розрахунок заземлення?
3. Який опір повинне мати заземлення підстанції 110 кВ?
4. Від чого залежить допустима величина напруги доторкування?

ПРАКТИЧНА РОБОТА 7 РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

7.1 Методика розрахунку

Розрахувати блискавкозахист – це значить визначити тип захисту, його зону і параметри [8].

За типом блискавкозахист може бути:

- одностержневим (1С);
- двостержневим однакової або різної висоти (2С);
- багатостержневим;
- одиночним тросовим (1Т);
- багатотросовим (2Т).

За ступенем надійності захисту розрізняють два типи зон:

А – ступінь надійності захисту $\geq 99,5 \%$;

Б – ступінь надійності захисту 95–99,5 %.

Параметри блискавкозахисту (табл. 7.1):

h – повна висота стержневого блискавковідводу, м;

h_0 – висота вершини конуса стержневого блискавковідводу, м;

h_x – висота споруди, що захищається, м;

h_m – висота стержневого приймача блискавки, м;

h_a – активна висота блискавковідводу, м;

r_0, r_x – радіуси захисту (м) на рівні землі і на висоті споруди, що захищається;

h_c – висота середньої частини подвійного стержневого блискавковідводу, м;

$2r_c, 2r_d$ – ширина середньої частини зони подвійного стержневого блискавковідводу на рівні землі і на висоті об'єкта, що захищається, м;

α – кут захисту (між вертикаллю і твірною), град;

L – відстань між двома стержневими громовідводами, м;

a – довжина прольоту між опорами троса, м;

$h_{оп}$ – висота опори троса, м;

$r_x + r'_x$ – ширина зони тросового блискавковідводу споруди на рівні що захищається, м;

$a + 2r_{cx}$ – довжина зони подвійного тросового блискавковідводу на рівні споруди, що захищається, м;

$a + 2r_c$ – довжина зони подвійного тросового блискавковідводу на рівні землі, м.

Розрахунок очікуваної кількості уражень (N) блискавкою в рік виконують за формулами:

– для зосереджених будівель і споруд (димарі, вежі, башти)

$$N = 9\pi \times h_x^2 \times n \times 10^{-6}, \quad (7.1)$$

де h_x – найбільша висота будівлі або споруди, м;

n – середньорічне число ударів блискавки в 1 км² земної поверхні в місці знаходження будівлі або споруди (тобто питома густина ударів блискавки в землю), 1/(км²рік), визначається за таблицею 7.2;

– для будівель і споруд прямокутної форми

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \times h_x^2] \times n \times 10^{-6} \quad (7.2)$$

де A і B – довжина і ширина будівлі або споруди, м.

Примітка. Якщо будівля і споруда мають складну конфігурацію, то A і B – це сторони прямокутника, в який вписується на плані об'єкт, що захищається.

Таблиця 7.1 – Розрахункові формули блискавковідводів при $h \leq 150$ м [1]

Зона А	Зона В
1	2
Одиночні стержньові блискавковідводи (рис. 7.1)	
$h_0 = 0,85 h$ $r_0 = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) \times h$ $r_x = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) \times (h - 1,2h_x)$	$h_0 = 0,92 h$ $r_0 = 1,5 h$ $r_o = 1,5 (h - 1,1 h) \times h_x$
Подвійні стержньові блискавковідводи однакової висоти (рис. 7.2)	
При $L < h$ $h_c = h_o$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_0$	
При $h < L < 2h$ $h_c = h_o - (0,17 + 3 \times 10^{-4} h) \times (L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c$	При $h < L < 6h$ $h_c = h_o - 0,14 \times (L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c$
При $2h < L < 4h$ $h_c = h_o - (0,17 + 3 \times 10^{-4} h) \times (L - h)$ $r_c = r_0 \{1 - [0,2 (L - 2h)]/h\}$ $r_{cx} = r_c (h_c - h_x) / h_c$ При $L > 4h$ блискавковідводи розглядають як одиночні	При $L > 6h$ блискавковідводи розглядають як одиночні
Подвійні стержньові блискавковідводи різної висоти (рис. 7.3)	
Габаритні розміри торцевих областей зон захисту $h_{o1}, h_{o2}, r_{o1}, r_{o2}, r_{x1}, r_{x2}$ визначають як для одиночних стержньових блискавковідводів. Габаритні розміри внутрішньої області зони захисту визначають за формулами $r_c = 0,5 (r_{o1} + r_{o2})$; $h_c = 0,5 (h_{c1} + h_{c2})$; $r_x = (h_c - h_x) r_c / h_c$. Значення h_{c1} і h_{c2} визначають як для подвійних стержньових блискавковідводів однакової висоти	
Зона А	Зона В
Багатостержньові блискавковідводи (рис. 7.4)	
Зони захисту будують за допомогою попарно узятих сусідніх стержньових блискавковідводів. Основною умовою захищеності одного або декількох об'єктів висотою з надійністю зон А або В є $r_{cx} > 0$	

Продовження таблиці 7.1

1	2
Одиночні тросові блискавковідводи (рис. 7.5)	
$h_0 = 0,85 h$ $r_0 = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h)$ $r_x = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times (h - 1,2 h_x)$	$h_0 = 0,92 h$ $r_0 = 1,7 h$ $r_x = 1,7(h - 1,1 h_x)$
Подвійні тросові блискавковідводи однакової висоти (рис. 7.6)	
При $L \leq h$ $h_c = h_o$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_o$	
Подвійні тросові блискавковідводи різної висоти (рис. 7.7)	
Значення $h_{o1}, h_{o2}, r_{o1}, r_{o2}, r_{x1}, r_{x2}$ визначають за формулами одиночних тросових блискавковідводів. Для визначення розмірів r_c і h_c використовують формули $r_c = 0,5 (r_{o1} + r_{o2})$; $h_c = 0,5 (h_{c1} + h_{c2})$. Значення $h_{c1}, h_{c2}, r'_{x1}, r'_{x2}, r'_{cx}$ обчислюють за вказаними формулами подвійного тросового блискавковідводу.	

Примітка. Для одиночного тросового блискавковідводу h – це висота троса в середині прольоту. З урахуванням провисання троса перерізом 35–50 мм² при відомій висоті опор ($h_{оп}$) і довжині прольоту (a) висоту троса (в метрах) визначають за формулами:

$$h = h_{оп} - 2 \text{ – при } a \leq 120 \text{ м;} \quad (7.3)$$

$$h = h_{оп} - 3 \text{ – при } 120 < a \leq 150 \text{ м.}$$

Таблиця 7.2 – Залежність $F(t_{ср})$

$t_{ср}$, год/рік	10–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101 і більше
$n, 1/(км^2 \cdot \text{рік})$	1	2	4	5,5	7	8,5

Примітка. $t_{ср}$ – середньорічну тривалість гроз, годин/рік визначають за картами, складеними на підставі метеозведень за 10 років [8].

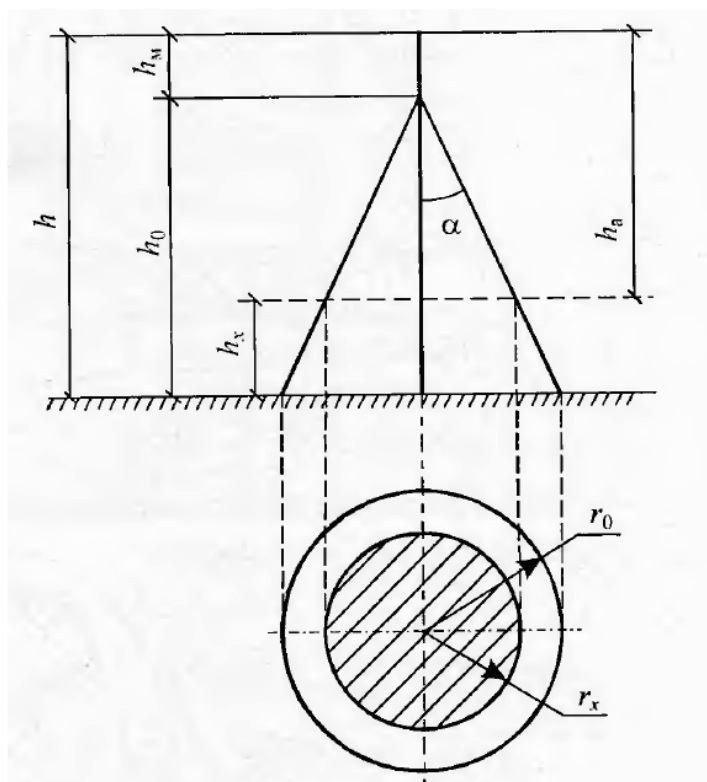


Рисунок 7.1 – Зона захисту одиночного блискавковідводу

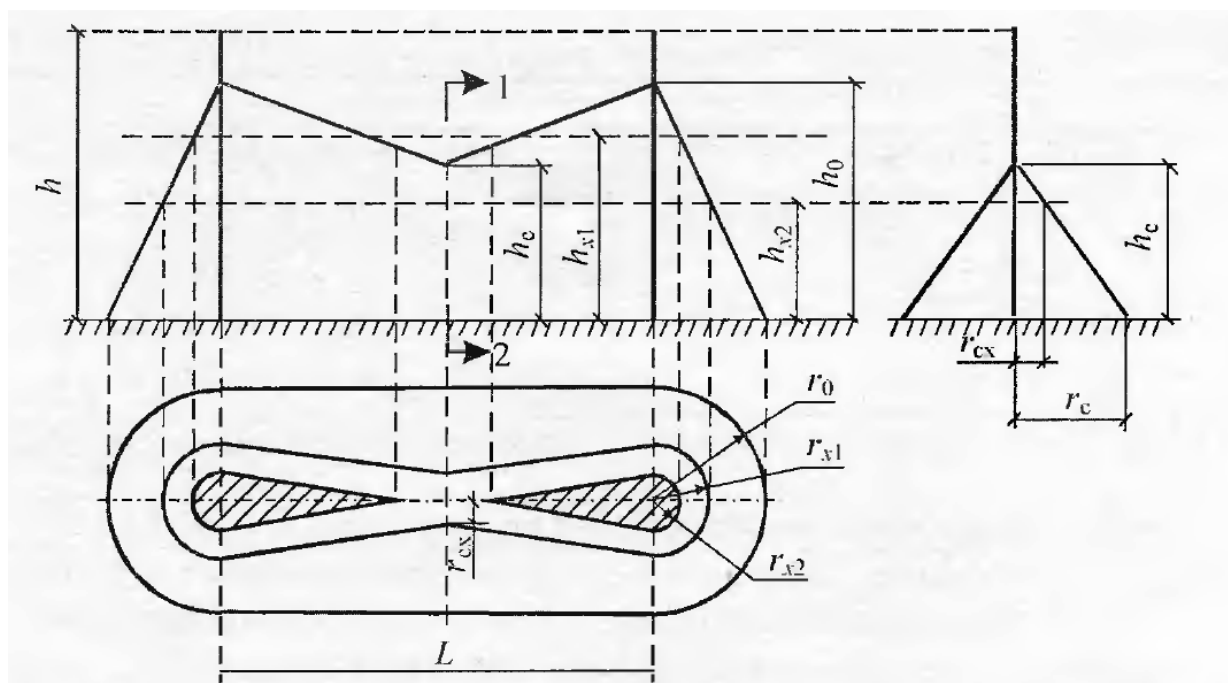


Рисунок 7.2 – Зона захисту подвійного стержньового блискавковідводу
рівної довжини

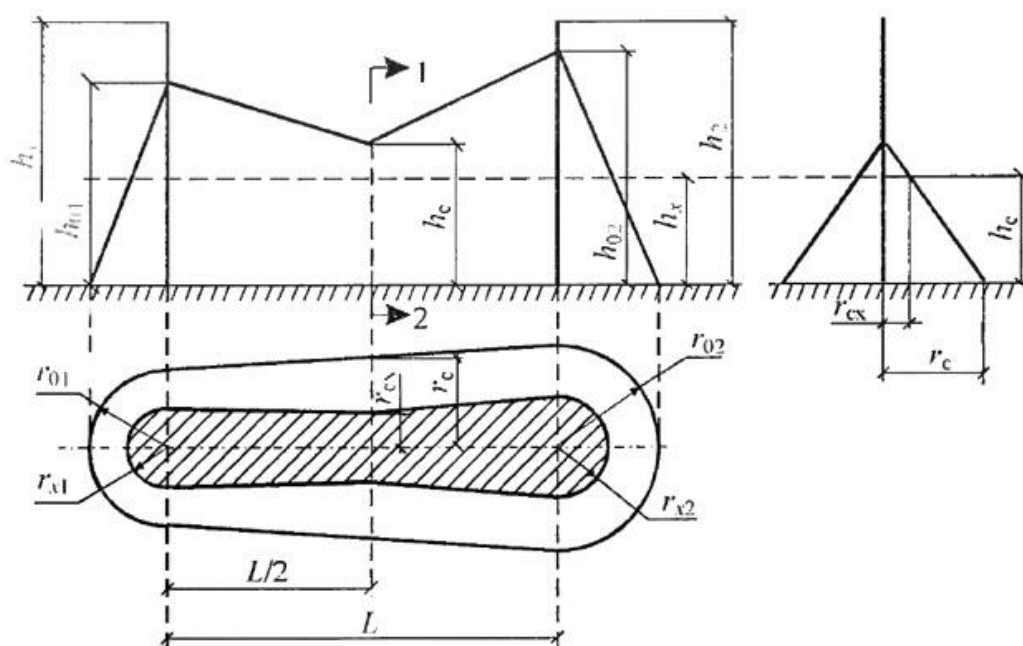


Рисунок 7.3 – Зона захисту подвійного стержньового блискавквідводу
різної довжини

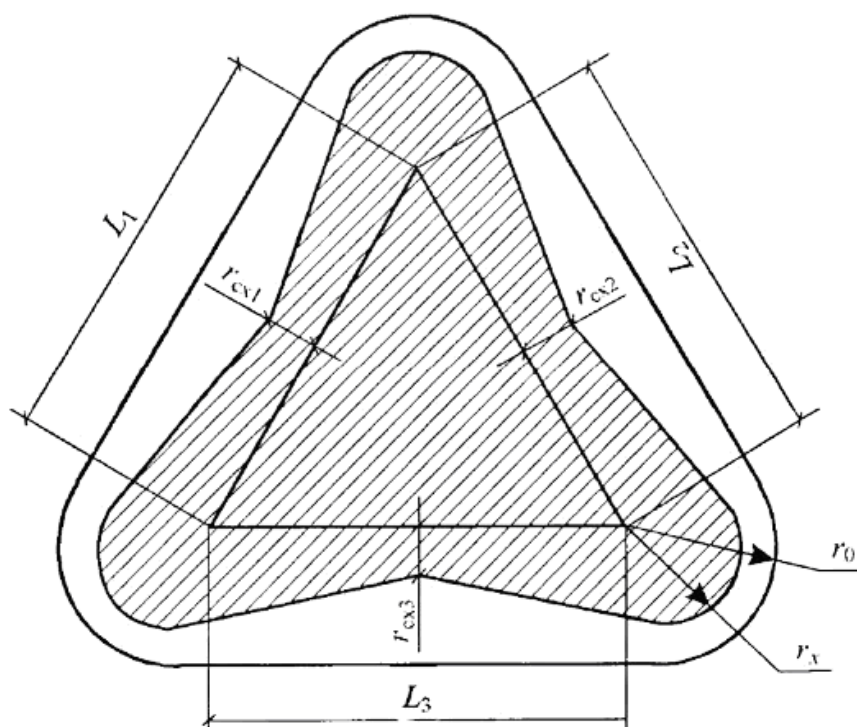


Рисунок 7.4 – Зона захисту (в плані) багатократного стержньового
блискавквідводу

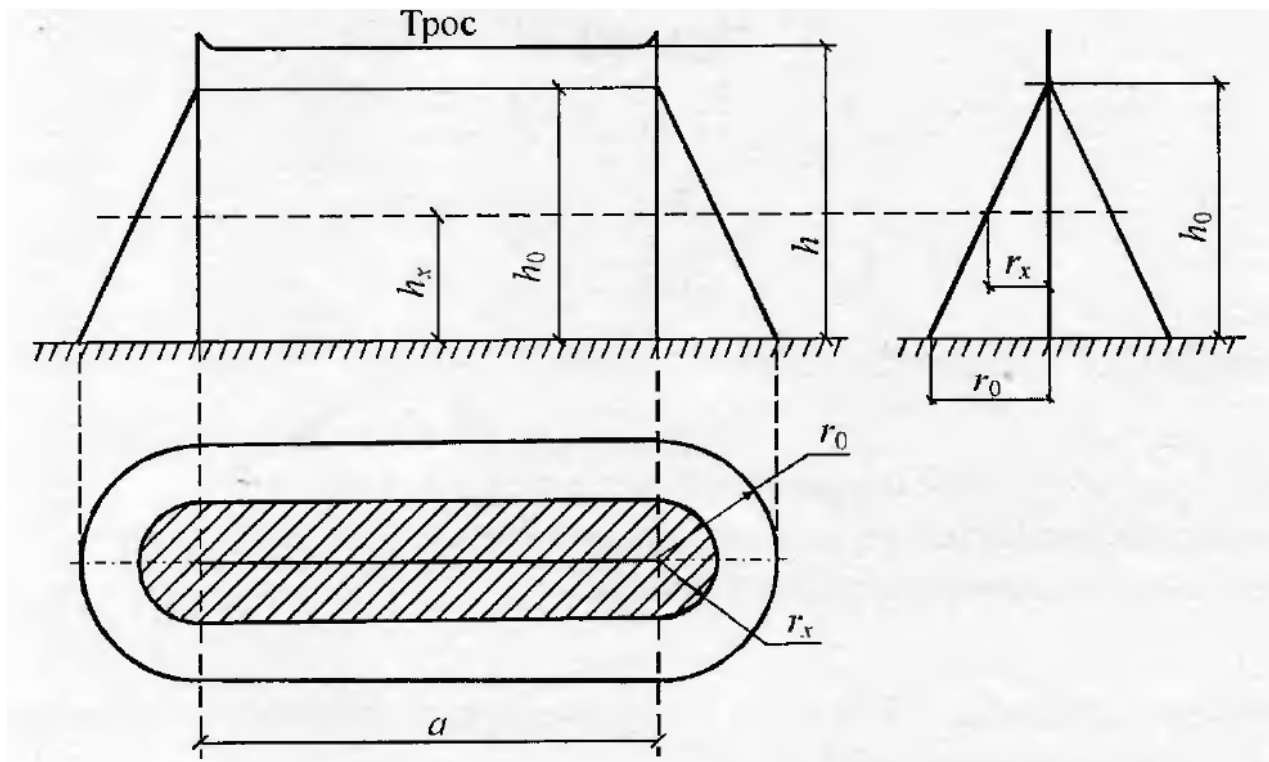


Рисунок 7.5 – Зона захисту одиночного тросового блискавковідводу

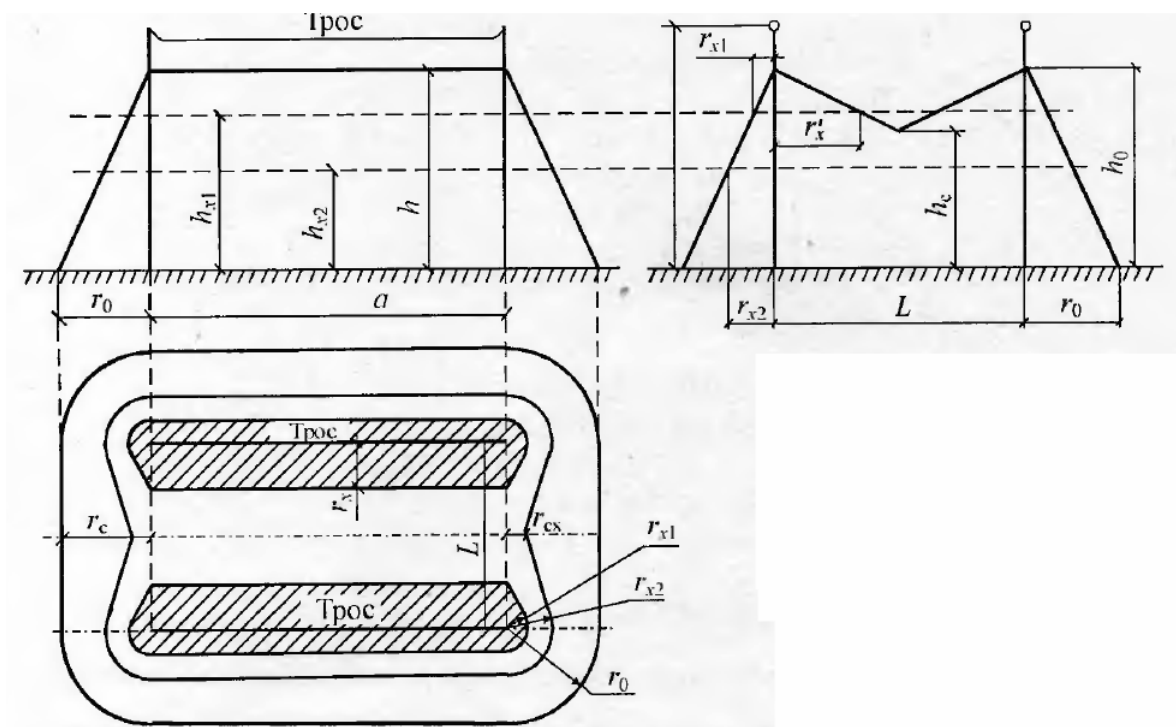


Рисунок 7.6 – Зона захисту подвійного тросового блискавковідводу

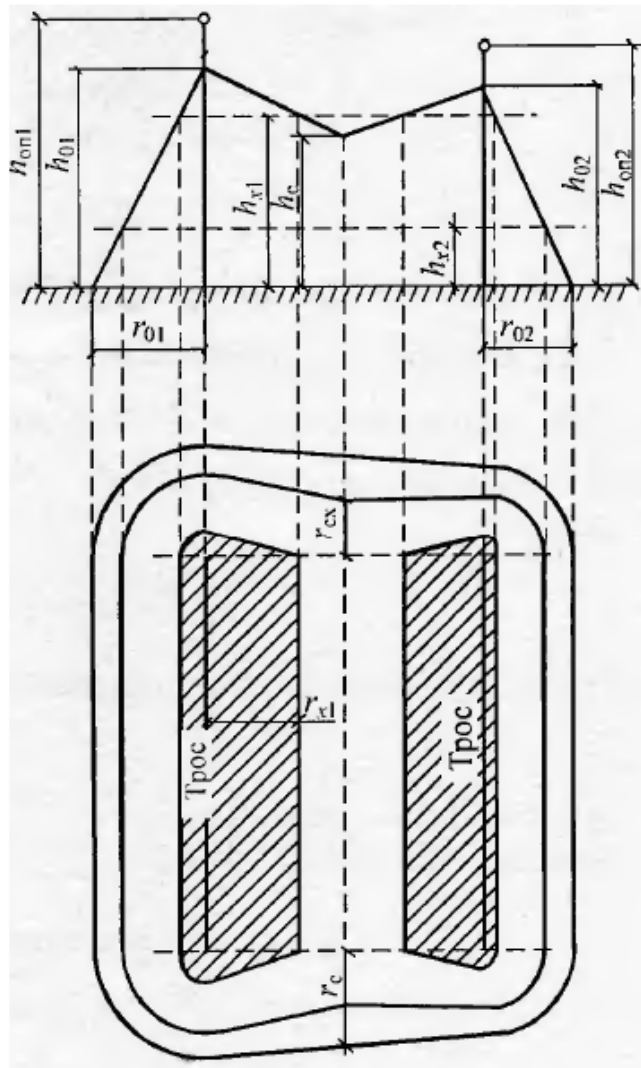


Рисунок 7.7 – Зона захисту двох тросових блискавковідводів різної висоти

7.2 Приклади розрахунку

7.2.1 Одностержньовий захист

Дано: $h = 50$ м; $h_x = 20$ м; $B = 20$ м; $n = 61/(\text{км}^2\text{рік})$. Тип блискавкозахисту – одностержньовий.

Визначити:

- параметри зон блискавкозахисту і зобразити їх;
- габаритні розміри об'єкта, що захищається;
- можливість ураження об'єкта.

Рішення

1. За формулами (табл. 7.1) для одиночного стержньового блискавководу визначаються параметри блискавкозахисту для зон.

В масштабі зображуються зони А і Б (рис. 8.8).

Зона А:

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \times 50 = 42,5 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) h = (1,1 - 2 \times 10^{-3} \times 50) \times 50 = 50 \text{ м};$$

$$r_x = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) (h - 1,2 h_x) = (1,1 - 2 \times 10^{-3} \times 50) \times (50 - 1,2 \times 50) = 26 \text{ м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 42,5 = 7,5 \text{ м};$$

$$h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30 \text{ м};$$

$$\alpha^{(A)} = \arctg (r_0/h_0) = \arctg (50/42,5) = 49,6^\circ.$$

Зона Б:

$$h_0 = 0,92 h = 0,92 \times 50 = 46 \text{ м};$$

$$r_0 = 1,5 \times h = 1,5 \times 50 = 75 \text{ м};$$

$$r_x = 1,5 (h - 1,1 h_x) = 1,5 \times (50 - 1,1 \times 20) = 42 \text{ м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 46 = 4 \text{ м};$$

$$h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30 \text{ м};$$

$$\alpha^{(B)} = \arctg (r_0/h_0) = \arctg (75/46) = 58^\circ.$$

2. Визначаються габаритні розміри об'єкта, що захищається, в кожній зоні блискавкозахисту. Для цього на відстані $B/2$ від середньої лінії паралельно проводиться лінія до перетину з колом r_x (рис. 7.8).

Зона А:

$$\varphi_{(A)} = \arcsin B/2 r^{(A)}_x = \arcsin 20/2 \times 26 = 22,6^\circ;$$

$$\cos \varphi^{(A)} = \cos 22,6^\circ = 0,92;$$

$$A^{(A)} = 2 r^{(A)}_x \cos \varphi^{(A)} = 2 \times 26 \times 0,92 = 48 \text{ м};$$

$$A \times B \times H = 48 \times 20 \times 20 \text{ м}.$$

Зона Б:

$$\varphi^{(B)} = \arcsin (B/2 r^{(B)}_x) = \arcsin (20/2 \times 42) = 13,8^\circ;$$

$$\cos \varphi^{(B)} = \cos 13,8^\circ = 0,97;$$

$$A^{(B)} = 2 r^{(B)}_x \cos \varphi^{(B)} = 2 \times 42 \times 0,97 = 81,6 \text{ м}; \text{ Приймаємо } A = 81 \text{ м}.$$

$$A \times B \times H = 81 \times 20 \times 20 \text{ м.}$$

3. Визначається можливість ураження об'єкта, що захищається, в зонах за відсутності блискавкозахисту

$$N_A = [(B + 6h_x) \times (A^{(A)} + 6h_x) - 7,7h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(20 + 6 \times 20) \times (48 + 6 \times 20) - 7,7 \times 20^2] \times 6 \times 10^{-6} = 12,3 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

$$N_B = [(B + 6h_x) \times (A^{(B)} + 6h_x) - 7,7h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(20 + 6 \times 20)(81 + 6 \times 20) - 7,7 \times 20^2] \times 6 \times 10^{-6} = 15 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

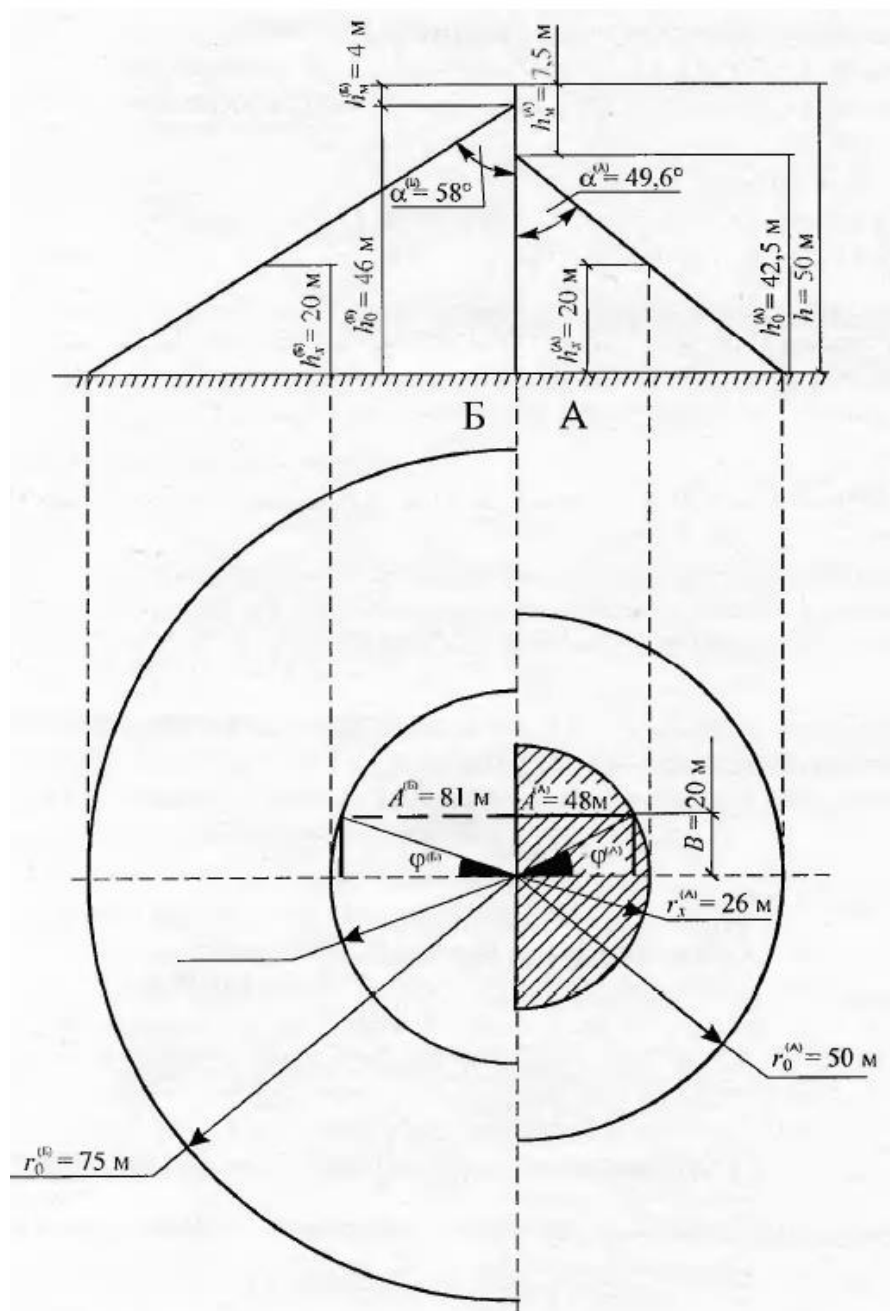


Рисунок 7.8 – Зона захисту одиночного стержньового блискавковідводу, $h = 50 \text{ м}$

В зоні захисту Б кількість уражень в рік більша.

Відповідь. Параметри зон блискавкозахисту вказані на рисунку 8.8.

Для зони А: $A \times B \times H = 48 \times 20 \times 20$ м.; $N_A = 12,3 \times 10^{-2}$ уражень.

Для зони Б: $A \times B \times H = 81 \times 20 \times 20$ м.; $N_B = 12,3 \times 10^{-2}$ уражень.

7.2.2 Подвійний тросовий захист

Дано. Тип захисту – подвійний тросовий $h_{оп1} = h_{оп2} = 22$ м; $h_x = 10$ м;

$L = 25$ м; $a = 40$ м; $n = 7$ 1/(км²тод).

Необхідно визначити:

- параметри зони А захисту від ударів блискавки і зобразити її;
- габаритні розміри об'єкта, що захищається;
- можливу ураження об'єкта.

Рішення

1. За формулами (таблиця 7.1) для подвійних тросових блискавковідводів однакової висоти визначаються параметри захисту для зони А.

В масштабі зона А зображується на плані (рисунок 7.9), оскільки $a < 120$ м, $h = h_{оп} - 2 = 22 - 2 = 20$ м;

$$h_o = 0,85 h = 0,85 \times 20 = 17 \text{ м};$$

$$r_o = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times h = (1,35 - 25 \times 10^{-4} \times 20) \times 20 = 26 \text{ м};$$

$$h_c = h_o - (0,14 + 5 \times 10^{-4} h) (L - h) = \\ = 17 - (0,14 + 5 \times 10^{-4} \times 20) (25 - 20) = 16,05 \text{ м}$$

$$r_c = r_o = 26 \text{ м};$$

$$r_{cx} = r_o (h_c - h_x) / h_c = 26 \times (16,05 - 10) / 16,05 = 9,8 \text{ м};$$

$$r_x = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times (h - 1,2 h_x) = \\ = (1,35 - 25 \times 10^{-4} \times 20) \times (20 - 1,2 \times 10) = 10,4 \text{ м}.$$

Примітка. При перетині верхньої відмітки споруди з лінією в прольоті визначається r'_x

$$\alpha^{(B)} = \arctg (r_o / h_o) = \arctg (26/17) = 56,8^\circ.$$

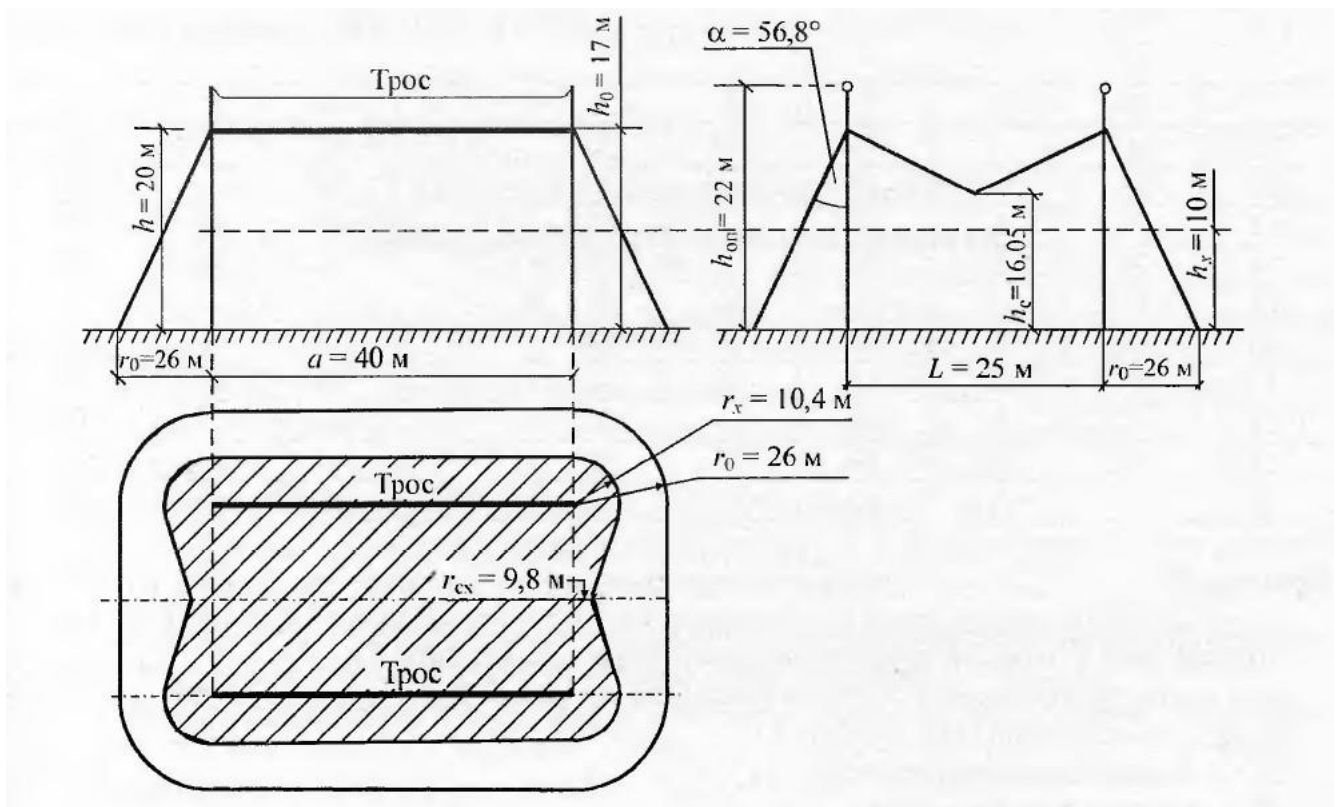


Рисунок 7.9 – Зона А захисту подвійного тросового блискавковідводу
однакової висоти

2. Визначаються максимальні габарити споруди, що захищається, за
рисунком 7.9:

$$A = a + 2 r_{cx} = 40 + 2 \times 9,8 = 59,6 \text{ м.}$$

Приймається ціле значення $A = 59 \text{ м.}$

$$B = L + 2 r_x = 25 + 2 \times 10,4 = 45,8 \text{ м.}$$

Приймається ціле значення $B = 45 \text{ м.}$

$$A \times B \times H = 59 \times 45 \times 10.$$

3. Визначається можливість ураження об'єкта, що захищається, в зоні А
за відсутності захисту.

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \times h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(45 + 6 \times 10)(59 + 6 \times 10) - 7,7 \times 100] \times 7 \times 10^{-6} = 8,2 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

Відповідь. Параметри зони А блискавкозахисту вказані на рисунку 7.9.

$$A \times B \times H = 59 \times 45 \times 10 \text{ м; } N = 8,2 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

7.3 Завдання для самостійної роботи

Варіанти завдання для самостійної роботи наведені у таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Завдання до самостійної роботи

Варіант	Тип блискавкозахисту	Зона	h_x , м	B , м	h_1 , м	h_2 , м	L , м	a , м	$t_{\text{сер.год}}$ год/рік
1	1С	А	20	15	40	–	–	–	110
2	2С	Б	20	20	50	50	50	60	100
3	2С	А	20	20	30	50	40	–	20
4	1Т	Б	15	–	32	–	40	–	30
5	2Т	А	15	–	32	32	20	40	40
6	2Т	Б	15	–	32	22	25	30	90
7	1С	Б	20	15	40	–	–	–	80
8	2С	А	10	12	45	25	50	–	50
9	2С	А	10	12	30	30	45	–	60
10	1Т	А	8	–	22	–	30	–	70
11	2Т	Б	8	–	22	27	30	45	110
12	2Т	Б	8	–	17	17	30	35	70
13	1С	А	12	10	35	–	–	–	100
14	2С	Б	15	15	50	50	35	–	60
15	2С	Б	15	15	50	40	40	–	20
16	1Т	А	16	–	27	–	40	–	50
17	2Т	А	12	–	22	27	35	20	30
18	2Т	Б	12	–	27	27	35	25	80
19	1С	А	25	30	60	–	–	–	40
20	2С	Б	16	20	50	40	50	–	90
21	2С	А	16	20	50	50	40	–	90
22	1Т	А	12	–	27	–	30	–	40
23	2Т	Б	8	–	17	22	25	30	80
24	2Т	Б	8	–	27	27	25	20	30
Примітка. L – відстань між двома стрижньовими блискавковідводами (для типу захисту 2С) або відстань між опорами тросового блискавковідводу (для типу Т); a – довжина прольоту між опорами троса (для типу захисту 2Т); h_1, h_2 – висота опор (для типу захисту Т).									

Контрольні запитання до практичного заняття

1. Пояснити призначення блискавковідводів.
2. Які існують типи грозозахисту?
3. В чому різниця між зонами захисту А і Б?
4. Назвати основні параметри грозозахисту.
5. Яким параметром характеризують грозову активність регіону?
6. Пояснить роботу одиночного блискавковідводу.
7. Пояснить роботу подвійного стержньового блискавковідводу.
8. Пояснить призначення троса в тросових блискавковідводах.
9. Пояснить послідовність (основні етапи) розрахунку захисту підстанції від ударів блискавки.

8 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

8.1 Мета та завдання дисципліни

Метою вивчення навчальної дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій» є формування у здобувачів вищої освіти глибоких знань та вмінь в галузі виробництва і передачі електроенергії, влаштування електроустановок електростанцій та підстанцій, фізичних процесів і технічних характеристик сучасного високовольтного силового і захисного електроустаткування електричних станцій і підстанцій.

Вивчення дисципліни безпосередньо спирається на попередні дисципліни освітньої програми бакалавра. Виконання лабораторних і практичних робіт передбачає поглиблений розгляд окремих тем, які спираються на матеріал що вивчався в загальноосвітніх дисциплінах загальна фізика, електротехнічні матеріали, електричні машини, теоретичні основи електротехніки, електричні системи та мережі. Методи розрахунків параметрів і режимі роботи електротехнічного обладнання передбачають застосування методів і положень вищої математики.

Завданням вивчення дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій» є формування у студентів належного рівня знань про електричні кола та застосуванні цих знань при виконанні інженерних та виробничих завдань; засвоєння фундаментальних знань, що є необхідною базою для подальшого вивчення професійних дисциплін.

Кінцевим результатом вивчення дисципліни є:

- знання фізики роботи і особливостей джерел електричної енергії, силового високовольтного обладнання електричних станцій та підстанцій (силових та вимірювальних трансформаторів, комутаційних та захисних пристроїв і апаратів);
- здатність правильно поставити та розв'язати завдання вибору високовольтного обладнання електричних станцій та підстанцій;

- здатність виконання аналізу режиму і ефективності роботи високовольтного обладнання електричних станцій та підстанцій;
- здатність виконання інженерних розрахунків високовольтного обладнання сучасних електричних станцій та підстанцій;
- здатність до подальшого вивчення наступних спеціальних дисциплін освітньої програми;
- здатність розраховувати потрібні електротехнічні величини на ділянках електричних станцій та підстанцій;
- здатність вибору раціонального розв’язання електротехнічної задачі;
- здатність коректно інтерпретувати одержані після розрахунків результати.

Матеріал дисципліні «Електрична частина станцій та підстанцій» поділений на три змістових модулі, які передбачають вивчення таких питань.

Змістовий модуль 1 Основні типи електростанцій (параметри, характеристики, особливості конструкцій).

Розглядаються процеси, які відбуваються в системах виробництва і розподілу електроенергії. Типи електростанцій і їхні особливості, альтернативна енергетика, накопичувачі енергії, встановлена потужність і режими роботи електростанцій. Основне високовольтне обладнання електричних станцій та підстанцій. Основні схеми розподільних установок. Вимоги до конструкцій закритих розподільних установок. Комплектні розподільні пристрої внутрішньої установки та комплектні трансформаторні підстанції.

Змістовий модуль 2 Загальні принципи побудови електричних схем електроустановок. Нагрів провідників і апаратів.

Вивчаються сучасні підходи до аналізу чинних і проектування нових систем перетворення та розподілу електроенергії. Вимоги до конструкцій відкритих розподільних пристроїв. Розміщення розподільних установок на території електростанцій та районних і вузлових підстанцій. Заземлення нейтралей. Трифазна мережа з резонансно-заземленою нейтраллю.

Змістовий модуль 3 Розподільні пристрої. Загальні принципи керування електроустановками.

Розглядаються питання експлуатації високовольтного силового електрообладнання підстанцій і керування цим обладнанням. Вивчаються методи проєктування і розрахунків щодо вибору обладнання.

Структура навчальної дисципліни і розподіл часу на її вивчення наведено у таблиці 8.1

Таблиця 8.1 – Структура навчальної дисципліни і розподіл часу

Змістові модулі	Кількість годин				
	усього	лек.	практ.	лаб.	сам. роб.
МОДУЛЬ (семестр)	150	32	16	16	86
Змістовий модуль 1	45	12	5	6	22
Змістовий модуль 2	45	10	5	5	25
Змістовий модуль 3	45	10	6	5	24
Підсумковий контроль	15				15

8.2 Тематика лекцій

Зміст лекційних занять подано у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Зміст лекційних занять

Тема	Зміст	Кільк. ауд. годин
1	2	3
Змістовий модуль 1		
1. Типи електростанцій та їхні особливості	Предмет і завдання курсу. Стан енергетики України і енергоресурси. Призначення та особливості функціонування електричних станцій та підстанцій. Технологічні схеми електростанцій і їх техніко-економічні характеристики. Поняття про електричну систему. Режим роботи енергосистеми й участь електростанцій різних типів у виробництві електроенергії	2

Продовження таблиці 8.2

1	2	3
2. Основне електричне обладнання електричних станцій та підстанцій. Комутаційні апарати	Основне електричне обладнання розподільних установок станцій та підстанцій і його призначення. Класифікація апаратів високої напруги. Типи вимикачів, основні характеристики. Роз'єднувачі, віддільники, короткозамикачі, вимикачі навантаження, запобіжники. Умови вибору високовольтних комутаційних апаратів. Приводи вимикачів і роз'єднувачів	2
3. Вимірювальні трансформатори напруги і струму	Трансформатори струму і напруги, конструктивні особливості, схеми вмикання, умови вибору	2
4. Робоче заземлення мереж	Основні поняття і визначення. Незаземлені мережі. Перенапруги при замиканнях на землю. Допустимі струми замикання на землю. Мережі з компенсацією ємнісних струмів. Дугогасні реактори, конструкція, настройка, вибір. Заземлення нейтралі через резистор, специфічні способи заземлення нейтралі. Сигналізація однофазних замикань на землю. Мережі з глухо заземленою і ефективно заземленою нейтраллю	2
5. Основне електрообладнання електростанцій	Синхронні генератори: основні характеристики, системи охолодження, системи збудження, автоматичне гасіння поля. Синхронні компенсатори. Вмикання генераторів і компенсаторів на паралельну роботу. Силові трансформатори і автотрансформатори: основні характеристики, системи охолодження, вмикання на паралельну роботу, допустимі систематичні і аварійні перевантаження. Регулювання напруги трансформаторів і автотрансформаторів. Пристрої РПН, ПБЗ і лінійні регулятори. Тепловий режим і навантажувальна здатність трансформаторів	4
Змістовий модуль 2		
6. Струми короткого замикання	Особливості розрахунку струмів короткого замикання і перевірки струмопровідних частин і апаратів. Координація струмів короткого замикання	4

Закінчення таблиці 8.2

1	2	3
7. Шини та шинні конструкції	Шини та шинні конструкції і струмопровідні елементи в електроустановках. Типи провідників, які застосовуються в електроустановках. Вибір перерізу жорстких, гнучких провідників та їх перевірка	2
8. Головні схеми електроустановок	Основні вимоги до головних схем електроустановок. Особливості головних схем електростанцій і підстанцій. Схеми електричних з'єднань, які застосовуються в розподільних установках високої напруги електростанцій та підстанцій, переваги і недоліки	4
Змістовий модуль 3		
9. Конструкція розподільних установок	Класифікація, основні вимоги. Розміщення електричного обладнання на території станцій і підстанцій. Закриті, відкриті та комплектні розподільні установки	2
10. Власні потреби електричних станцій та підстанцій	Основні характеристики механізмів власних потреб. Типи приводів, що застосовуються для цих механізмів. Джерела живлення власних потреб, їх резервування. Системи власних потреб КЕС, ТЕЦ, ГЕС і ГАЕС і підстанцій. Системи власних потреб атомних електростанцій. Класифікація споживачів власних потреб АЕС. Схеми електропостачання власних потреб АЕС	4
11. Принципи керування електроустановками	Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Дистанційне керування комутаційними апаратами. Види управління. Дистанційне управління вимикачами з електромагнітними приводами. Захист від «стрибання». Дистанційне управління роз'єднувачами. Блокування роз'єднувачів. Сигналізація в електроустановках. Призначення, види. Автоматизовані електричні підстанції	4

8.3 Тематика практичних занять

Тематика практичних занять наведена у таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Тематика практичних занять

Тема	Зміст (план)	Кількість ауд. годин
Змістовий модуль 1		
Вибір потужності автотрансформаторів і трансформаторів на вузловій підстанції	Складання структурної схеми вузлової розподільної підстанції. Визначення кількості автотрансформаторів і трансформаторів, коефіцієнтів завантаження. Розрахунок балансу потужності по ВРП	2
Вибір і перевірка вимикачів та роз'єднувачів високої напруги	Вибір вимикачів високої напруги за напругою, струмом, категорією розміщення, конструктивним виконанням та комутаційною здатністю	2
Вибір вимірювальних трансформаторів струму	Вибір трансформаторів струму за напругою установки, струмом, конструкцією і класом точності, електродинамічною стійкістю, термічною стійкістю, вторинним навантаженням	1
Змістовий модуль 2		
Вибір вимірювальних трансформаторів напруги	Вибір трансформаторів напруги за напругою установки, конструкцією і схемою з'єднання обмоток, класом точності, вторинним навантаженням	1
Вибір і розрахунок шин та ізоляторів	Вибір шин та ізоляторів за струмом, напругою, що відповідають нормальному режиму і перевірка на режим короткого замикання	2
Розрахунок втрат потужності і електроенергії в трансформаторі	Визначення загальної величини втрат активної, реактивної та повної потужності в трансформаторі, втрат електроенергії, коефіцієнта завантаження	2
Змістовий модуль 3		
Розрахунок заземлення понижувальної підстанції 110 кВ	План пристрою заземлення. Визначення опору пристрою заземлення	3
Розрахунок захисту від ударів блискавки	Розрахунок грозової активності. Визначення типу блискавкозахисту, його зони і параметрів	3

8.4 Тематика лабораторних занять

Теми лабораторних робіт подані в таблиці 8.4

Таблиця 8.4 – Теми лабораторних робіт

Тема	Зміст	Кількість ауд. годин
1	2	3
Змістовий модуль 1		
Високовольтні малооб'ємні масляні вимикачі	Вивчення конструкції, принципу дії маломасляних вимикачів і освоєння методики їхнього вибору	2
Високовольтні вакуумні вимикачі	Вивчення принципу дії, будови вакуумних вимикачів, електромагнітного привода й елементів схеми керування. Ознайомлення з призначенням і технічними параметрами вимикачів BBB-10/400, VD4	2
Вимикачі навантаження і роз'єднувачі внутрішньої установки	Вивчення принципу дії і конструкції вимикачів навантаження та роз'єднувачів, технічних характеристик основних типів цих високовольтних апаратів	2
Змістовий модуль 2		
Регулювання напруги в електричних мережах за допомогою вольтододавальних трансформаторів	Вивчення принципу дії і схеми вмикання вольтододавального трансформатора, призначеного для регулювання напруги	2
Фазування силових трансформаторів і вмикання їх на паралельну роботу	Вивчення особливостей фазування трансформаторів і умов їх вмикання на паралельну роботу	2
Комплектні розподільні установки високої напруги	Вивчення комплектних розподільних установок, устаткування, типів комплектуючих камер 6–10 кВ, вживані блокування і захисти	1

Продовження таблиці 8.4

1	2	3
Змістовий модуль 3		
Комплектні розподільні установки високої напруги	Вивчення комплектних розподільних установок, устаткування, типів комплектуючих камер 6-10 кВ, вживані блокування і захисти	1
Визначення коефіцієнта вентильності нелінійного опору вентильного розрядника	Вивчення конструкції і електричних характеристик вентильних розрядників і нелінійних обмежувачів перенапруги. Зняття вольт-амперної характеристики диска вентильного розрядника	2
Вимірювальні трансформатори напруги	Вивчення конструкції вимірювальних трансформаторів напруги, схем їхнього з'єднання в трифазних колах змінного струму	2

8.5 Види завдань самостійної роботи і оцінювання знань

Види завдань самостійної роботи і розподіл кількості балів її оцінювання наведено у таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Види завдань і розподіл максимальної кількості балів

Види завдань та засоби контролю	Розподіл балів
1	2
Змістовий модуль 1	23
Лабораторна робота 1 (звіт з лабораторної роботи).	3
Лабораторна робота 2 (звіт з лабораторної роботи).	3
Лабораторна робота 3 (звіт з лабораторної роботи).	3
Практичне завдання за змістовим модулем 1 (обґрунтування вибору джерел електропостачання промислового району).	4
Завдання до самостійної роботи 1 (порівняльна характеристика традиційних і відновлювальних джерел електричної енергії)	4
Тест за ЗМ1 (середовище MOODLE).	6
Змістовий модуль 2	24
Лабораторна робота 4 (звіт з лабораторної роботи).	3

Продовження таблиці 8.5

1	2
Лабораторна робота 5 (звіт з лабораторної роботи).	3
Лабораторна робота 6 (звіт з лабораторної роботи).	3
Практичне завдання за змістовим модулем 2 (вибір шин за заданими умовами експлуатації на підстанції).	4
Завдання до самостійної роботи № 2 (опис-пояснення підходів до класифікації головних схем, переваги і недоліки існуючих схем електричних з'єднань).	5
Тест за ЗМ2 (середовище MOODLE).	6
Змістовий модуль 3	23
Лабораторна робота 7 (звіт з лабораторної роботи).	4
Лабораторна робота 8 (звіт з лабораторної роботи).	4
Практичне завдання за змістовим модулем 3 (схеми джерел живлення власних потреб електричних станцій, підстанцій).	4
Завдання до самостійної роботи 3 (схеми дистанційного управління вимикачами та роз'єднувачами).	4
Тест за ЗМ3 (середовище MOODLE).	7
Підсумковий контроль – екзамен	30
Теоретичне питання 1 (письмова відповідь, усне пояснення).	10
Теоретичне питання 2 (письмова відповідь, усне пояснення).	10
Задача (письмова відповідь, усне пояснення).	10
ВСЬОГО ЗА МОДУЛЕМ	100

9 ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ПІДСУМКОВОГО ЕКЗАМЕНУ

1. Надайте характеристику Об'єднаній електроенергетичній системі України.
2. Режими електроенергетичної системи і участь електростанцій у виробництві електроенергії.
3. Призначення та особливості функціонування електричних станцій та підстанцій.
4. Надайте характеристику теплової електростанції.
5. Надайте характеристику атомної електростанції.
6. Надайте характеристику гідроелектростанції.
7. Надайте коротку характеристику основних видів відновлювальних джерел електричної енергії.
8. Основне електричне обладнання розподільних установок станцій та підстанцій і його призначення.
9. Класифікація апаратів високої напруги.
10. Умови вибору високовольтних комутаційних апаратів.
11. Класифікація високовольтних вимикачів за способом гасіння дуги.
12. Особливості елегазових вимикачів.
13. Надайте характеристику повітряним вимикачам.
14. Надайте опис вакуумного вимикача ВВП-110.
15. Поясніть будову електромагнітного приводу ПЕ-11.
16. Основні конструктивні елементи силового трансформатора та їхнє призначення.
17. Автотрансформатори та їхні особливості.
18. Призначення і пристрій високовольтних масляних вимикачів.
19. Призначення і пристрій високовольтних вакуумних вимикачів.
20. Експлуатаційні вимоги до роз'єднувачів.
21. Поясніть призначення і особливості пристрою роз'єднувачів.

22. Призначення і класифікація вимірювальних трансформаторів.
23. Схеми вмикання вимірювальних трансформаторів напруги.
24. Вибір та перевірка силових трансформаторів напруги.
25. Маркування вимірювальних трансформаторів струму.
26. Синхронні генератори: основні характеристики, системи охолодження, системи збудження.
27. Синхронні компенсатори.
28. Системи охолодження силових трансформаторів.
29. Регулювання напруги трансформаторів і автотрансформаторів.
30. Пристрої РПН, ПБЗ і лінійні регулятори.
31. Вольтододавальні трансформатори.
32. Тепловий режим і навантажувальна здатність трансформаторів.
33. Особливості розрахунку струмів короткого замикання і перевірки струмопровідних частин і апаратів.
34. Шини та шинні конструкції і струмопровідні елементи в електроустановках.
35. Основні вимоги до головних схем електроустановок.
36. Особливості головних схем електростанцій і підстанцій.
37. Розподільні установки. Класифікація, основні вимоги.
38. Розміщення електричного обладнання на території станцій і підстанцій.
39. Закриті розподільні пристрої. Особливості побудови.
40. Основні характеристики механізмів власних потреб.
41. Типи приводів, що застосовуються для механізмів власних потреб механізмів.
42. Джерела живлення власних потреб, їх резервування.
43. Системи власних потреб атомних електростанцій.
44. Дистанційне керування комутаційними апаратами.
45. Дистанційне керування вимикачами з електромагнітними приводами.
46. Дистанційне керування роз'єднувачами.

47. Сигналізація в електроустановках. Призначення, види.
48. Участь електростанцій різних типів в виробництві електроенергії.
49. Вимірювальні трансформатори струму і напруги, їхні конструктивні особливості.
50. Типи високовольтних вимикачів, основні характеристики.
51. Джерела оперативного змінного струму.
52. Устаткування випрямленого оперативного струму.
53. Силові трансформатори і автотрансформатори: основні характеристики, системи охолодження.
54. Вимоги до конструкцій закритих розподільних пристроїв.
55. Класифікація розподільних пристроїв підстанцій.
56. Методи регулювання напруги на шинах підстанцій.
57. Джерела оперативного змінного струму.
58. Конструкції трансформаторів струму.
59. Розміщення РУ на території електростанцій.
60. Порядок вибору вимикачів високої напруги.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (для слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)) [Електрон. ресурс] / уклад. : В. М. Гаряжа, Є. Д. Дьяков, Г. В. Капустін ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 44 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/39544/1/%282014%20печ.%20%20192М%20Практич-2014-192-М%20друк%29.pdf>, вільний (дата звернення 05.08.2025). – Назва з екрана.

2. Методичні вказівки до самостійного вивчення курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») [Електрон. ресурс] / уклад. : В. Г. Воропай, В. М. Гаряжа, Д. В. Рум'янцев ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 18 с. – Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/20912/1/2010_печ._МУ_самост.укр.ок.1.pdf, вільний (дата звернення 05.07.2025). – Назва з екрана.

3. Правила улаштування електроустановок [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Київ : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. – Режим доступу: <https://unidim.com.ua/sites/default/files/pue.pdf>, вільний (дата звернення 03.10.2024). – Назва з екрана.

4. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Київ, 2003. – 613 с. – Режим доступу: <https://mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/order/Наказ%20Міністерства%20палива%20та%20енергетики%20України%20від%2013.06.2003%20№%20296.pdf>, вільний (дата звернення 03.10.2024). – Назва з екрана.

5. Теорія систем і системний аналіз [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова ; Харків. нац.

ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 167 с. – Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/38976/1/2011%2016H%20печ.%20Охрименко_ТСтаСА.pdf, вільний (дата звернення 03.10.2024). – Назва з екрана.

6. Методичні вказівки до виконання графічної роботи «Вивчення правил оформлення конструкторської документації з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» для студентів – радіо і електро спеціальностей» [Електрон. ресурс] / уклад. : Н.М. Коломийчук. – Електрон. текст. дані. – Київ : НТУУ (КПІ), 2016. – 29 с. – Режим доступу: https://ng-kg.kpi.ua/files/shemi_kolomijchuk.pdf, вільний (дата звернення 05.07.2025). – Назва з екрана.

7. Лежнюк П. Д. Проектування електричної частини електричних станцій [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / П. Д. Лежнюк, В. М. Лагутін, В. В. Тептя. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 194 с. – Режим доступу: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/AB594E9F-4D13-4801-BF80-743ACE42861D.pdf>, вільний (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

8. Дані грозової активності 2020 – 2023 [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: https://fs-lps.com/grozovi_dni/, вільний (дата звернення 05.07.2025). – Назва з екрана.

9. Собчук В. С. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах [Електрон. ресурс]: навч. посіб. / В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 145 с. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Sobchuk_2011_145.pdf, вільний (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

ДОДАТОК А

Зразок оформлення основного напису

185																																																																										
7		10		23		15		10		70		50																																																														
11 × 5 = 55 <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Вип.</td><td>Аркул.</td><td>№ докум.</td><td>Підпис</td><td>Дата</td> </tr> <tr> <td>Розроб.</td><td colspan="4">Гриценко В.Г.</td> </tr> <tr> <td>Керівник</td><td colspan="4">Охріменко В.М.</td> </tr> <tr> <td>Консульт.</td><td colspan="4">Охріменко В.М.</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Зав. каф.</td><td colspan="4">Плюгін В.Є.</td> </tr> </table>																																			Вип.	Аркул.	№ докум.	Підпис	Дата	Розроб.	Гриценко В.Г.				Керівник	Охріменко В.М.				Консульт.	Охріменко В.М.														Зав. каф.	Плюгін В.Є.				Шифр креслення				15
Вип.	Аркул.	№ докум.	Підпис	Дата																																																																						
Розроб.	Гриценко В.Г.																																																																									
Керівник	Охріменко В.М.																																																																									
Консульт.	Охріменко В.М.																																																																									
Зав. каф.	Плюгін В.Є.																																																																									
Тема практичної роботи										Літера		Маса	Масшт.	5																																																												
										5	5	5	17	18	15																																																											
										Аркуш 1		Аркушів 1		5																																																												
Назва аркуша										20		Назва ВНЗ Назва кафедри		15																																																												

Приклад формування шифру креслення - *ECE 2023-1у 083 E1*,

де: *ECE 2023-1у* – шифр групи студента;

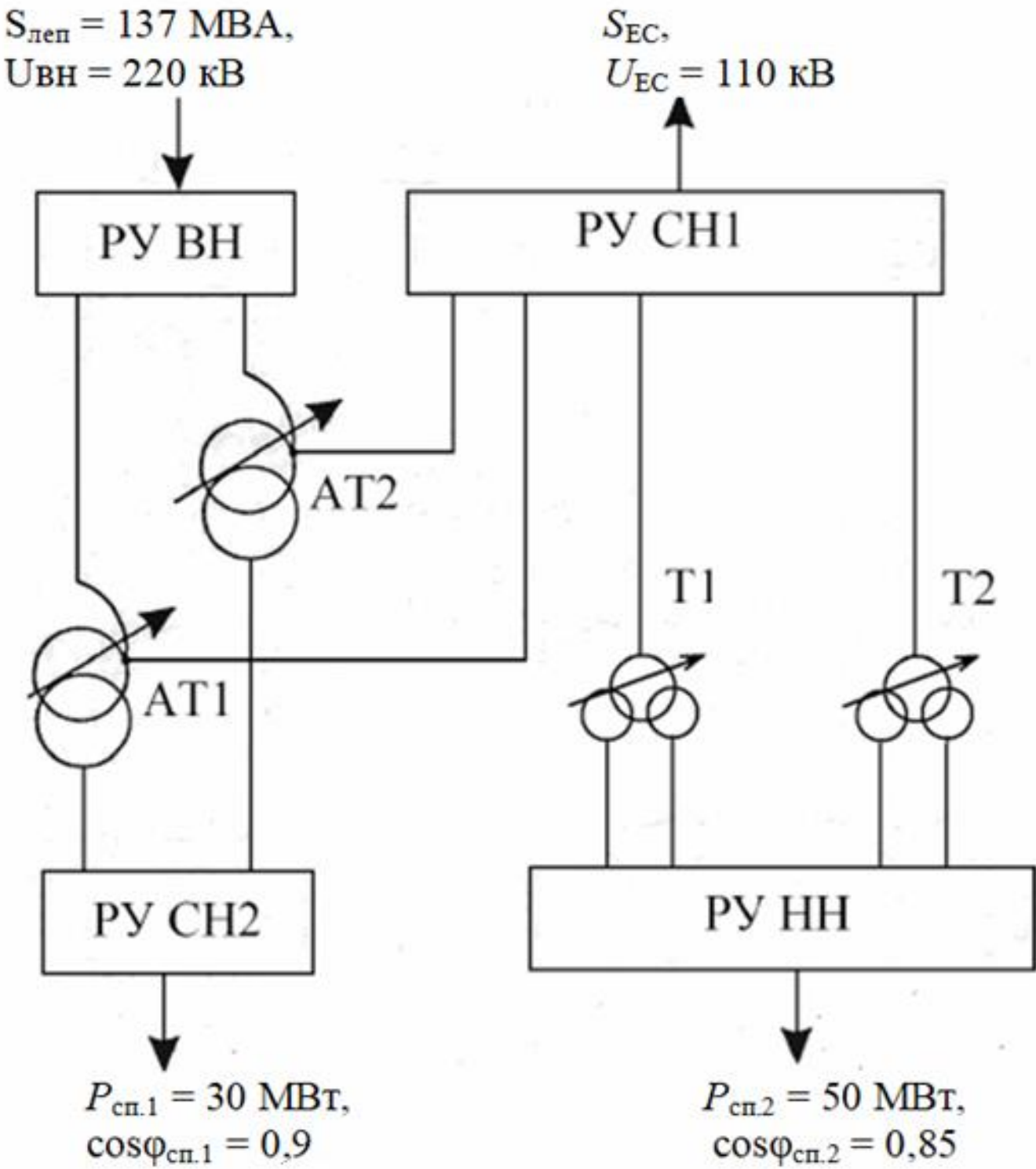
083 – номер залікової книжки студента;

E1 – позначення типу схеми (схема електрична структурна).

Рисунок А.1 – Загальна форма основного напису з розмірами

ECE 2023-1у 083 E1																																																																													
11 × 5 = 55 <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Вип.</td><td>Аркул.</td><td>№ докум.</td><td>Підпис</td><td>Дата</td> </tr> <tr> <td>Розроб.</td><td colspan="4">Гриценко В.Г.</td> </tr> <tr> <td>Керівник</td><td colspan="4">Охріменко В.М.</td> </tr> <tr> <td>Консульт.</td><td colspan="4">Охріменко В.М.</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Зав. каф.</td><td colspan="4">Плюгін В.Є.</td> </tr> </table>																																			Вип.	Аркул.	№ докум.	Підпис	Дата	Розроб.	Гриценко В.Г.				Керівник	Охріменко В.М.				Консульт.	Охріменко В.М.														Зав. каф.	Плюгін В.Є.				Вибір потужності автотрансформаторів і трансформаторів на вузловій підстанції				Літера	Маса	Масшт.	5
Вип.	Аркул.	№ докум.	Підпис	Дата																																																																									
Розроб.	Гриценко В.Г.																																																																												
Керівник	Охріменко В.М.																																																																												
Консульт.	Охріменко В.М.																																																																												
Зав. каф.	Плюгін В.Є.																																																																												
Структурна схема ВРПС										ІІР																																																																			
										Аркуш 1		Аркушів 1																																																																	
										ХНУМГ ім. О.М. Бекетова Кафедра СЕ та ЕМ																																																																			

Рисунок А.2 – Зразок заповнення основного напису



Позиц., познач.	Найменування	Кіл.	Примітки
АТ1, АТ2	АТДЦТН 125000-220/110/35	2	
Т1, Т2	ТРДН 63000-110/10	2	
РУ ВН	Розподільне устаткування високої напруги 220 кВ	1	
РУ СН1	Розподільне устаткування середньої напруги 110 кВ	1	
РУ СН2	Розподільне устаткування середньої напруги 35 кВ	1	
РУ НН	Розподільне устаткування низької напруги 10 кВ	1	

					ECE 2023-1y 083 E1				
					Вибір потужності автотрансформаторів і трансформаторів на вузловій підстанції	Літера	Маса	Масшт.	
Вип.	Аркул.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Гриценко В.Г.					ПР			
Керівник	Охріменко В.М.								
Консульт.	Охріменко В.М.					Архиви 1	Архиви 1		
					Структурна схема ВРПС	ХНУМГ ім. О.М. Бекетова Кафедра СЕ та ЕМ			
Зав. каф.	Плюгін В.Є.								

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітньо-професійні програми «Електротехнічні системи електроспоживання», «Світлотехніка та дизайн світлового середовища», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електромеханіка»)

Укладач **ОХРІМЕНКО** Вячеслав Миколайович

Відповідальний за випуск *В. Є. Плюгін*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *В. М. Охріменко*

План 2024, поз. 268М

Підп. до друку 02.03.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 5,4.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.