

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Електричні станції та підстанції»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Електромеханіка

За темою № 8 - Умови роботи провідників і апаратів

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.01.2023 № 1

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 19.12.2022 № 5

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і
радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

Розробники:

Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання,
к.т.н., доцент, викладач, Шокарьов Д.А.

Рецензенти:

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Вступ.
2. Електродинамічна дія електричного струму.
3. Втрати в провідниках при змінному струмі. Короткі замикання в електроустановках.
4. Трифазні КЗ. Методи розрахунків струмів трифазного КЗ. Схеми заміщення. Способи обмеження струму КЗ.
5. Питання для самоконтролю.

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна література:

1. Козлов В. Д. Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів: підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова. – К.: НАУ, 2018. – 312 с.
2. Костишин, В. С. Електрична частина станцій та підстанцій : навч. посіб. / В. С. Костишин, М. Й. Федорів, Я. В. Бацала. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. - 243 с.
3. Бардик Є. І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання: навч. посібник / Є. І. Бардик, М. П. Лукаш – К.: НТУУ «КПІ», 2016 – 220 с.

Допоміжна література:

1. Неклепаев Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2014. – 152 с.
2. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2015.
3. Шестеренко, В. Є. Електропостачання промислових підприємств. Посібник до курсового та дипломного проектування / Шестеренко В. Є., Шестеренко О. В. — Київ, 2015. — 424 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Офіційний сайт Міністерство енергетики України <http://mpe.kmu.gov.ua/>
2. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : www.rada.gov.ua.

1 Вступ. Динамічна дія струмів к.з.

Струмопровідні частини будь-якої електроустановки або окремих апаратів взаємодіють між собою. Якщо в нормальних режимах роботи електродинамічні зусилля незначні, то в режимі короткого замикання, коли струми зростають в десятки разів, динамічні зусилля можуть викликати механічне пошкодження в шинних конструкціях і апаратах.

Електродинамічна сила взаємодії між двома паралельними провідниками

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_{\phi} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a},$$

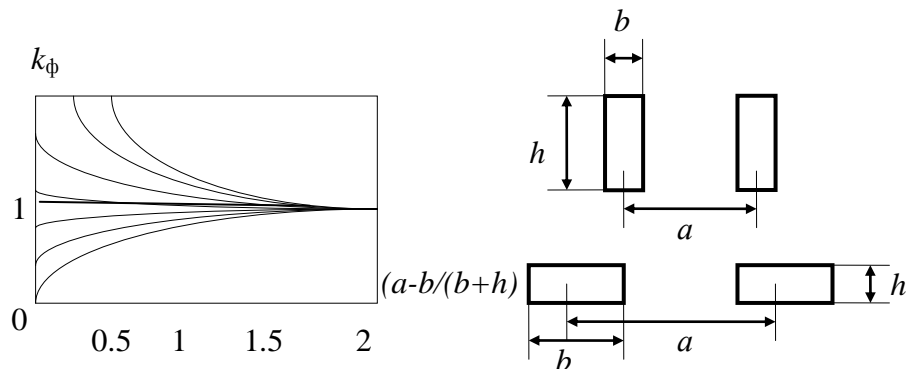
де i_1, i_2 - миттєві значення струмів в провідниках, А;

l - довжина провідників, м

a - відстань між осями провідників, (м);

k_{ϕ} - коефіцієнт форми.

Коефіцієнт форми залежить від форми перерізу провідників і їх взаємного розташування. Для провідників круглого і трубчастого перетину можна вважати струм зосередженим в їх геометричній осі і k_{ϕ} . Для шин прямокутного перетину k_{ϕ} може бути прийнятий рівним одиниці, якщо перетин мало, в порівнянні з відстанню між провідниками. При розрахунку Еду між провідниками (шинами) різних фаз можна вважати $k_{\phi} = 1$. Якщо відстань між шинами прямокутного або коробчатого перерізів мало (наприклад, якщо фаза складається з декількох смуг), коефіцієнт форми визначається за експериментальними кривими.



Якщо відстань у світлі між шинами $(a - b)$ Більше периметра $2 \cdot (b + h)$, то $k_{\phi} \approx 1$.

У мережах трифазного струму Еду змінюються в часі за значенням і напрямку. При струмі 2-х фазного к.з. (Впливом третьої неушкодженою фази нехтують)

$$F^{(2)} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_{\phi} \cdot \left[i_y^{(2)} \right]^2 \cdot \frac{l}{a},$$

де $i_y^{(2)}$ - ударний струм 2-х фазного к.з., кА.

При струмі 3х-фазного к.з. в найбільш важких умовах знаходиться середня фаза. На неї діє сила

$$F^{(3)} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [i_y^{(3)}]^2.$$

Для запобігання механічним пошкодженням від впливу Еду при к.з. в мережі все елементи електроустановок повинні мати достатню електродинамічної стійкості.

Під електродинамічної стійкості розуміють здатність апаратів або провідників витримувати механічні зусилля при протіканні струмів к.з. бездеформацій. Що перешкоджають їх подальшій експлуатації.

Для апаратів електродинамічна стійкість задається миттєвим значенням струму електродинамічної стійкості. Електродинамічна стійкість забезпечується, якщо

$$i_{\text{дин}} \geq i_y^{(3)}.$$

Для жорстких шин розраховується механічне напруження в матеріалі шин при к.з. Критерієм стійкості є умова

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \sigma_{\text{расч}}.$$

На електродинамічну стійкість не перевіряються апарати і провідники:

- захищені запобіжниками;
- ланцюгів ТН в окремій камері;
- гнучкі шини.

2 Термічна дія струмів к.з.

Для кожного елемента електроустановки нормами встановлюються допустимі температури нагріву, вище яких він не повинен нагріватися в заданих умовах роботи. При цьому розрізняють два режими:

- тривале нагрівання струмом нормального режиму;
- короткочасний режим нагріву струмом к.з.

Оскільки режим к.з. обмежується за часом (не більше 3секунд), допускається більш висока температура нагріву, ніж в тривалому режимі.

Температура нагріву провідника складається з двох складових:

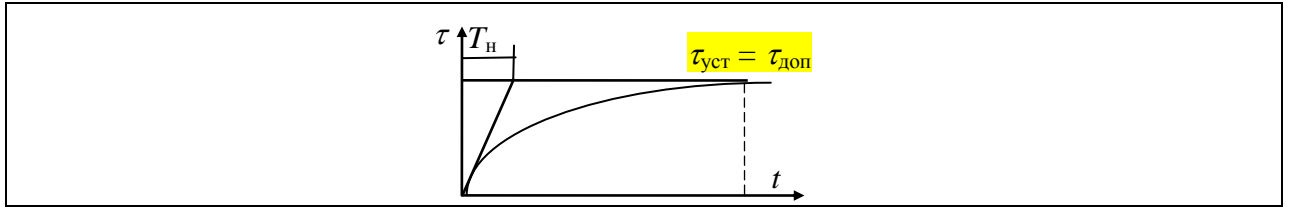
$$\theta = \theta_0 + \tau,$$

де θ_0 - Температура навколишнього середовища;

τ - перепад температури нагрітого провідника і навколишнього середовища.

У тривалому режимі нагріву зміна температури відбувається відповідно до рівняння:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \cdot \left(1 - e^{-t/T_n} \right),$$



де $\tau_{\text{уст}}$ - сталe значення перепаду температури ($\tau_{\text{уст}} = \tau_{\text{доп}}$);

T_n - постійна нагрівання провідника.

Для тривалого режиму роботи умовою нормальної роботи є:

$$\theta \leq \theta_{\text{доп}} \quad \text{або} \quad \tau \leq \tau_{\text{доп}}.$$

У режимі короткого замикання струми зростають в 10 - 20 разів, при цьому нагрів зростає в 100 - 400 разів, а тепловіддача змінюється незначно. Тому процес можна вважати адіабатичним, коли все тепло йде на нагрів провідника без віддачі в навколишнє середовище.

Кількість тепла, виділеного в провіднику в режимі к.з., пропорційно імпульсу квадратичного струму к.з. (Теплового імпульсу)

$$B_k = \int_0^{t_{\text{откл}}} I_{k,t}^2 \cdot dt,$$

де $I_{k,t}$ - діюче значення струму в момент к.з.

У практичних розрахунках B_k визначають спрощено

$$B_k = I_{\text{п,о}}^2 \cdot (t_{\text{откл}} + T_a).$$

Час дії струму к.з. ($t_{\text{откл}}$) складається з часу дії основного релейного захисту ($t_{\text{рз}}$) і повного часу відключення вимикача ($t_{\text{откл}_B}$):

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{рз}} + t_{\text{откл}_B}.$$

При виборі електричних апаратів використовуються зазначені заводом-виробником дані про гарантовані значення часу $t_{\text{терм}}$ і середньоквадратичного струму $I_{\text{терм}}$, які витримуються апаратом без пошкоджень. Умова перевірки термічної стійкості:

$$B \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}.$$

При виборі провідників умовою перевірки на термічну стійкість є

$$\theta_{\text{кз}} \leq \theta_{\text{кз, доп}}.$$

Для перевірки необхідно визначити температуру ($\theta_{\text{кз}}$) Провідника в кінці режиму к.з., що досить складно. Для спрощення розрахунків по перевірці термічної стійкості провідників можна використовувати поняття мінімальної перетину провідника

$$S_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C},$$

де C - коефіцієнт, який приводиться для проводів, шин і кабелів в довідковій літературі.

Провідник термічно стійкий до струму короткого замикання, якщо

$$S \geq S_{\text{min}}.$$

3 Обмеження струмів короткого замикання

Максимальний рівень струмів короткого замикання обмежується відключас здатністю вимикачів або термічної стійкістю кабелів. Штучне обмеження струмів короткого замикання дозволяє застосовувати більш легкі і дешеві апарати і струмоведучі частини меншого перетину.

Більшість вимикачів мають граничний струм відключення ($I_{\text{откл}_{\text{ном}}}$), Рівний 40 кА. Якщо струм короткого замикання перевищує $I_{\text{откл}_{\text{ном}}}$ необхідно його обмеження. Якщо струм короткого замикання менше $I_{\text{откл}_{\text{ном}}}$ доцільність обмеження визначається техніко-економічними розрахунками.

Обмеження струму короткого замикання досягається збільшенням опору мереж шляхом:

- здійснення роздільної роботи живлять агрегатів, трансформаторів і ліній електропередачі;
- включення в ланцюзі додаткових опорів.

Обмеження струмів к.з. зазвичай здійснюється в два ступені:

- на електростанціях за допомогою секційних реакторів (СР) і трансформаторів з розщепленими обмотками ток к.з. обмежується до економічно доцільних для станцій значень;
- в розподільних мережах за допомогою схемних рішень (роздільної роботи трансформаторів та ЛЕП), лінійних реакторів (ЛР) і трансформаторів з розщепленими обмотками струми к.з. обмежуються до значень, економічно доцільних для мереж.

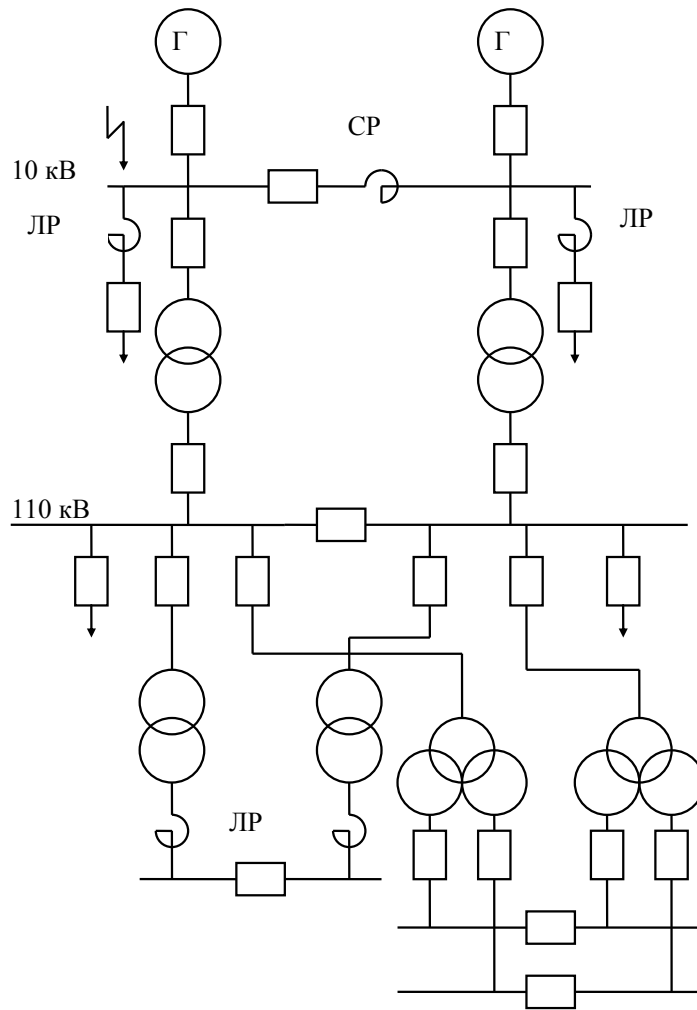


Рис. 4.1. Приклад використання способів обмеження струмів короткого замикання

4 Реактори

Реактори є спеціальним засобом обмеження струмів к.з. Вони вдають із себе індуктивне опір, що включається послідовно в кожну фазу ланцюга, Конструктивно - це котушка з малим активним опором без сердечника.

Реактори встановлюються в мережах 6 - 10 кВ (іноді 35кВ і вище).

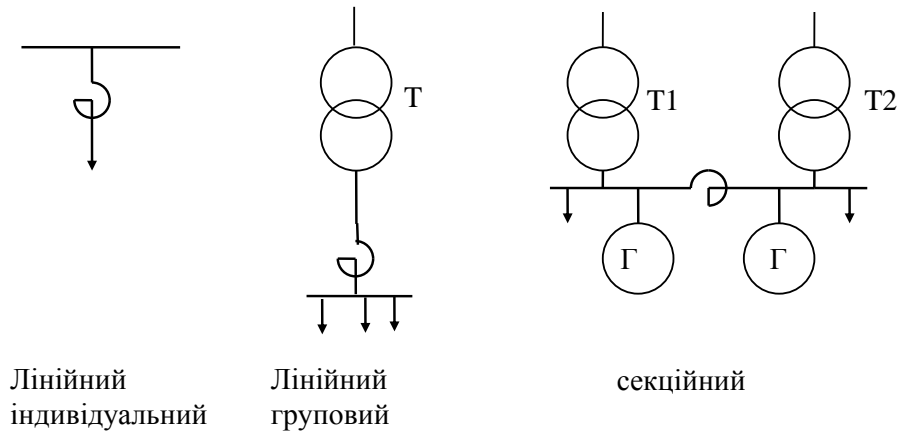


Рис. 4.2. Схеми включення реакторів

Основними параметрами реакторів є:

- Номінальна напруга $U_{pном}$, КВ;
- номінальний струм $I_{pном}$, А;
- номінальний опір $X_{pном}$, Ом.

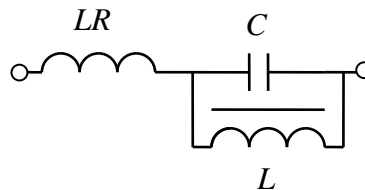
Іноді в довідниках наводиться:

$$x_p \% = \frac{x_p \cdot \sqrt{3} \cdot I_{pном}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Збільшення опору бажано для зменшення струму короткого замикання, але обмежується збільшенням втрат напруги і потужності в нормальному режимі роботи. Втрата напруги:

$$\Delta U_p \% = x_p \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot \sin \varphi}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Допустима втрата напруги в лінійному реакторі складає 1,5 - 2%. Для секційного реактора таких обмежень немає і його опір може бути збільшено. Коли все ж потрібно значний опір для обмеження струму к.з. застосовують БТУ (безінерційні токоограничувачі пристрої).



Реактор (LR) і ємність (C) резонансно налаштовані (результуючий опір близько до нуля). Індуктивність (L) в нормальному режимі має великий опір і струм через неї малий. При к.з. струм через ємність збільшується,

збільшується падіння напруги ΔU на ємності і збільшується напруга, прикладена до L , збільшується струм через індуктивність, сердечник її насичується і ємність закорачивається. Струм к.з. при цьому обмежується повним опір реактора LR .

Для зменшення падіння напруги в нормальному режимі і обмеження струму к.з. застосовують також здвоєні реактори (з додатковим висновком від середньої точки обмотки). Схеми включення здвоєних реакторів:



вибір реакторів здійснюється відповідно до умов:

$$U_{\text{ном}_p} \geq U_{\text{ном}_{\text{сети}}};$$

$$I_{\text{ном}_p} \geq I_{\text{раб}_{\text{max}}};$$

$$x_p \geq x_{\text{р}_{\text{треб}}}.$$

Необхідний опір реактора $(x_{\text{р}_{\text{треб}}})$ визначається, виходячи з необхідного обмеження рівня струмів к.з. Зазвичай цим умовою є відключення здатність вимикача $(I_{\text{откл}_b})$.

Якщо відомо початкове значення періодичної складової струму к.з. $I_{\text{п},0}$ і $I_{\text{п},0} \geq I_{\text{откл}_b}$, Необхідно встановити реактор, що забезпечує зниження струму до $I_{\text{откл}_b}$.

До установки реактора

$$I_{\text{п},0} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot x_k},$$

де x_k - опір ланцюга до точки короткого замикання;

щоб $I_{\text{п},0}$ дорівнювало $I_{\text{откл}_b}$ опір має бути

$$x'_k = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл}_b}}.$$

різниця

$$x'_k - x_k = x_{\text{р}_{\text{треб}}}.$$

5 Питання для самоконтролю.

1. Тепловий імпульс струму КЗ.
2. Термічна стійкість апаратів.
3. Електродинамічна дія електричного струму.
4. Втрати в провідниках при змінному струмі.
5. Короткі замикання в електроустановках. Трифазні КЗ.
6. Методи розрахунків струмів трифазного КЗ. Схеми заміщення.
7. Способи обмеження струму КЗ.
8. Явище електричної дуги. Процес гасіння електричної дуги в комутаційних апаратах.