

**Розрахунок струмів короткого замикання  
та вибір електрообладнання на  
електричних станціях та підстанціях**

**Методичні вказівки**

**для студентів спеціальності  
6.090600 “Електричні системи та мережі”**

**Затверджено  
на засідання кафедри  
електротехніки та автоматики  
Протокол №7 від 26.02.04**

Розрахунок струмів короткого замикання та вибір електрообладнання на електричних станціях та підстанціях. Методичні вказівки для студентів спеціальності 6.090600 “Електричні системи та мережі”. / Укл.: Буйний Р.О., Ананьєв В.М., Тисленко В.В. – Чернігів: ЧДТУ, 2004-70с.

Укладачі: Буйний Роман Олександрович, асистент  
Ананьєв Володимир Михайлович, старший викладач  
Тисленко Віктор Васильович, доктор технічних наук

Відповідальний

за випуск: Гнедін Олег Петрович., завідувач кафедри електротехніки та автоматики

Рецензент: Зорін Владлен Володимирович, доктор технічних наук,  
професор кафедри електротехніки та автоматики

## **Список умовних скорочень**

**АПВ** – автоматичне повторне ввімкнення

**ГЕС** – гідроелектростанція

**ЕРС** – електрорушійна сила

**КЗ** – коротке замикання

**РП** – розподільчий пункт

## ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для студентів спеціальності 6.090600 “Електричні системи та мережі”.

Вони включають в себе рекомендації по розрахунку струмів короткого замикання, перевірці струмоведучих частин на електродинамічну та термічну стійкість, умови вибору електрообладнання електричних станцій та підстанцій напругою до 1000В і вище 1000В. Кожний розділ методичних вказівок супроводжується прикладами розв’язку типових задач.

У додатках до методичних вказівок приведені контрольні завдання, які допоможуть студентам опанувати основні принципи проектування електричної частини станцій та підстанцій.

Дані методичні вказівки допоможуть студентам спеціальності 6.090600 “Електричні системи та мережі” при вивченні дисциплін “Електричні станції та підстанції”, “Електричні апарати”, “Релейний захист”, а також при курсовому проектуванні з дисциплін “Електричні системи та мережі”, “Електропостачання”, та дипломному проектуванні з фаху 7.090602 “Електричні системи та мережі”.

## **1 Загальні відомості про струми КЗ.**

### **Причини та наслідки**

Причиною більшості аварій в електроустановках є КЗ, які виникають внаслідок порушення електричної міцності ізоляції струмоведучих частин. Причини таких порушень різноманітні: старіння ізоляції, обриви проводів повітряних ліній електропередачі, механічні пошкодження ізоляції кабельних ліній при земельних роботах, удари блискавки в лінії електропередачі та інші.

Частіше за все КЗ відбуваються через перехідний опір, наприклад через опір електричної дуги, який виникає в місці пошкодження ізоляції. Інколи виникають металічні КЗ при яких опір електричної дуги має дуже мале значення.

В трифазних електроустановках виникають трифазні та двохфазні КЗ. Крім того, в трьохфазних мережах з наглухо заземленою нейтраллю також можуть виникати однофазні та двохфазні КЗ на землю.

При трифазному КЗ всі фази мережі знаходяться в однакових умовах тому його називають симетричним. При інших видах КЗ у кожній фазі мережі протікають різні струми, у зв'язку з чим векторні діаграми струмів та напруг скривлюються. Такі замикання називають несиметричними.

Короткі замикання, як правило, супроводжуються збільшенням струму у пошкоджених фазах до величини, яка в декілька разів перевищує номінальне значення.

Протікання струму КЗ призводить до збільшення втрат електричної енергії в провідниках та контактах, що супроводжується їх сильним нагріванням. Перегрів струмоведучих частин може призвести до швидкого старіння та руйнування ізоляції, зварювання та вигорання контактів електричних апаратів, втрату механічної міцності шин та провідників. Провідники та комутаційні пристрої повинні витримувати нагрів струмами короткого замикання, тобто бути термічно стійкими.

Протікання струму КЗ також супроводжується значними електродинамічними зусиллями між провідниками. Струмоведучі частини, комутаційні апарати та електричні машини повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони витримували без пошкодження зусилля, які виникають при КЗ. Тобто вони повинні бути електродинамічно стійкими.

КЗ супроводжуються пониженням рівня напруги в електричній мережі, особливо біля місця пошкодження.

На рисунку 1.1 представлена епюра розподілення напруги при КЗ в різних точках мережі.

Зниження напруги на шинах у споживача (наприклад, на шинах РП1 при короткому замиканні на шинах РП2) може привести до поганих наслідків. Особливо чутливі до зниження напруги асинхронні двигуни. При великих зниженнях напруги зменшується момент обертання двигунів, а як наслідок збільшується струм, який споживає двигун. При цьому ще більше збільшується падіння напруги в мережі, внаслідок чого розвивається лавиноподібний процес, який захоплює велику кількість споживачів електроенергії.

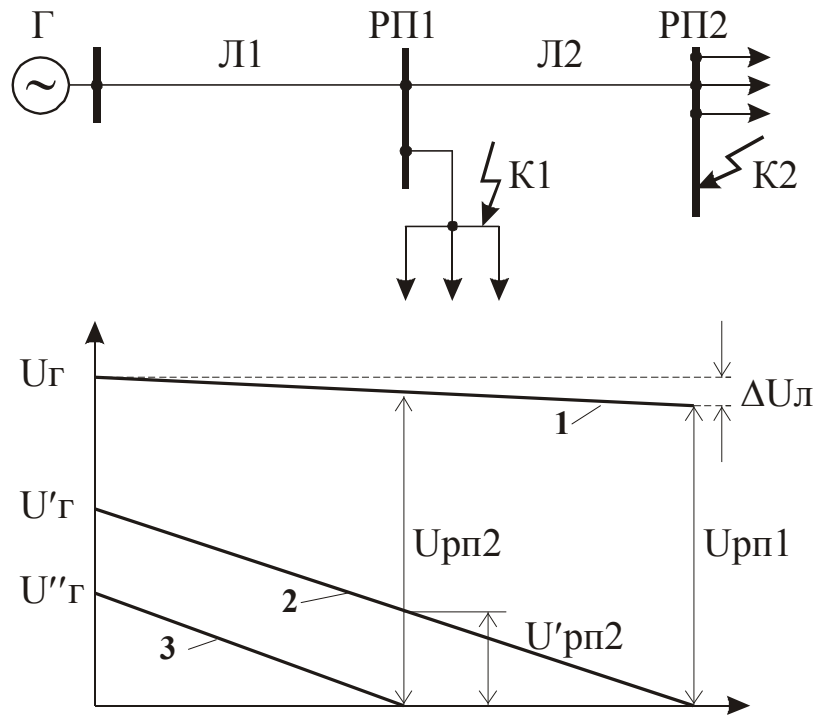


Рисунок 1.1 – Схема мережі з розподіленням напруги на шинах споживачів при КЗ

Різке зменшення напруги при КЗ може призвести до порушення стійкості паралельної роботи генераторів, а як наслідок до системної аварії.

Для забезпечення надійної роботи енергосистеми та запобігання пошкодженню електрообладнання при КЗ необхідно швидко відключити пошкоджену ділянку мережі. До заходів, що зменшують небезпеку розвивання аварійного режиму, відносяться також правильний вибір комутаційних апаратів, застосування струмообмежуючих реакторів, вибір раціональної схеми електропостачання та інше.

Для здійснення вищевказаних заходів необхідно вміти визначати величину струму КЗ та характер його зміни в часі.

## 2 Умови для розрахунку струмів КЗ

### 2.1 Загальні вказівки

КЗ є випадковими подіями. Сукупність параметрів режиму КЗ створює множину ймовірних параметрів.

Параметри електрообладнання мають дискретний характер. Їх сукупність створює множину детермінованих параметрів.

Для перевірки електрообладнання по режиму КЗ треба співставити ймовірні параметри режиму КЗ з детермінованими параметрами електрообладнання. Для можливості такого співставлення ймовірні параметри режиму КЗ перетворюють в умовно детерміновані параметри розрахункових умов КЗ.

Розрахункові умови КЗ (тобто найбільш тяжкі умови для електроустановки) формуються на основі досвіду експлуатації електроустановок, аналізу відмов електрообладнання та наслідків КЗ, використання співвідношень параметрів режиму КЗ, які впливають з теорії перехідних процесів в електроустановках.

Розрахункові умови КЗ визначаються індивідуально для кожного елементу електроустановки. Для однотипних по параметрам та схемі включення елементів електроустановки допускається використовувати аналогічні розрахункові умови.

Згідно ПУЕ [6] допускається не перевіряти по режиму КЗ деякі провідники та електричні апарати, які захищаються плавкими запобіжниками, а також провідники та апарати в колах малопотужних, невідповідальних споживачів, які мають резервування в електричній та технологічній частині. При цьому повинна бути виключена можливість вибуху або пожежі.

## **2.2 Розрахункова схема електроустановки**

Для розрахунку струмів КЗ необхідно скласти розрахункову схему. Вона включає в себе всі елементи електроустановки та частини енергосистеми, які до неї примикають, виходячи з умов, передбачених довготривалою роботою електроустановки з перспективою не менше ніж на 5 років після вводу в експлуатацію.

В окремих випадках в розрахункову схему включають не всі елементи електроустановки, якщо при цьому розрахунком доказується можливість існування більш важких розрахункових умов. Наприклад, при вводі в роботу після ремонту однієї з паралельних віток електроустановки.

## **2.3 Розрахунковий вид КЗ**

При перевірці електричних апаратів та жорстких провідників разом з опорними конструкціями на електродинамічну стійкість розрахунковим видом КЗ є трифазне КЗ. При цьому в загальному випадку допускається не враховувати механічні коливання шинних конструкцій.

При перевірці гнучких провідників на електродинамічну стійкість (тяжіння, небезпечне зближення та перехльостування провідників) розрахунковим видом КЗ є двохфазне КЗ. Розрахунок на схльостування повинен проводитися з врахуванням конструкції системи гнучких провідників, значення струму КЗ та розрахункової тривалості КЗ.

При перевірці провідників та електричних апаратів на термічну стійкість розрахунковим видом КЗ в загальному випадку є трифазне КЗ. При перевірці на термічну стійкість провідників та апаратів в колах генераторної напруги електростанцій розрахунковим може бути також і двохфазне КЗ, якщо воно обумовлює більше нагрівання провідників та апаратів, ніж трифазне КЗ.

При перевірці електричних апаратів на комутаційну здатність розрахунковим видом КЗ може бути трифазне або однофазне КЗ в залежності від того, при якому виді КЗ струм КЗ буде мати найбільше значення. Якщо для вимикачів задається різна комутаційна здатність при трифазному та

однофазному КЗ, то в даному випадку треба робити перевірку окремо по кожному виду КЗ.

## **2.4 Вибір розрахункової точки КЗ**

Розрахункова точка КЗ знаходиться безпосередньо з однієї або іншої сторони елемента електроустановки, який розглядається, в залежності від того, коли для нього створюються важкі умови в режимі КЗ. Можливість подвійних КЗ на землю допускається не враховувати.

В закритих розподільчих пристроях провідники та електричні апарати, які розміщені до реактора, перевіряються виходячи з того, що розрахункова точка КЗ знаходиться за реактором, якщо вони відділені від збірних шин розділюючими полицями, а реактор знаходиться в тій же самій будівлі та всі з'єднання від реактора до збірних шин виконані шинами.

При перевірці кабелів на термічну стійкість розрахунковою точкою КЗ є:

- для окремих кабелів однієї будівельної довжини – точка КЗ на початку кабелю;
- для окремих кабелів зі з'єднаними по всій довжині кабелями різного перерізу – точка КЗ на початку кожної ділянки нового перерізу;
- для двох та більше паралельно включених кабелів однієї кабельної лінії – на початку кожного кабелю. Відступ від цих вимог повинен бути обґрунтованим.

## **2.5 Розрахункова тривалість КЗ**

При перевірці провідників та електричних апаратів на термічну стійкість в якості розрахункової тривалості КЗ слід приймати суму часу дії струмового захисту (з врахуванням АПВ), який знаходиться найближче до місця КЗ вимикача та повного часу вимикання останнього. При наявності зони нечутливості в основного захисту – по сумі часу дії захисту, який реагує на КЗ в даній зоні та повного часу відключення вимикача.

Струмопроводи та трансформатори струму в колах генераторів потужністю більше 60МВт слід перевіряти на термічну стійкість. При цьому тривалість КЗ визначається як сума часу дії основного захисту (при установці двох основних захистів) або резервного захисту (при установці одного основного захисту) та повного часу спрацювання вимикача на фідері генератора. Комутаційні електричні апарати в колах генераторів потужністю більше 60МВт повинні перевірятись на термічну стійкість як по тривалості дії струму КЗ, яке визначається основним швидкодіючим захистом, так і по часу спрацювання резервного захисту, якщо цей час перевищує номінальне паспортне значення.

При перевірці електричних апаратів на комутаційну спроможність у якості розрахункової тривалості КЗ слід приймати суму мінімально можливого часу дії релейного захисту даного фідера та власного часу відключення комутаційного апарата.

При перевірці кабелів на стійкість проти горіння при КЗ в якості розрахункової тривалості КЗ слід приймати суму часу дії резервного захисту та повного часу відключення пошкодженого фідера.



### 3 Розрахунок струмів КЗ

#### 3.1 Складання розрахункової схеми

Розрахункова схема – це така однолінійна схема електроустановки на якій вказані всі елементи та їх параметри, які впливають на величину струму КЗ.

На розрахунковій схемі вказуються номінальні параметри окремих елементів (рисунок 3.1).

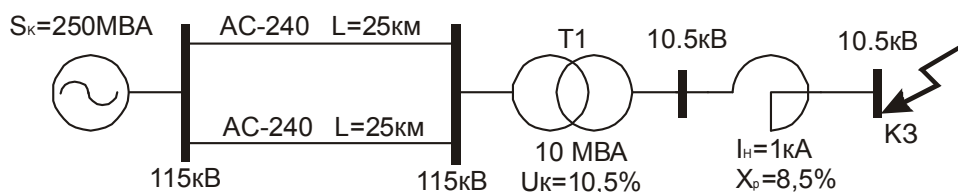


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема мережі

Зазвичай опори шин розподільчих пристроїв, електричних апаратів (вимикачів, трансформаторів струму та ін.), кабельних та повітряних перемичок невеликої довжини не враховують, так як вони мають незначну величину.

При розрахунку струмів КЗ в установках до 1000В необхідно враховувати опори шин, трансформаторів струму, рубильників, автоматів, параметри яких при цьому повинні бути вказані на розрахунковій схемі. Якщо відомі фактичні коефіцієнти трансформації усіх трансформаторів та автотрансформаторів, то складання розрахункової схеми слід проводити з врахуванням цих коефіцієнтів. Якщо ж вони невідомі – допускається їх враховувати приблизно згідно наступної шкали напруг: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ.

При розрахунку струмів КЗ для спрощення останніх роблять такі припущення:

- всі джерела живлення включені і працюють з номінальним навантаженням;
- всі синхронні компенсатори мають автоматичне регулювання збудження;
- відсутнє насичення магнітних систем;
- в усіх елементів враховується тільки індуктивний опір “X”, активний опір “R” враховується тільки для провідників малих перерізів, якщо  $R > \frac{X}{3}$  та малопотужних трансформаторів з напругою нижчої сторони <1000В.
- опір у місці КЗ приймають рівним нулю.

Для заданого в електричній схемі місця короткого замикання, складають схему заміщення (рисунок 3.2), яку потім приводять до одного еквівалентного опору.

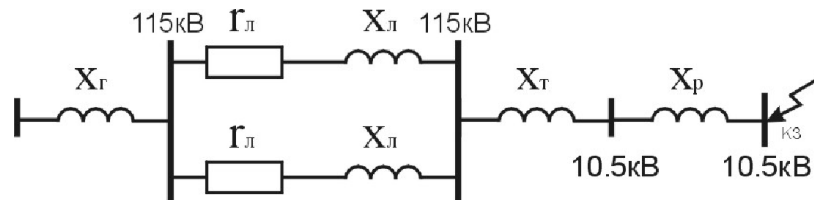


Рисунок 3.2 – Схема заміщення розрахункової схеми

Найчастіше розрахунок струмів КЗ проводять в іменованих або у відносних одиницях.

### 3.2 Опори елементів еквівалентних схем

При розрахунку струмів КЗ для початкового моменту часу у синхронних генераторів, компенсаторів та двигунів в схему заміщення включають тільки їх індуктивний опір у початковий момент часу:

- при наявності демпферних обмоток враховують надперехідний опір поздовжньої вісі –  $X_d''$ ;
- при відсутності демпферних обмоток – перехідний опір поздовжньої вісі –  $X_d'$ .

Для інших моментів часу розрахунки проводять за допомогою спеціальних прийомів (криві затухання), причому в цьому випадку використовують еквівалентну схему для початкового моменту часу.

Числові значення надперехідних та перехідних опорів синхронних машин приводяться у довідниках.

Активний опір синхронних машин має невелике значення у порівнянні з реактивним, тому при розрахунках струмів КЗ його не враховують. Винятком є синхронні генератори малопотужних ГЕС з робочою напругою до 400В.

Для трансформаторів можна вважати, що їх відносний реактивний опір дорівнює напрузі КЗ у відносних одиницях:

$$x_{*H} \approx u_{*K}.$$

Якщо у розрахунках необхідно враховувати активний опір трансформаторів, то:

$$z_{*H} \approx u_{*K} = \frac{u_{K\%}}{100};$$

$$x_{*H} = \sqrt{z_{*H}^2 - r_{*H}^2}.$$

При відомих втратах в міді можна визначити номінальний активний опір трансформатора у відносних одиницях:

$$r_{*H} = \frac{\Delta P_M}{S_H}.$$

Активний опір трансформаторів при розрахунку струмів КЗ необхідно враховувати у трьох випадках:

- середня напруга у точці, для якої розраховується струм КЗ менше 500В;
- потужність трансформатора  $\leq 400\text{кВА}$ ;
- трансформатор живиться або живить точку КЗ по лінії, яка виконана сталевими проводами (оскільки активним опором цих проводів знехтувати неможливо);

Трьохобмоточні трансформатори та автотрансформатори характеризуються значеннями напруги КЗ для кожної пари обмоток:  $u_{к\text{ }B-C\%}$ ,  $u_{к\text{ }B-H\%}$ ,  $u_{к\text{ }C-H\%}$ , ці значення приводяться у довідниках. При розрахунку струмів КЗ такі трансформатори представляють трьохпроменевою зіркою з параметрами  $u_{к\text{ }B\%}$ ,  $u_{к\text{ }C\%}$ ,  $u_{к\text{ }H\%}$ .

$$u_{к\text{ }B\%} = \frac{1}{2} \cdot (u_{к\text{ }B-C\%} + u_{к\text{ }B-H\%} - u_{к\text{ }C-H\%});$$

$$u_{к\text{ }C\%} = \frac{1}{2} \cdot (u_{к\text{ }B-C\%} + u_{к\text{ }C-H\%} - u_{к\text{ }B-H\%});$$

$$u_{к\text{ }H\%} = \frac{1}{2} \cdot (u_{к\text{ }B-H\%} + u_{к\text{ }C-H\%} - u_{к\text{ }B-C\%}).$$

У реакторів при розрахунках струмів КЗ враховують тільки реактивний опір. У довідниках для реакторів приводиться реактивний опір у відносних одиницях при певному номінальному струмі на номінальній напрузі. В електричних мережах в основному застосовують реактори з відносним реактивним опором від 3 до 10%.

Для кабельних ліній активний та індуктивний опір визначають наступним чином:

$$R = r_0 \cdot l;$$

$$X = x_0 \cdot l,$$

де  $l$  – довжина ділянки лінії;  $r_0, x_0$  – активний та індуктивний опори 1км кабелю (приводяться у довідниках).

Для повітряних ліній активний опір визначається аналогічно кабельним, а індуктивний залежить від конструкції лінії:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{CP}}{d} + 0,016,$$

де  $D_{CP}$  – середньгеометрична відстань між фазами;  $d$  – діаметр проводу.

$$D_{CP} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}}.$$

Якщо провідники лінії розміщені по вершинах рівнобедреного трикутника –  $D_{CP} = D$ , а при розміщенні у лінію –  $D_{CP} = 1,26 \cdot D$ .

Дуже часто при розрахунках струмів КЗ виникає необхідність враховувати опір електричної мережі більш високого ієрархічного рівня. В такому випадку така мережа замінюється еквівалентним генератором з номінальною потужністю короткого замикання  $S_{KЗ}$ .

$$x_{*C} = \frac{S_{KЗ}}{S_H}.$$

### 3.3 Розрахунок струмів КЗ в іменованих одиницях

При розрахунку цим методом всі опори електричної схеми необхідно спочатку привести до однакової умови – *базисної напруги*., тобто до напруги однієї ступені.

За базисну напругу найкраще прийняти напругу тієї ступені трансформації де розраховується струм КЗ.

Приведення ЕРС джерел енергії та опорів різних елементів схеми виконують згідно формул:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= E \cdot n_1 \cdot n_2 \dots n_m; \\ \dot{Z} &= Z \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 \dots n_m^2,\end{aligned}$$

де  $E$ ,  $Z$  – дійсні значення ЕРС джерела енергії та опора будь-якого елемента схеми;  $\dot{E}$ ,  $\dot{Z}$  – їх приведені значення;  $n_1, n_2, \dots n_m$  – коефіцієнти трансформації трансформаторів або автотрансформаторів при їх каскадному включенні між точкою мережі в якій включено даний елемент та основною базисною точкою.

Зазвичай ЕРС та опори деяких елементів задаються у відносних одиницях. Тому виникає необхідність перевести їх в омічну систему:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= E^* \cdot U_H \cdot n_1 \cdot n_2 \dots n_m; \\ \dot{Z} &= Z^* \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 \dots n_m^2 = Z^* \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 \dots n_m^2; \\ n_i &= \frac{U_B}{U_H},\end{aligned}$$

де  $E^*$ ,  $Z^*$  – значення ЕРС джерела та опору елемента розрахункової схеми у відносних одиницях при номінальних параметрах.

Після приведення всіх необхідних опорів до базисної напруги схема заміщення спрощується відносно точки КЗ (рисунок 3.3).

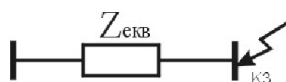


Рисунок 3.3 – Схема заміщення після еквівалентування

Далі згідно закону Ома знаходять струм КЗ у даній точці:

$$I_K = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot \dot{Z}_E},$$

де  $\dot{Z}_E$  – еквівалентний опір кола від джерела живлення до точки КЗ у омічних одиницях.

### 3.4 Розрахунок струмів КЗ у відносних одиницях

При розрахунку струмів КЗ у відносних одиницях всі опори електричної схеми необхідно спочатку привести до однакової умови – *базисної потужності*.

За базисну потужність  $S_B$  можна приймати потужність енергосистеми, сумарну потужність генераторів електростанції або трансформаторів якоїсь із підстанцій. Для спрощення розрахунків рекомендується за базисну потужність приймати число кратно 10.

Відносний опір генераторів та трансформаторів (автотрансформаторів) в еквівалентній схемі приводять до базисної потужності наступним чином:

$$Z_B = Z \cdot \frac{S_B}{S_H}.$$

Для реакторів:

$$X_B = X_H^* \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B},$$

де  $I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{CEP}}$ ,  $U_{CEP}$  – середня напруга того ступеня де включений реактор.

Опори ліній електропередачі приводяться до базисної потужності наступним чином:

$$Z_B = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{U_H} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot S_B}{U_H^2}.$$

Після приведення всіх опорів до однакової базисної потужності, схема заміщення спрощується. Після чого розраховується струм КЗ:

$$I_K = \frac{I_B}{Z_{\Sigma\_B}}.$$

### 3.5 Визначення аперіодичної складової струму КЗ

Найбільший практичний інтерес при проектуванні електричної частини станцій та підстанцій, та при виборі електричних апаратів представляє ударний струм короткого замикання.

Ударним струмом КЗ називають найбільше миттєве значення струму. У будь-якому випадку струм КЗ досягає свого найбільшого значення за півперіоду напруги мережі.

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{\Pi},$$

де  $k_y$  – ударний коефіцієнт;  $I_{\Pi}$  – періодична складова струму КЗ.

Фізична суть ударного коефіцієнту – враховує участь аперіодичної складової струму КЗ в утворенні ударного струму. Ударний коефіцієнт залежить від місця КЗ (параметрів мережі):

$$k_y = 1 + e^{-0,01/T_a};$$

$$T_a = \frac{x_{рез}}{314 \cdot r_{рез}},$$

де  $r_{рез}$ ,  $x_{рез}$  – еквівалентний активний та індуктивний опір до точки к.з.;  $T_a$  – постійна часу короткозамкнутого кола.

Ударний коефіцієнт змінюється у межах:  $1 < k_y < 2$ .

### 3.6 Особливості розрахунку струмів КЗ в мережах напругою до 1кВ

В електроустановках змінного струму напругою до 1кВ розрахунок струмів КЗ виконують з метою перевірки комутаційних апаратів та струмопроводів на динамічну стійкість, перевірки чутливості та селективності дії захисту.

При напрузі до 1кВ навіть незначний опір суттєво впливає на струм КЗ. Тому при розрахунках необхідно враховувати усі активні та індуктивні опори короткозамкнутого кола, включаючи активні опори контактних з'єднань та опір електричної дуги.

Якщо електрична мережа напругою до 1кВ живиться через знижувальний трансформатор від енергосистеми та біля місця КЗ знаходяться синхронні та асинхронні двигуни, то початкове діюче значення періодичної складової визначають з врахуванням струмів електричних машин.

Допускається не враховувати вплив двигунів, якщо їх сумарний номінальний струм не перевищує 1% початкового значення періодичної складової струму у місці КЗ [4].

Розрахунок струмів КЗ можна проводити в іменованих одиницях. Параметри елементів розрахункової схеми приводять до ступеню напруги

мережі, на якому розглядається точка КЗ. Активні та індуктивні опори елементів схеми заміщення доцільно виражати в  $мОм$ .

При розрахунку струмів КЗ в електроустановках, що живляться від мережі енергосистеми, можна вважати, що знижувальні трансформатори підключені до джерела з нескінченною потужністю.

Більш докладна інформація по розрахунку струмів КЗ в мережах до 1кВ приведена в [4].

Приклад 3.1. Визначити періодичну складову струму трифазного КЗ, ударний струм КЗ в точці К2 для схеми зображеної на рисунку 3.4. Розрахунки провести у відносних одиницях.

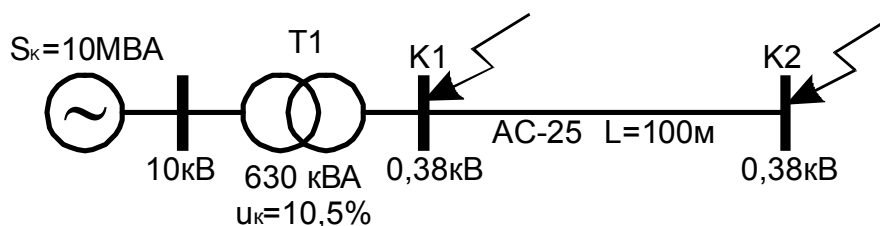


Рисунок 3.4 – Схема мережі для прикладу 3.1

- складаємо схему заміщення:

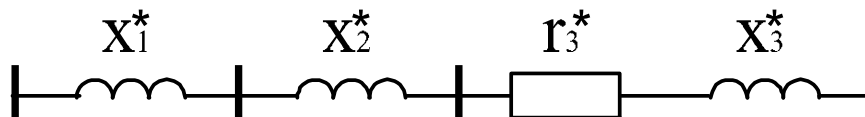


Рисунок 3.5 – Схема заміщення розрахункової схеми прикладу 3.1

- задаємося базисною потужністю:  $S_B = 10 МВА$ :

$$x_1^* = \frac{S_B}{S_K} = \frac{10}{10} = 1.$$

$$x_2^* = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10}{0,63} = 1,67.$$

- із довідника знаходимо діаметр проводу марки АС-25 та його питомий активний опір:  $d = 6,9 \text{ мм}$ ;  $r_0 = 1,146 \text{ Ом/км}$ .
- питомий індуктивний опір знаходимо за формулою:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{cp}}{d} + 0,016,$$

де  $D_{cp}$  – середня геометрична відстань між проводами (для лінії 0,38кВ –  $D_{cp} = 40 \text{ см}$ ).

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 40}{0,69} + 0,016 = 0,313 \text{ Ом/км}.$$

$$r_3 = r_0 \cdot l = 1,146 \cdot 0,1 \approx 0,115 \text{ Ом};$$

$$x_3 = x_0 \cdot l = 0,313 \cdot 0,1 \approx 0,031 \text{ Ом}.$$

- переводимо  $r_3$  і  $x_3$  до відносних одиниць, при цьому за номінальну напругу приймаємо напругу на 5% більше від номінального значення на шинах:

$$r_3^* = r_3 \cdot \frac{S_B}{U_H^2} = 0,115 \cdot \frac{10}{0,4^2} = 7,19;$$

$$x_3^* = x_3 \cdot \frac{S_B}{U_H^2} = 0,031 \cdot \frac{10}{0,4^2} = 1,94.$$

- знаходимо еквівалентний опір до точки К2:

$$x_{e2}^* = x_1^* + x_2^* + x_3^* = 1 + 1,67 + 1,94 = 4,61;$$

$$r_{e2}^* = r_3^* = 7,19;$$

$$z_{e2}^* = \sqrt{r_{e2}^{*2} + x_{e2}^{*2}} = \sqrt{7,19^2 + 4,61^2} = 8,54.$$

$$T_a = \frac{x_{e2}^*}{314 \cdot r_{e2}^*} = \frac{4,61}{314 \cdot 7,19} = 0,002 \text{ с};$$

$$k_{y2} = 1 + e^{-0,01/T_a} = 1,01$$

- струм К3 в точці К2:

$$I_{K2} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot z_{e2}^*} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 8,54} = 1,69 \text{ кА};$$

- ударний струм при К3 в точці К2:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_{y2} \cdot I_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,01 \cdot 1,69 = 2,41 \text{ кА}.$$

Приклад 3.2. Визначити періодичну складову струму трифазного КЗ, ударний струм КЗ в точці К2 для схеми зображеної на рисунку 3.4. Розрахунки провести у іменованих одиницях.

- схему заміщення має вид, аналогічний тому що приведений у прикладі 3.1 (рисунок 3.5):
- за базисну ступінь напруги приймаємо ступінь 0,38кВ (на 5% більше):  
 $U_{B.} = 0,4 \text{ кВ}$ :



$$x_1 = \frac{U_B^2}{S_K} = \frac{0,4^2}{10} = 0,016 \text{ Ом}.$$

$$x_2 = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,63} = 0,027 \text{ Ом}.$$

- із довідника знаходимо діаметр проводу марки АС-25 та його питомий активний опір:  $d = 6,9 \text{ мм}$ ;  $r_0 = 1,146 \text{ Ом/км}$ .
- питомий індуктивний опір знаходимо за формулою:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{cp}}{d} + 0,016,$$

де  $D_{cp}$  – середня геометрична відстань між проводами (для лінії 0,38кВ –  $D_{cp} = 40 \text{ см}$ ).

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 40}{0,69} + 0,016 = 0,313 \text{ Ом/км}.$$

$$r_3 = r_0 \cdot l = 1,146 \cdot 0,1 \approx 0,115 \text{ Ом};$$

$$x_3 = x_0 \cdot l = 0,313 \cdot 0,1 \approx 0,031 \text{ Ом}.$$

Опори лінії  $r_3$ ,  $x_3$  розраховані для лінії 0,38кВ, напруга якої співпадає з базисним ступенем, тому їх не треба приводити до базисної напруги.

- знаходимо еквівалентний опір до точки К2:

$$x_{e2} = x_1 + x_2 + x_3 = 0,016 + 0,027 + 0,031 = 0,074 \text{ Ом};$$

$$r_{e2} = r_3 = 0,115 \text{ Ом};$$

$$z_{e2} = \sqrt{r_{e2}^2 + x_{e2}^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,074^2} = 0,137 \text{ Ом}$$

$$T_a = \frac{x_{e2}}{314 \cdot r_{e2}} = \frac{0,074}{314 \cdot 0,115} = 0,002 \text{ с};$$

$$k_{y2} = 1 + e^{-0,01/T_a} = 1,01$$

- струм КЗ в точці К2:

$$I_{K2} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot z_{e2}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,137} = 1,69 \text{ кА};$$

- ударний струм при КЗ в точці К2:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_{y2} \cdot I_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,01 \cdot 1,69 = 2,41 \text{ кА}.$$

Як бачимо струм КЗ розрахований різними методами співпадає.

## 4 Електродинамічна дія струму КЗ

### 4.1 Електродинамічні сили в електроустановках

Електродинамічна сила взаємодії між двома паралельними провідниками довільного перерізу через які протікають струми визначається наступним чином:

$$F = 2,04 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a} \cdot k_\phi \cdot 10^{-7}, [\text{Н}],$$

де  $a$  – відстань між осями провідників, м;  $i_1, i_2$  – струми у провідниках, А;  $l$  – довжина провідників, м;  $k_\phi$  – коефіцієнт форми провідників.

Струми, які протікають у провідниках утворюють силу, яка рівномірно розподіляється уздовж провідників. У практичних розрахунках цю силу замінюють результуючою, зосередженою посередині провідника.

При однакових напрямках струмів у провідниках вони притягуються, а при різних – відштовхуються.

Коефіцієнт форми  $k_\phi$  залежить від форми провідників та їх взаємного розміщення. Для круглих та трубчастих провідників  $k_\phi = 1$ , для провідників інших форм перерізу можна вважати приймати  $k_\phi = 1$  у тих випадках, коли переріз провідників малий у порівнянні з відстанню між ними. У всіх інших випадках  $k_\phi \neq 1$  і визначається по спеціальним таблицям.

Сила взаємодії між паралельними провідниками при двофазному струмі КЗ визначається наступним чином:

$$F^{(2)} = 2,04 \cdot i_y^{(2)2} \cdot \frac{l}{a} \cdot k_\phi \cdot 10^{-7},$$

де  $i_y^{(2)}$  – ударний струм при двофазному КЗ

При трифазному КЗ

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot i_y^{(3)2} \cdot \frac{l}{a} \cdot k_\phi \cdot 10^{-7},$$

де  $i_y^{(3)}$  – ударний струм при трифазному КЗ

Найбільші електродинамічні зусилля виникають при трифазних КЗ. Тому при виборі комутаційних апаратів повинна бути дотримана наступна умова:

$$i_{\text{дин}} \geq i_y^{(3)},$$

де  $i_{\text{дин}}$  – динамічна стійкість комутаційного апарату.

## 4.2 Перевірка шинних конструкцій на електродинамічну стійкість

Перевірка електродинамічної стійкості шинних конструкцій при КЗ полягає в розрахунку максимальної механічної напруги в матеріалі  $\sigma_{\max}$  і максимального навантаження на ізолятори  $F_{\max}$  і порівнянні отриманих значень з допустимими.

Шинна конструкція має електродинамічну стійкість, якщо виконуються наступні умови:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &\leq \sigma_{\text{доп.}}, \\ F_{\max} &\leq F_{\text{доп.}},\end{aligned}$$

де  $\sigma_{\text{доп.}}$  – допустима механічна напруга в матеріалі шин;  $F_{\text{доп.}}$  – допустиме механічне навантаження на ізолятори.

Механічна напруга в матеріалі шин виникає при дії вигинаючого моменту при КЗ:

$$\sigma_{\max} = \frac{F \cdot l}{10 \cdot W}, [\text{МПа}]$$

де  $l$  – відстань між опорними ізоляторами шинної конструкції, м;  $W$  – момент опору шини відносно осі перпендикулярної дії механічного зусилля,  $[\text{см}^3]$ ;  $F$  – максимальна сила, що виникає в шині при КЗ (при 2-х або 3-х фазному КЗ),  $[\text{Н}]$ .

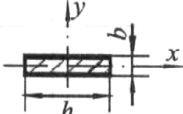
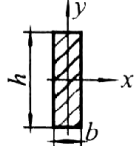
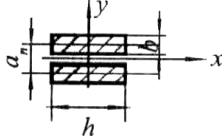
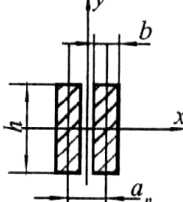
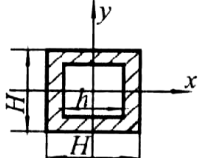
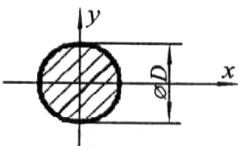
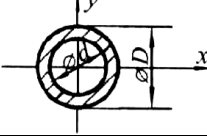
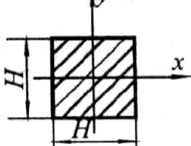
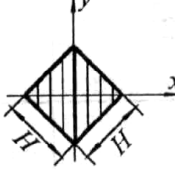
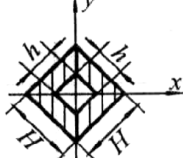
Момент опору перерізу шинної конструкції залежить від розмірів і способу розміщення шин. Формули для визначення моменту опору деяких типів шинних конструкцій приведені в таблиці 4.1.

Допустиме механічне навантаження на ізолятор з урахування коефіцієнту запасу міцності визначається наступною залежністю:

$$F_{\text{доп.}} = 0,6 \cdot F_{\text{разр.}},$$

де  $F_{\text{разр.}}$  – мінімальне руйнівне навантаження ізолятора (приводиться в довідниках).

Таблиця 4.1 – Формули для визначення моменту опору шинних конструкцій

Переріз шин	$W, \text{см}^3$
	$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6}$
	$W_y = \frac{b^2 \cdot h}{6}$
	$W_y = \frac{b \cdot h^2}{3}$
	$W_y = \frac{b^2 \cdot h}{3}$
	$W_y = \frac{H^2 - h^2}{6 \cdot H}$
	$W_y = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
	$W_y = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}$
	$W_y = \frac{H^3}{6}$
	$W_y = 0,118 \cdot H^3$
	$W_y = \frac{H^4 - h^4}{6 \cdot H}$

Таблиця 4.2 – Допустима механічна напруга в матеріалі шин

Матеріал	Марка	$\sigma_{доп.}, \text{МПа}$
Алюміній	А0, А1	70
Алюмінієвий сплав	АД31Т, АД31Т1	90
Мідь	МГМ, МГТ	140
Сталь	Ст.3	160

При перевірці ізоляторів на механічну міцність слід приймати:

– для опорних ізоляторів

$$F_{\max} = F^{(3)} \cdot k_h,$$

– для прохідних

$$F_{\max} = 0,5 \cdot F^{(3)} \cdot k_h,$$

де  $k_h$  – коефіцієнт, що враховує поправку на висоту шини, якщо вона розміщена “на ребро”.

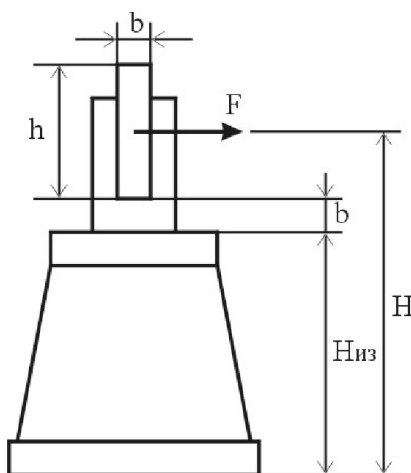


Рисунок 4.1 – Розміщення шинної конструкції “на ребро”

$$k_h = \frac{H}{H_{из.}},$$

$$H = H_{из.} + b + \frac{h}{2}.$$

Приклад 4.1. Перевірити шинну конструкцію розподільчої установки 10кВ на електродинамічну дію струмів КЗ. Шини мідні перерізом  $40 \times 5 \text{ мм}^2$ , розташовані “на ребро” в одній горизонтальній площині на опорних ізоляторах ОА-10. Висота ізолятора – 19см, допустиме навантаження 2,25кН. Відстань між ізоляторами однієї фази (проліт) – 100см, відстань між осями шин – 40см.

Ударний струм трифазного КЗ складає  $i_y = 32 \text{ кА}$ .

- визначимо електродинамічну силу, що буде діяти в шинній конструкції при трифазному КЗ:

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot i_y^{(3)2} \cdot \frac{l}{a} \cdot k_\phi \cdot 10^{-7} = 1,76 \cdot 32000^2 \cdot \frac{100}{40} \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 450 \text{ Н},$$

- момент опору шини визначаємо за наступною формулою (таблиця 4.1):

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,5 \cdot 4^2}{6} = 1,33 \text{ см}^3,$$

- механічна напруга при дії вигинаючого моменту складає:

$$\sigma_{\max} = \frac{F \cdot l}{10 \cdot W} = \frac{450 \cdot 1}{10 \cdot 1,33} = 33,8 \text{ МПа},$$

що менше від 140МПа, допустимого для мідних шин (таблиця 4.2);

- визначимо загальне навантаження на ізолятор:

$$H = H_{\text{уз.}} + b + \frac{h}{2} = 19 + 0,5 + \frac{4}{2} = 21,5 \text{ см},$$

$$k_h = \frac{H}{H_{\text{уз.}}} = \frac{21,5}{19} = 1,13,$$

$$F_{\max} = F^{(3)} \cdot k_h = 450 \cdot 1,13 = 508 \text{ Н},$$

що менше від 2,25кН, допустимого для даного ізолятора.

## 5 Термічна дія струмів КЗ

### 5.1 Перевірка струмоведучих частин на терміну стійкість

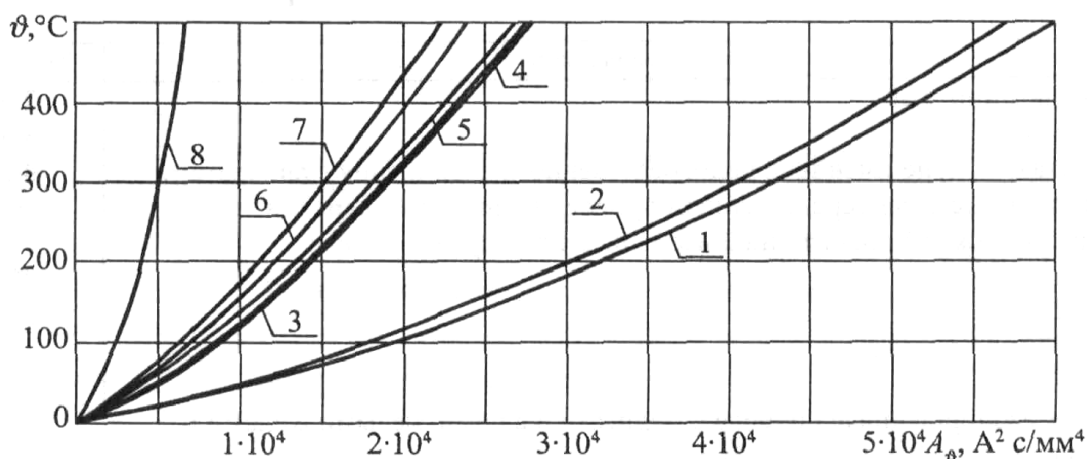
При протіканні струму КЗ провідник додатково нагрівається до температури, яка перевищує номінальну робочу температуру. Тривалість протікання струму КЗ зазвичай невелика, тому вважається, що практично все тепло йде на нагрівання провідника, не встигаючи передаватися в навколишнє середовище. Проте, в силу того, що струми КЗ набагато перевищують номінальні струми, провідник може нагрітися до неприпустимої температури за досить короткий проміжок часу. У зв'язку з цим при виборі струмоведучих частин необхідно перевіряти їх термічну стійкість.

Критерієм термічної стійкості провідника є допустима температура нагріву:

$$\theta_{\text{к.з.}} \leq \theta_{\text{доп.}},$$

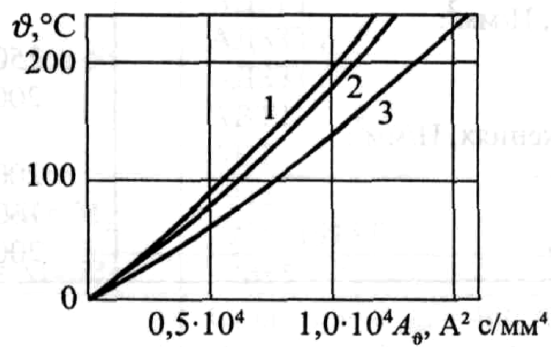
де  $\theta_{\text{доп.}}$  – максимальна допустима температура нагріву струмоведучих частин електроустановки;  $\theta_{\text{к.з.}}$  – температура нагріву провідника струмом КЗ в момент відключення протиаварійної автоматики.

Зазвичай температура нагріву провідника в момент відключення КЗ визначається по спеціальним залежностям нагріву провідника  $\theta$  від величини питомого теплового імпульсу  $A_\theta$ . Такі залежності для жорстких шин, кабелів та провідників деяких марок приведені на рисунку 5.1, а для провідників інших марок – на рисунку 5.2.



Матеріали провідників: 1-ММ; 2-МТ; 3-АМ; 4-АТ; 5-АДО, АСТ;  
6-АДЗ1Т1; 7-АДЗ1Т; 8-Ст.3

Рисунок 5.1 – Криві для визначення температури нагріву провідників із різних матеріалів при КЗ



Матеріали провідників: 1-сплави АЖ і АЖКП; 2-сплави АН і АНКП; 3-алюміній марок А, АКП, АпКП і сталєалюміній марок АС, АСКП, АСКС, АСК, АпС, АпСКС, АпСК

Рисунок 5.2 – Криві для визначення температури нагріву провідників при КЗ

Для визначення температури нагріву провідника струмом КЗ необхідно:

- знаючи початкову температуру нагріву провідника до КЗ  $\theta_n$  по відповідній кривій (рисунок 5.1 або рисунок 5.2) визначити початкове значення питомого теплового імпульсу  $A_n$ ;
- визначити значення інтеграла Джоуля  $B_K$  при розрахункових умовах КЗ:

$$B_K = I_{\Pi}^2 \cdot (t_{откл.} + T_a),$$

де  $I_{\Pi}$  – величина періодичної складової струму КЗ;  $t_{откл.}$  – час відключення КЗ;

$$t_{откл.} = t_{PЗ} + t_B,$$

де  $t_{PЗ}$  – час спрацювання релейного захисту;  $t_B$  – повний час відключення вимикача, що вимикає КЗ;

- визначити величину питомого теплового імпульсу, що відповідає кінцевій температурі нагріву:

$$A_K = A_n + \frac{B_K}{S^2},$$

де  $S$  – переріз провідника (для сталєалюмінієвих провідників – переріз алюмінієвої частини);

- по величині  $A_K$ , використовуючи відповідну криву, визначити кінцеву температуру нагріву провідника  $\theta_K$ .

Максимально допустимі температури нагріву різних провідників приведені в таблиці 5.1.



Таблиця 5.1 – Гранично допустимі температури нагріву провідників при КЗ

Вид провідника	$\theta_{\text{доп.}}, ^\circ\text{C}$
Шини алюмінієві	200
Шини мідні	300
Шини сталеві, що не мають безпосереднього з'єднання з апаратами	400
Шини сталеві при безпосередньому з'єднанні з апаратами	300
Кабелі з ізоляцією із просоченого паперу на напругу, кВ	
– 1	250
– 6-10	200
– 20-35	130
– 110-220	125
Кабелі та ізольовані провідники з мідними та алюмінієвими жилами з ізоляцією із:	
– полівінілхлоридного поастику	160
– резини	160
– поліетилену (до 35кВ)	130
– вулканізованого (зшитого) поліетилену (до 35кВ)	250
Мідні неізольовані провідники при тяжіннях, Н/мм <sup>2</sup> :	
– менше 20	250
– 20 та більше	200
Алюмінієві неізольовані провідники при тяжіннях, Н/мм <sup>2</sup> :	
– менше 10	200
– 10 та більше	160
Алюмінієва частина сталю-алюмінієвих провідників	200

Якщо при виборі перерізу провідника визначальною умовою є його термічна стійкість при КЗ, то в даному випадку слід вибрати мінімальний переріз провідника, при якому його температура нагріву до моменту відключення КЗ виявляється менше гранично допустимої температури або рівною їй.

Для визначення  $S_{\text{min}}$  необхідно:

- визначити інтеграл Джоуля  $B_K$ ;
- знаючи початкову температуру  $\theta_n$ , та гранично допустиму температуру при КЗ  $\theta_{\text{доп.}}$  (таблиця 5.1) по відповідній кривій (рисунки 5.1 або рисунок 5.2) визначаються величини  $A_H$  та  $A_{K.\text{доп.}}$ ;
- розраховується величина  $S_{\text{min}}$ :

$$S_{\text{min}} = \sqrt{\frac{B_K}{A_{K.\text{доп.}} - A_H}};$$

Використовуючи шкалу стандартних перерізів провідників шин або жил кабелів вибирають переріз провідника, що відповідає умові:

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

У випадках, коли навантаження провідника до КЗ наближається до гранично допустимого, мінімальний переріз, що відповідає умові термічної стійкості слід визначати наступним чином:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T},$$

$$C_T = \sqrt{A_{к.доп.} - A_{ном.}},$$

де  $A_{ном.}$  – величина питомого теплового імпульсу при номінальній температурі нагріву провідника в нормальному режимі.

Значення параметру  $C_T$  для жорстких шин приведені в таблиці 5.2, для кабелів – в таблиці 5.3, для проводів – в таблиці 5.4.

Таблиця 5.2 – Значення параметру  $C_T$  для жорстких шин

Матеріал проводу або марка сплаву	$C_T, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$ , при початковій температурі, °С		
	70	90	120
Мідь	170	–	–
АДО	90	81	68
АД1Н	91	82	69
АДОМ, АД1М	92	83	70
АД31Т1	85	77	64
АД31Т	82	74	62
АД33Т1	77	71	59
АД33Т	74	67	57
АВТ1	73	66	55
АВТ	71	63	53
1911	71	63	53
1915, 1915Т	66	60	51
АМг5	63	57	48
Сталь при $\theta_{доп.} = 400^\circ\text{С}$	70	–	–
Сталь при $\theta_{доп.} = 300^\circ\text{С}$	60	–	–

Таблиця 5.3 – Значення параметру  $C_T$  для кабелів

Характеристика кабелів	$C_T, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$
Кабелі до 10кВ:	
– з мідними жилами	140
– з алюмінієвими жилами	90
Кабелі 20-30кВ:	
– з мідними жилами	105
– з алюмінієвими жилами	70
Кабелі та ізолювані провідники з полівінілхлоридною або резиноюю ізоляцією:	
– з мідними жилами	120
– з алюмінієвими жилами	75
Кабелі та ізолювані провідники з полівінілхлоридною ізоляцією:	
– з мідними жилами	103
– з алюмінієвими жилами	65

Таблиця 5.4 – Значення параметру  $C_T$  для проводів

Матеріал проводу	Марка проводу	$C_T, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$ , при допустимих температурах нагріву при к.з., °С		
		160	200	250
Мідь	М	–	142	162
Алюміній	А, АКП, Ап, АпКП	76	90	–
Алюмінієвий сплав	АН, АНКП	69	81	–
	АЖ, АЖКП	66	77	–
Алюміній-сталь	АСК, АпС, АСКС, АпСКС, АпСК, АС, АСКП	76	90	–

## 5.2 Перевірка комутаційних апаратів на термічну стійкість

При виборі електричних апаратів зазвичай не потрібно визначати температуру нагріву струмоведучих частин, оскільки у довідниках приводиться величина граничного теплового імпульсу (інтеграла Джоуля)  $B_K$ . Електричний апарат задовольняє умові термічної стійкості, якщо виконується нерівність:

$$B_K \leq B_{T.\text{дон.}}$$

Для комутаційних апаратів (вимикачів потужності, вимикачів навантаження, роз'єднувачів і т.д.) допустиме значення інтегралу Джоуля залежить не тільки від вказаного заводом-виробником струму термічної стійкості  $I_T$  перевіряемого апарату, а і від співвідношення між розрахунковою

тривалістю к.з.  $t_{откл.}$  та гранично допустимим часом дії струму термічної стійкості  $t_T$  (приводиться у довідниках).

Якщо  $t_{откл.} \geq t_T$  допустиме значення теплового імпульсу визначається наступним чином:

$$B_{T.доп.} = I_T^2 \cdot t_T,$$

якщо  $t_{откл.} \leq t_T$ , то допустиме значення теплового імпульсу:

$$B_{T.доп.} = I_T^2 \cdot t_{откл.}.$$

Перевірку електричних апаратів на термічну стійкість при КЗ допускається проводити також шляхом порівняння еквівалентного термічного струму КЗ  $I_{T.екв.}$  з допустимим струмом термічної стійкості  $I_{T.доп.}$ :

$$I_{T.екв.} \leq I_{T.доп.}.$$

При  $t_{откл.} \geq t_T$ :

$$I_{T.екв.} \leq I_T \cdot \sqrt{\frac{t_T}{t_{откл.}}},$$

а в іншому випадку:

$$I_{T.екв.} \leq I_T.$$

Приклад 5.1. Перевірити на термічну стійкість при КЗ вимикач потужності типу ВВ/TEL-10-20/630, установлений на підстанції для відключення кабельного фідеру, та вибрати мінімальний переріз кабелю, що відповідає умові термічної стійкості при КЗ, якщо відомо, що при КЗ на шинах 10кВ підстанції  $I_{II} = 17 \text{ кА}$ ,  $T_a = 0,045 \text{ с}$ . Час спрацювання релейного захисту  $t_{PЗ} = 0,2 \text{ с}$ .

– вакуумний вимикач потужності ВВ/TEL-10-20/6 має такі параметри:

$$I_H = 630 \text{ А}; U_H = 10 \text{ кВ}; I_T = 20 \text{ кА}; t_B = 0,09 \text{ с}.$$

– розрахункова тривалість КЗ складає:

$$t_{откл.} = t_{PЗ} + t_B = 0,2 + 0,09 = 0,29 \text{ с},$$

– розрахунковий тепловий імпульс:

$$B_K = I_{II}^2 \cdot (t_{откл.} + T_a) = 17^2 \cdot (0,29 + 0,045) = 96,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

- у зв'язку з тим, що  $t_{откл.} \leq t_T$ , допустиме значення теплового імпульсу визначається наступним чином:

$$B_{T.доп.} = I_T^2 \cdot t_{откл.} = 20^2 \cdot 0,29 = 116 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

- співвідношення  $B_K \leq B_{T.доп.}$  виконується, тому термічна стійкість вимикача забезпечується;
- згідно таблиці 5.3 для кабелів з алюмінієвими жилами  $C_T = 90 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$ , тому мінімальний переріз жили кабелю, що відповідає умові термічної стійкості при КЗ складає:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{96,8 \cdot 10^6}}{90} = 109,3 \text{ мм}^2.$$

Таким чином, необхідний кабель з перерізом  $120 \text{ мм}^2$ .

## 6 Перевірка електричних апаратів на комутаційну здатність

### 6.1 Вибір роз'єднувачів, заземлюючих ножів, віддільників, короткозамикачів та вимикачів навантаження

Роз'єднувачі та віддільники вибираються за наступними умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

де  $U_{уст.}$  – номінальна напруга електроустановки де передбачається установка комутаційного апарату;  $U_H$  – номінальна напруга комутаційного апарату,

- по робочому струму:

$$I_{p.\max} \leq I_H,$$

де  $I_{p.\max}$  – максимальний струм, який може протікати через комутаційний апарат в нормальному режимі роботи;  $I_H$  – номінальний струм комутаційного апарату;

- по конструктивному виконанню;
- по електродинамічній стійкості:

$$i_y \leq i_{дин.},$$

- де  $i_y$  – розрахунковий ударний струм при трифазному КЗ;  $i_{дин.}$  – струм динамічної стійкості комутаційного апарату (граничний наскрізний струм КЗ згідно паспортних даних на комутаційний апарат);
- по термічній стійкості:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T \text{ або } B_K \leq B_T.$$

Заземлюючі ножі та короткозамикачі вибираються по тим же умовам за виключенням робочого струму.

## 6.2 Вибір вимикачів потужності

Вимикачі потужності вибирають за наступними умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

- по робочому струму:

$$I_{p.max} \leq I_H,$$

- по комутаційній здатності на симетричний струм КЗ:

$$I_{II}(\tau) \leq I_{откл.H},$$

де  $I_{II}(\tau)$  – діюче значення періодичної складової струму КЗ в момент часу  $\tau$  після початку розходження дугогасильних контактів вимикача;  $I_{откл.H}$  – номінальний струм при КЗ, який здатний вимкнути вимикач.

- по комутаційній здатності на асиметричний струм КЗ:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{II}(\tau) + i_a(\tau)) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откл.H} \cdot (1 + \beta_H),$$

де  $i_a(\tau)$  – аперіодична складова струму КЗ в момент розходження контактів;  $\beta_H$  – номінальне значення відносного місту аперіодичної складової в вимикаємому струмі КЗ;  $\tau$  – найменший час від початку КЗ до моменту розходження дугогасильних контактів:

$$\tau = t_{PЗ\_min} + t_{C.B.},$$

де  $t_{PЗ\_min}$  – мінімальний час дії релейного захисту;  $t_{C.B.}$  – власний час відключення вимикача;

- по електродинамічній стійкості:

$$I'' \leq I_{np.c.} \text{ або } i_y \leq i_{np.c.},$$

де  $I''$  – початкове значення періодичної складової струму КЗ;

$I_{np.c.}$ ,  $i_{np.c.}$  – діюче та амплітудне значення граничного наскрізного струму КЗ;

- по термічній стійкості:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$$

Перевірка вимикачів по параметрам відновлювальної напруги зазвичай не робиться. Це пов'язано з тим, що від перенапруг мережа захищається вентильними розрядниками та нелінійними обмежувачами перенапруги.

### 6.3 Вибір рубильників

Вибір рубильників проводиться за наступними умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

- по робочому струму:

$$I_{p.max} \leq I_H,$$

- по конструктивному виконанню;
- по електродинамічній стійкості:

$$i_y \leq i_{дин.},$$

- по термічній стійкості:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$$

### 6.4 Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі вибираються за наступними умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

- по робочому струму:

$$I_{p.max} \leq I_H,$$

- по конструктивному виконанню;

- по граничному вимикаючому струму:

$$I^{(3)} \leq I_{откл.}$$

- на електродинамічну стійкість перевіряються усі автомати за виключенням швидкодіючих автоматів  $t_{откл.} \leq 0,005 \text{ с}$ :

$$i_y \leq i_{дин.}$$

- перевірка на термічну стійкість робиться тільки для селективних автоматів:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$$

- по чутливості.

Мінімальний струм КЗ у найвіддаленішій точці мережі повинен бути більшим за номінальний струм автомата не менше ніж в 3 рази:

$$I_{K\_min} \geq 3 \cdot I_H.$$

Для автоматів миттєвої дії:

$$I_{K\_min} \geq 1,4 \cdot I_{сп.к.з.}$$

де  $I_{сп.к.з.}$  – струм при якому автомат спрацює.

- по селективності.

Для забезпечення селективної дії послідовно встановлених автоматів їх захисні характеристики не повинні пересікатися. Причому, уставка струму спрацювання у головного автомата SF1 повинна бути більшою ніж у лінійних автоматів SF2 (рисунок 6.1).

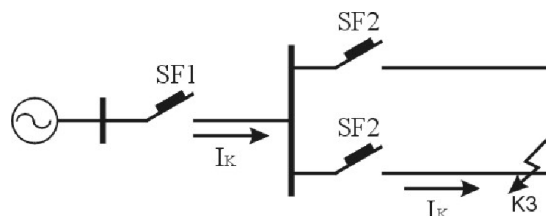


Рисунок 6.1 – Ступені селективності автоматів

У зв'язку з тим, що час спрацювання автоматів однієї марки має деяку розбіжність при перевірці селективності необхідно її враховувати. Середню похибку дії розчіплювачів автоматів приймають рівною  $\pm 20\%$ .



В такому випадку для будь-якого значення струму перевантаження або струму КЗ селективність забезпечується за умови:

$$0,8 \cdot t_{cp\_SF1} \geq 1,2 \cdot t_{cp\_SF2}.$$

### 6.5 Вибір контакторів та магнітних пускачів

Контактори та магнітні пускачі вибираються за такими умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

- по робочому струму(+ за родом струму – постійний/змінний):

$$I_{p.max} \leq I_H,$$

- по потужності приєднаного навантаження:

$$P_{нагр.} \leq P_H.$$

### 6.6 Вибір пристроїв захисного вимкнення

Пристрої захисного вимкнення вибираються за такими умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H,$$

- по робочому струму:

$$I_{p.max} \leq I_H,$$

- по номінальному диференційному струму відключення  $I_{\Delta}$ ;

- по селективності.

Вибір необхідної величини диференційного струму відключення залежить від призначення диференційного автомату. Для захисту головної ділянки мережі зазвичай встановлюють диференційний автомат зі струмом відключення 300мА, цим забезпечується захист від пожежі (при пробії ізоляції та утворенні повзучих струмів по будівельній конструкції). Для захисту споживачів від прямого або непрямого доторкування до струмоведучих частин електроустановки достатньо диференційного автомату з витримкою або без витримки часу (для забезпечення селективної роботи) з величиною диференційного струму 30мА. У деяких випадках слід застосовувати диференційні автомати зі струмом 10мА, але при цьому, для забезпечення завадоздатності вищим гармонікам, необхідно на один диференційний автомат підключати якомога менше навантаження.

Диференційні автомати мають умовну стійкість проти струмів КЗ, тому для їх захисту необхідно вибирати автоматичний вимикач або запобіжник.

Величина умовної стійкості приводиться у паспорті диференційного автомата і є параметром вибору запобіжників та автоматів.

Останнім часом широко застосовують диференційні автомати з вбудованим автоматичним вимикачем. Така конструкція одночасно забезпечує захист від диференційного струму та від аварійних режимів роботи (струм перевантаження або КЗ).

Більш докладна інформація по вибору диференційних автоматів приведена в [10].

### **6.7 Вибір запобіжників**

Запобіжники вибираються за такими умовами:

- по номінальній напрузі:

$$U_{уст.} \leq U_H ,$$

- по робочому струму:

$$I_{p.max} \leq I_H ,$$

- по конструкції та роду установки (внутрішня/зовнішня);
- по струму відключення:

$$I'' \leq I_{откл.} ,$$

де  $I_{откл.}$  – граничний вимикаємий струм.

Номінальний струм плавкої вставки запобіжника в установках до 1000В вибирається за умовами захисту мережі та селективності [7,8].

Вибір номінального струму плавкої вставки в установках вище 1000В проводиться з урахуванням стрибків струму намагнічування трансформаторів (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 – Номінальний струм плавкої вставки для захисту трансформаторів

Ном. струм тр-ра	0,5	1	1,9	3	5	8	10	14,5	20	30	54	70	100	145	210
Ном. струм пл. вставки	2	3	5	7,5	10	15	20	30	40	50	75	100	150	200	300

Приклад 6.1. Вибрати вимикач потужності лінії 10кВ. Відомо, що ударний коефіцієнт при КЗ на шинах 10кВ складає 1,6. потужність короткого замикання на шинах 110кВ можна вважати нескінченною.

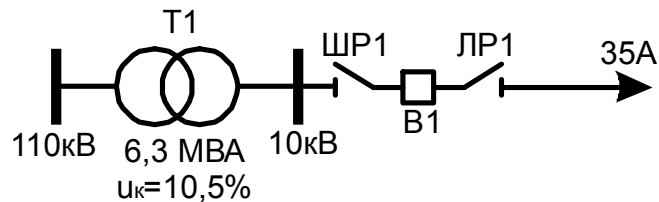


Рисунок 6.2 – Схема мережі для прикладу 6.1

- найбільший струм КЗ, який може проходити через вимикач буде за умови, коли точка КЗ буде безпосередньо за вимикачем. Тому в даному випадку розрахунковою умовою буде КЗ на шинах 10кВ.

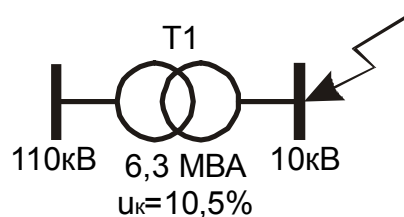


Рисунок 6.3 – Розрахункова схема мережі для прикладу 6.1

- задаємося базисною потужністю:  $S_B = 6,3 \text{ МВА}$ :

$$x_K^* = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3}{6,3} = 0,105.$$

- струм КЗ на шинах 10кВ:

$$I_K = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot x_K^*} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,105} = 3,3 \text{ кА}.$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_K = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 3,3 = 7,47 \text{ кА}.$$

- для захисту лінії 10кВ вибираємо вакуумний вимикач марки ВВ/TEL-10-20/630 з такими параметрами:  $I_H = 630 \text{ А}$ ;  $U_H = 10 \text{ кВ}$ ;  $I_K = 20 \text{ кА}$

$$U_{уст.} = 10 \text{ кВ} = U_H = 10 \text{ кВ},$$

$$I_{p.\max} = 35 \text{ А} \leq I_H = 630 \text{ А},$$

- перевіряємо вибраний вимикач на комутаційну здатність симетричного та асиметричного струму:

$$I_{II}(\tau) = 3,3 \text{ кА} \leq I_{откл.H} = 20 \text{ кА},$$

$$\tau = t_{P3\_min} + t_{C.B.} = 0,2 + 0,09 = 0,29 \text{ с},$$

$$i_a(\tau) = I_{II}(\tau) \cdot e^{-0,01/\tau} = 3,3 \cdot e^{-0,01/0,29} = 3,2 \text{ кА},$$

$$(\sqrt{2} \cdot I_{II}(\tau) + i_a(\tau)) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откл.H} \cdot (1 + \beta_H),$$

$$\sqrt{2} \cdot 3,3 + 3,2 = 7,7 \leq \sqrt{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0,4) = 39,6,$$

як бачимо обидві умови виконуються;

- перевіримо вимикач на електродинамічну та термічну стійкість:

$$i_y = 7,47 \text{ кА} \leq i_{np.c.} = 32 \text{ кА},$$

$$B_K = I_T^2 \cdot t_{откл.} = 3,3^2 \cdot 0,2 = 2,18 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq I_T^2 \cdot t_T = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

## 7 Контрольні завдання

Контрольні завдання з курсів "Електричні станції та підстанції" та "Електричні апарати" містять у собі задачі, які охоплюють основний лекційний матеріал. Ці дві дисципліни є нерозривною складовою у підготовці бакалаврів за спеціальністю 6.090600 - Електричні системи і мережі.

Завдання з курсу "Електричні станції та підстанції" полягають у:

- розрахунку струмів КЗ;
- виборі реакторів для обмеження струмів КЗ;
- виборі шинних конструкцій та ізоляторів;
- виборі кількості та потужності трансформаторів на електростанціях та підстанціях.

Завдання з курсу "Електричні апарати" полягають у:

- виборі та перевірці термічної та електродинамічної стійкості комутаційних апаратів на напругу до 1000В;
- виборі та перевірці термічної та електродинамічної стійкості комутаційних апаратів напругою вище 1000В.

Використані при рішенні задач довідкові дані необхідно супроводити посиланнями на літературу.

При виборі комутаційної апаратури бажано використовувати сучасні їх моделі, та враховувати економічні аспекти при їх виборі.

### 7.1 Методичні рекомендації по вибору варіанту

Для усіх завдань принцип вибору вихідних параметрів ідентичний.

Принцип вибору параметрів розглянемо на прикладі контрольного завдання №1 (додаток А).

Розрахункові параметри фрагменту системи електропостачання вибираються відповідно до літер прізвища, ім'я та по батькові студента. Ці дані зводяться у таблицю (дивись таблицю 7.1).

Таблиця 7.1 – Приклад вибору розрахункових параметрів

Літера	С	И	Д	О	Р	Е	Н	К	О	А	Н	Д	
№ стовпчика додатку А	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Значення параметру	350	2	АТДЦТН- 63000	2	ТРДН- 40000	2	ТДТН- 10000	1	ТРДН- 25000	РБА- 10-400- 3	2	ТВФ- 60-2	
Літера	Р	І	Й	В	А	С	И	Л	Ь	О	В	И	Ч
№ стовпчика додатку А	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Значення параметру	35км	АС-120	54км	АС-240	45км	АС-240	53	АС-240	Δ	К3/ L <sub>3</sub>	К6		

## Рекомендована література

1. Гессен В.Ю., Григорьев Ю.О. Электричні станції і підстанції. – К.: Вища школа, 1970 – 479с.
2. Гук Ю.Б. Проектирование электрической части станций и подстанций: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 312с.
3. Дорошев К.И. Эксплуатация комплектных распределительных устройств 6-220кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
4. Киреева Э.А., Орлов В.В., Старкова Л.Е. Электроснабжение цехов промышленных предприятий. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 120с.
5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Електрообладнання електричних станцій та підстанцій”. Частина 1. / Укл.: Буйний Р.О., Тисленко В.В. – Чернігів: ЧДТУ, 2003.- 40с.
6. ПУЕ
7. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергия, 1975. – 704с.
8. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 152с.
9. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352с.
10. Штепан Ф. Устройства защитного отключения управляемые дифференциальным током. – Прага, 2001 – 90с.