

621.316

М 737



**Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія**

А. С. Мних

**ОСНОВИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА
АВТОМАТИЗАЦІЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

**Методичні вказівки
до самостійної роботи**

*для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології"*

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

**ОСНОВИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ
ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

**Методичні вказівки
до самостійної роботи**

*для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології"*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ЕЕМ,
протокол № 22 від 19.05.2015р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2015

ББК 621.316
М 737

А. С. Мних, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри ЕЕМ,
д.т.н., професор Ю. Г. Качан*

Мних А. С.
М 737 Основи релейного захисту та автоматизація в енергетичних системах: методичні вказівки до самостійної роботи для студентів ЗДІА напряму підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології" / Мних А. С.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2015. – 50 с.

ЗМІСТ

Розділ 1

Розрахунок аварійних режимів електроенергетичних систем 4

Розділ 2

Розрахунок релейного захисту ліній електропередач 10

Розділ 3

Розрахунок автоматичних уставок релейного захисту генераторів 23

Розділ 4

Розрахунок автоматичних уставок релейного захисту силових трансформаторів 32

Список використаних джерел 48

Розділ 1 РОЗРАХУНОК АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Одним з найбільш трудомістких завдань при вирішенні питань проектування, експлуатації та модернізації електроенергетичних систем є розрахунок характерних нормальних і аварійних режимів їх роботи. Розрахунок уставок пристроїв релейного захисту та автоматики також заснований на результатах розрахунку безлічі аварійних режимів електроенергетичної системи при різноманітності завдання генеруючих потужностей, схем комутації та виду ушкодження.

Схема заміщення електричної мережі і розрахунок її параметрів

Складання схеми заміщення полягає в заміні елементів мережі на вихідній схемі їх опорами для окремих послідовностей. Розрахунки струмів КЗ виконуються без урахування навантажувальних гілок для початкових моментів перехідних процесів, тому динамічні (генератори) вводяться в схеми заміщення надперехідними параметрами.

Активні опори в високовольтних мережах і потужних генеруючих гілках мають незначну питому вагу і їх не враховують в схемах заміщення, і приймають

$$\underline{Z} = R + jX = 0 + jX$$

Тобто повний опір з урахуванням того, що активним нехтуємо дорівнює індуктивному опору.

Не враховують поперечні ємності ліній протяжністю менше 200-250 км (напруга 110-220 кВ) і 150 км (напруга 330-750 кВ).

Приймають рівність опорів в схемах прямої та зворотної послідовностей, тому що шляхи циркуляції струмів цих послідовностей одні й ті ж. Електрична схема заміщення нульової послідовності відмінна від схем прямої та зворотної послідовності, оскільки шляхи протікання струмів в цих послідовностях різні

(для схеми нульової послідовності значною мірою визначається з'єднанням обмоток трансформаторів та їх режим роботи).

Розрахунки ведуться в іменованих одиницях, опори даються в Ом, при цьому опори гілок різних ступенів трансформації призводять до середньо номінальної напруги елемента, що захищається, тобто до 115 кВ.

ПРИКЛАД

Розрахувати аварійні режими для розрахунку уставок релейного захисту генератора G1 (рис. 1.1). Розрахунок провести вручну в іменованих одиницях.

Вихідні дані

Технічні характеристики елементів ЕЕС:

генератори G1, G2: Т-12-2У3;

трансформатори T1, T2: ТД-16000/35; T3: ТДН-10000/35;

лінії електропередач W1: ОАБ-35-3х70, $l=10$ км; W2: АС 70/11, $l=10$ км;

реактор LR: РБ-10-630-0,4У3.

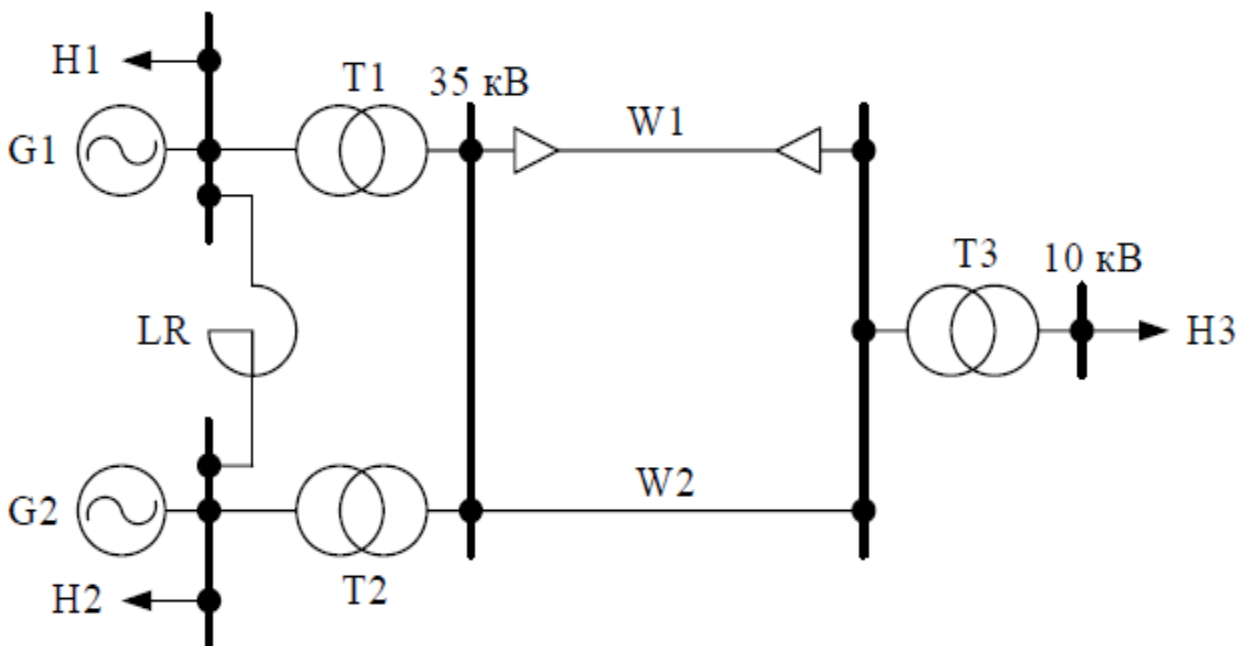


Рис. 1.1 Принципова схема електричної мережі

РОЗВ'ЯЗАННЯ

Визначення параметрів схеми заміщення:

- генераторів

$$X_1 = X_2 = X_d'' \frac{U_{cp}^2}{S_{НОМ}} = 0,131 \frac{10,5^2}{15} = 0,96 \text{ Ом},$$

де X_d'' - надперехідний індуктивний опір генератора, у.о.,

U_{cp} - середньономінальна напруга елемента, що захищається, кВ,

$S_{НОМ}$ - номінальна потужність генератора, МВА.

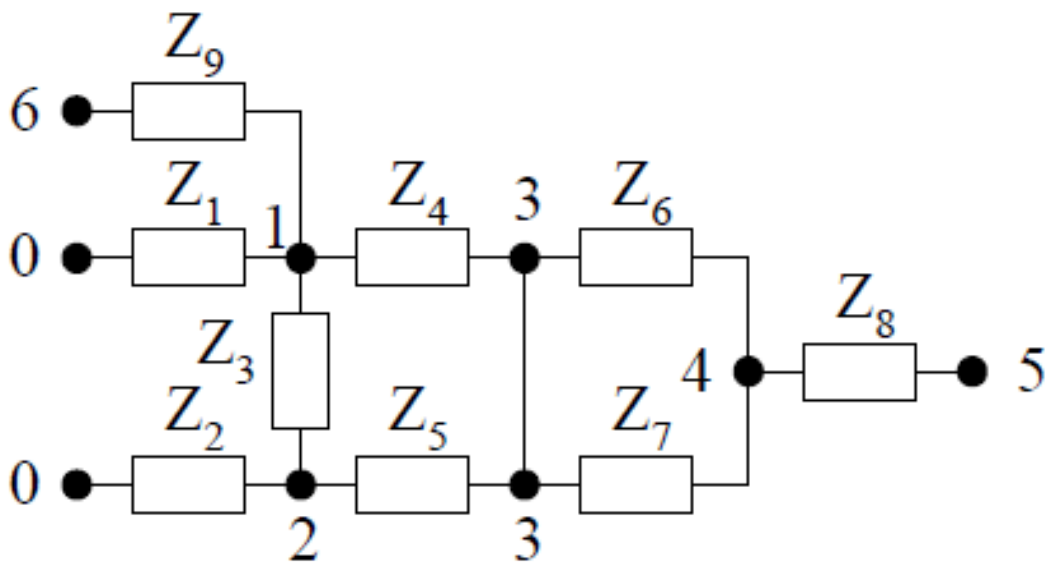


Рис. 1.2 Схема заміщення ЕЕС

- реактора

$$X_3 = X_{LR} \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,4 \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,4 \text{ Ом},$$

де X_{LR} - індуктивний опір реактора, Ом,

$U_{срн}$ - середньономінальна напруга реактора, кВ.

- трансформаторів Т 4 і Т 8

$$X_4 = X_5 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{ср}^2}{S_{НОМ}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{16} = 0,55 \text{ Ом},$$

де $u_k \%$ - напруга короткого замикання трансформатора, %,

$S_{НОМ}$ - номінальна потужність трансформатора, МВА.

$$X_8 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{ср}^2}{S_{НОМ}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{10} = 0,88 \text{ Ом}$$

- ліній електропередач

$$R_6 = R_{1*} \cdot 1 \cdot \left(\frac{U_{ср}}{U_{срн}} \right)^2 = 0,443 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,36 \text{ Ом},$$

де R_{1*} - питомий активний опір лінії струмам прямої послідовності, Ом/км,

1- довжина лінії електропередачі, км,

$U_{срн}$ - середньономінальна напруга лінії, кВ.

$$X_6 = X_{1*} \cdot 1 \cdot \left(\frac{U_{ср}}{U_{срн}} \right)^2 = 0,137 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,11 \text{ Ом},$$

де X_{1*} - питомий індуктивний опір лінії струмам прямої послідовності, Ом/км.

Повний опір лінії електропередачі W_6

$$Z_6 = 0,36 + j0,11 = 0,38 \cdot e^{j16,99^\circ} \text{ Ом}.$$

Аналогічно визначаємо параметри схеми заміщення ліній електропередачі W_7

$$R_7 = R_{1^*} \cdot 1 \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,428 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,34 \text{ Ом};$$

$$X_7 = X_{1^*} \cdot 1 \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,432 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,35 \text{ Ом};$$

$$Z_6 = 0,34 + j0,35 = 0,49 \cdot e^{j45,83^\circ} \text{ Ом.}$$

Розрахунок струмів короткого замикання:

Для розрахунку релейного захисту визначаються струми в максимальному й мінімальному режимах роботи ЕЕС.

Розрахунок струмів КЗ в максимальному режимі у вузлі 3:

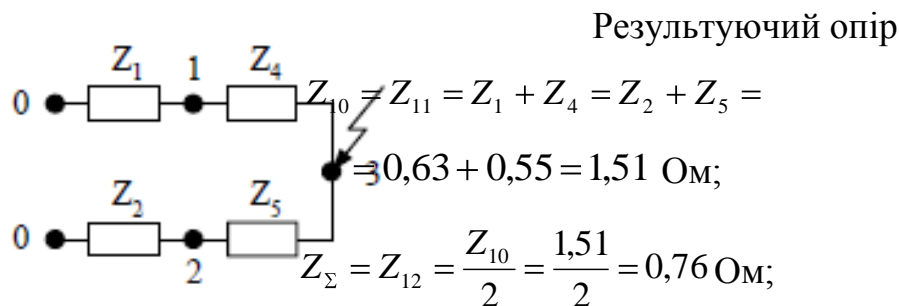


Рис. 1.3 Схема заміщення електричної мережі для точки КЗ 3

$$I_{к3\max}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,76} = 7,98 \text{ кА};$$

$$I_{к3\max}^{(3)} = \frac{I_{к3\max}^{(3)}}{2} = \frac{7,98}{2} = 3,99 \text{ кА.}$$

Мінімальний режим передбачає собою виконання трьох умов:

- відключення генераторів в еквівалентній системі

$$X_{c \min} = (1,3 \div 2,0) \cdot X_{c \max};$$

- відключення генераторів на електричній станції полягає в зниженні потужності генераторів в два рази;
- відключення одного з паралельно працюючих ланцюгів лінії електропередачі, розмикання замкнутої електричної мережі шляхом відключення вимикача в кінці наступного за елементом ділянки, що захищається.

Розрахунок струмів КЗ в мінімальному режимі в вузлі 3:

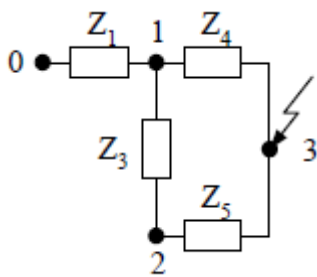


Рис. 1.4 Схема заміщення електричної мережі для розрахунку струмів КЗ в мінімальному режимі ЕЕС.

Результуючий опір

$$Z_{10} = Z_3 + Z_5 = 0,4 + 0,55 = 0,95 \text{ Ом};$$

$$Z_{11} = \frac{Z_4 \cdot Z_{10}}{Z_4 + Z_{10}} = \frac{0,55 \cdot 0,95}{0,55 + 0,95} = 0,35 \text{ Ом};$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{12} = Z_1 + Z_{11} = 0,96 + 0,35 = 1,31 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{кЗmax}}^{(2)} = \frac{U_{cp}}{2 \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{10,5}{2 \cdot 1,31} = 4,01 \text{ кА.}$$

Розділ 2 РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Згідно з правилами пристроїв електроустановок (ППЕ) релейний захист ліній електропередачі повинна забезпечувати мінімально допустимий час відключення короткого замикання, діяти селективно і володіти чутливістю, не менше допустимої, бути простою і надійною.

Для визначення необхідності застосування швидкодіючих захистів слід розрахувати залишкові напруги при трифазному короткому замиканні на початку лінії при КЗ в кінці лінії. Якщо при цьому виді замикання значення залишкової напруги на шинах підстанції менше 60% від номінальної напруги, то для цієї лінії необхідно передбачити основний захист без витримки часу.

Резервним захистом називають захист, передбачений для роботи замість основного захисту даного елемента при її відмові або виведенні з роботи, а так само замість захистів суміжних елементів при їх відмові або при відмовах вимикачів цих елементів (відповідно близьке і далеке резервування).

Функцію резервного захисту від замикань на землю виконує двоступеневий дистанційний захист і двоступеневий струмовий захист нульової послідовності резервного комплекту.

Для ближнього резервування передбачається підключення ланцюгів змінного струму кожного комплекту захисту від різних вторинних обмоток трансформаторів струму, а також підключення ланцюгів постійного струму кожного комплекту захистів через різні автомати постійного струму, оперативні ланцюги реле струму пристрої резервування відмови вимикача (ПРВВ) і схема ПРВВ від загального автомата.

ПРИКЛАД 2.1

Розрахувати захист лінії W2 від міжфазних та зовнішніх КЗ, лінія електропередачі W1 відключена (рис. 2.1).

Вихідні дані

Технічні характеристики елементів ЕЕС:

генератори G1, G2: Т-12-2У3;

трансформатори Т1, Т2: ТД-16000/35; Т3: ТДН-10000/35;

лінії електропередач W1: ОАБ-35-3х70, l=10 км; W2: АС 70/11, l=10 км;

реактор LR: РБ-10-630-0,4У3.

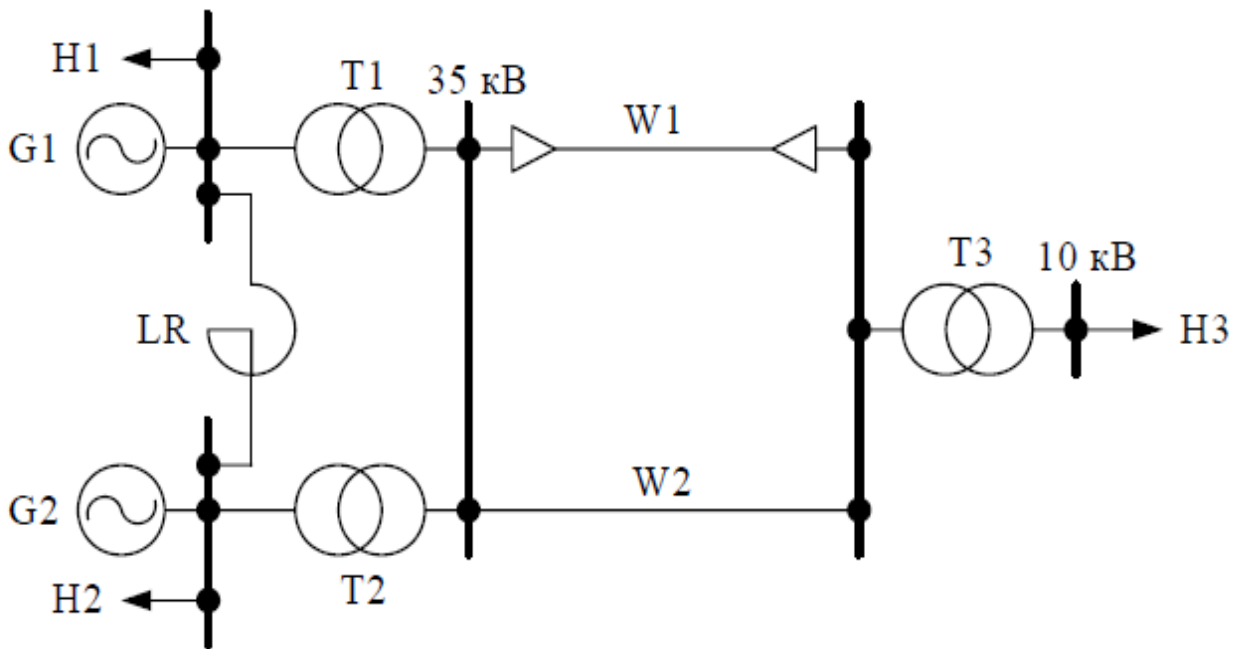


Рис. 2.1 Принципова схема електричної мережі

РОЗВ'ЯЗАННЯ

Коефіцієнт трансформації трансформатора струму

$$I_{W2} = \frac{S_{нагр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}} \cdot \frac{Z_6}{Z_6 + Z_7} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 37} \cdot \frac{0,38}{0,38 + 0,49} = 0,068 \text{ кА};$$

$$I_{W2} = j \cdot F = 1,3 \cdot 70 = 91 \text{ А.}$$

$$K_I = \frac{91}{5}, \text{ приймаємо рівним } \frac{100}{5}.$$

Згідно ППЕ, від міжфазних КЗ застосуємо струменеву відсічку

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = K_H \cdot I_{\kappa 4 \max}^{(3)} = 1,1 \cdot 0,84 = 0,92 \text{ кА},$$

$$\text{де } I_{\kappa 4 \max}^{(3)} = 2,97 \cdot \frac{10,5}{37} = 0,84 \text{ кА}.$$

- коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\kappa 3 \min}^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{1,14}{0,92} = 1,24 < 2$$

$$\text{де } I_{\kappa 3 \min}^{(2)} = 4,01 \cdot \frac{10,5}{37} = 1,14 \text{ кА}.$$

Розрахунок комбінованої відсічки

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = \frac{I_{\kappa 4 \min}^{(2)}}{K_{\text{чI}}} = \frac{0,88}{1,5} = 0,58 \text{ кА};$$

$$I_{c3} = \frac{K_H \cdot K_{c3}}{K_B} \cdot I_{\text{раб max}} = \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,85} \cdot 0,091 = 0,13 \text{ кА}$$

Більший I_{c3} приймаємо за основу.

- первинна напруга спрацьовування захисту

$$U_{\text{ост}} = \sqrt{3} \cdot I_{c3} \cdot (Z_{W2} + Z_{T3}) = \sqrt{3} \cdot 0,58 \cdot 15,85 = 15,92 \text{ кВ},$$

$$\text{де } Z_{W2} + Z_{T3} = (0,34 + j0,35 + j0,88) \cdot \frac{10,5^2}{37^2} = 15,85 \cdot e^{j74,55^\circ} \text{ Ом}.$$

$$U_{c3} = \frac{U_{\text{ост}}}{K_H} = \frac{15,92}{1,2} = 13,27 \text{ кВ}.$$

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{100/5} \cdot 580 = 29 \text{ А.}$$

- вторинна напруга спрацьовування реле

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{K_U} = \frac{13270}{35000/100} = 35,86 \text{ В.}$$

Тип реле - РТ-40/50, РН-54/48, уставку виставляємо повідцем на реле.

- коефіцієнт чутливості по напрузі

$$K_{чU} = \frac{U_{c3}}{\sqrt{3} \cdot I_{к4 \max}^{(3)} \cdot Z_{W2}} = \frac{13,27}{\sqrt{3} \cdot 0,84 \cdot 6,08} = 1,5 \geq 1,4.$$

Згідно ППЕ, розрахунок максимального струмового захисту від зовнішніх КЗ.

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = \frac{K_H \cdot K_{c3}}{K_B} \cdot I_{\text{раб max}} = \frac{1,2 \cdot 2,5}{0,8} \cdot 0,091 = 0,341 \text{ кА.}$$

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{100/5} \cdot 341 = 17,05 \text{ А.}$$

Тип реле - РТ-40/20, уставку виставляємо повідцем на реле.

- коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\kappa 4 \text{ min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,88}{0,341} = 2,60 > 1,5; \quad K_{\text{ч}} = \frac{I_{\kappa 5 \text{ min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,58}{0,341} = 1,70 > 1,25.$$

- час спрацьовування захисту

$$t_{\text{сз}} = t_{\text{сз ТЗ}} + \Delta t.$$

ПРИКЛАД 2.2

Розрахувати релейний захист лінії W1 (рис. 2.2) від міжфазних коротких замикань.

Вихідні дані

G1 і G2.....CB-1070/145-52;

T1 і T2.....ТДЦ-125000/110;

W1 і W3.....AC120/19,1 = 100 км;

W2.....AC150/24,1 = 100 км;

GS..... $S_{GS} = 1500 \text{ MB} \cdot \text{A}$, $X_{1*} = 0,23$, $X_{0*} = 0,35$;

H1 і H2..... $S_{\text{НАГР}} = 0,1 \cdot S_{\text{ГЕН}}$.

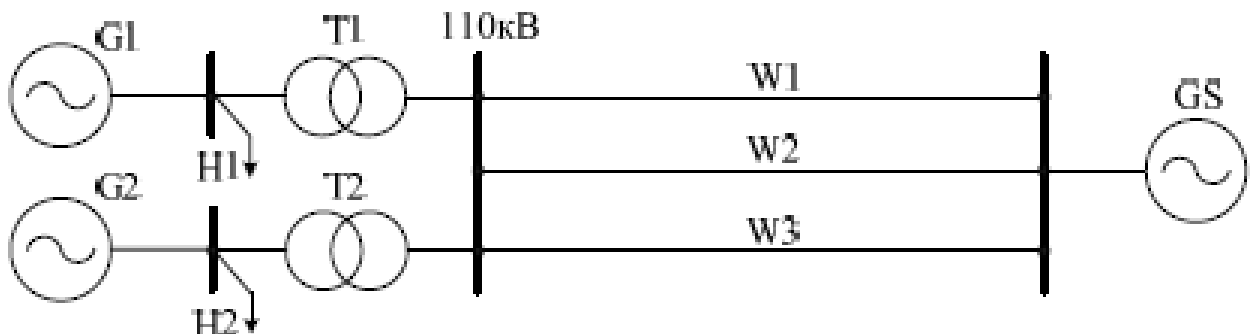


Рис. 2.2 Схема електричної мережі

РОЗВ'ЯЗАННЯ

Параметри схеми заміщення

Опір системи визначається за формулою, Ом:

$$X_{GS} = X_{C^*} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{HGS}},$$

де X_{C^*} - опір системи, у.о.,

S_{HGS} - номінальна потужність системи, МВА.

$$X_1 = X_2 = X_d'' \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{HG}} = 0,22 \cdot \frac{115^2}{100} = 29,1 \text{ Ом};$$

$$X_3 = X_4 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{HT}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{125} = 11,11 \text{ Ом};$$

$$X_5 = X_7 = X_{1^*} \cdot \frac{U_{cp}^2}{U_{cpH}^2} = 0,427 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 42,7 \text{ Ом};$$

$$R_5 = R_7 = R_{1^*} \cdot \frac{U_{cp}^2}{U_{cpH}^2} = 0,249 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 24,9 \text{ Ом};$$

$$X_6 = 0,42 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 42,0 \text{ Ом};$$

$$R_6 = 0,198 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 19,8 \text{ Ом};$$

$$X_8 = X_{1^*} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{HGS}} = 0,23 \cdot \frac{115^2}{1500} = 2,02 \text{ Ом}.$$

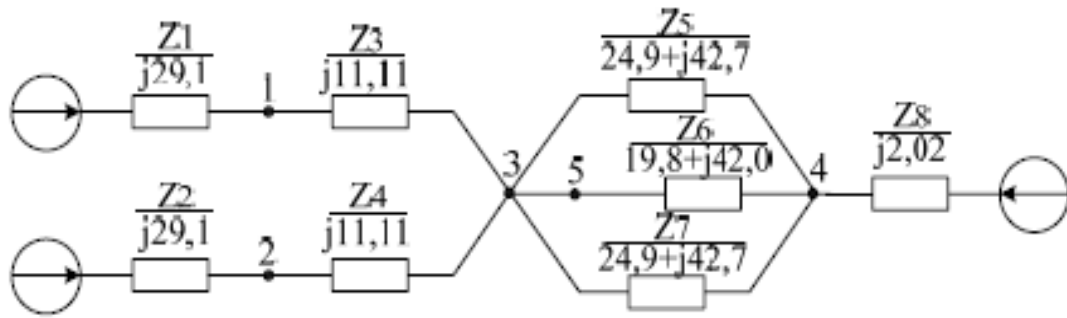


Рис. 2. 3. Схема заміщення електричної мережі

Розрахунок струмів КЗ

При КЗ у вузлі 5, в максимальному режимі (розмикаємо лінію W2 у вузлі 3, тобто відключаємо гілку 3-5 - каскадний режим) знайдемо струм трифазного К по лінії W2 ($I_{\kappa 5 \max 5-4}^{(3)}$).

$$Z_9 = \frac{Z_1 + Z_3}{2} + \frac{Z_5}{2} = \frac{(j29,1 + j11,11)}{2} + \frac{(24,9 + j42,7)}{2} =$$

$$= 12,47 + j41,44 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{Z_9 \cdot Z_8}{Z_9 + Z_8} + Z_6 = \frac{(12,47 + j21,34) \cdot j2,02}{(12,47 + j21,34) + j2,02} + (19,8 + j42,0) =$$

$$= 19,82 + j43,93 = 48,19 \cdot e^{j65,7^\circ} \text{ Ом};$$

$$I_{\kappa 5 \max}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{ЭКВ}}|} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 48,19} = 1380 \text{ А};$$

$$I_{\kappa 5 \max 5-4}^{(3)} = I_{\kappa 5 \max}^{(3)} \cdot \frac{Z_8}{Z_8 + Z_9} = 60,72 \text{ А}.$$

Значення інших струмів зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 Результати розрахунків режимів КЗ

Режим	Вид КЗ	Вузол КЗ	Гілка	Значення струму КЗ, А
МАХ	(3)	5	3-4 (W1)	30,36
	(3)	5	5-4	1380
	(3)	1	3-4 (W1)	636,88
	(3)	1	1-3	2799,5
МІН	(3)	4	3-4 (W1)	524,1
	(2)	3	3-4 (W1)	758
	(2)	5	3-4 (W1)	26,29
	(2)	5	5-4	1195,1

Розрахунок першого ступеня дистанційного захисту

• первинний опір спрацьовування захисту

а) відбудова від КЗ в кінці лінії, що захищається

$$Z_{c3W1}^I = K_{H1} \cdot Z_{W1} = 0,87 \cdot (24,9 + j42,7) = 21,66 + j37,15 \text{ Ом},$$

де $K_{H1} = 0,87$ – коефіцієнт надійності, у.о.

б) відбудова від КЗ в кінці паралельної лінії в каскаді

$$\begin{aligned} Z_{c3W1}^I &= \left[K_{H1} \cdot \left(Z_{W1} + \frac{Z_{c3W2}^I \cdot K_{H2}}{K_{TP3}} \right) \right] \cdot d = \\ &= \left[0,87 \cdot \left((24,9 + j42,7) + \frac{(17,22 + j36,53) \cdot 0,44}{0,022} \right) \right] \cdot 0,93 = \\ &= 342,28 + j716,12 = 793,41 \cdot e^{j64,45^\circ} \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де $K_{H2} = 0,44$ – коефіцієнт надійності, у.о.,

$$Z_{c3W2}^I = K_{H1} \cdot Z_{W2} = 0,87 \cdot (19,8 + j42,0) = 17,22 + j36,53 \text{ Ом},$$

K_{TP3} - коефіцієнт струморозподілення, у.о.,

$$K_{TP3} = \frac{I_{\kappa5 \max 3-4}^{(3)}}{I_{\kappa5 \max}^{(3)}} = \frac{30,36}{1380} = 0,022,$$

$$d = \frac{\sin \varphi_3}{\sin \varphi_{MЧ}},$$

$$\varphi_{MЧ} = 75^{\circ},$$

$$d = \frac{\sin 64,45^{\circ}}{\sin 75^{\circ}} = 0,93.$$

Менше з двох Z_{c3W1}^I приймаємо за розрахункове, тобто

$$Z_{c3W1}^I = 21,66 + j37,15 = 43,0 \cdot e^{j59,75^{\circ}} \text{ Ом.}$$

• вторинний опір спрацьовування реле

$$Z_{cp} = Z_{c3W1}^I \cdot \frac{K_I}{K_U},$$

де $K_U = \frac{U_{ном}}{100} = \frac{110000}{100},$

$$K_I = \frac{I_{нагр W1}}{5}.$$

а) знаходимо $I_{нагр W1}$ через економічну щільність струму

$$I_{нагр W1} = j \cdot F = 1,3 \cdot 120 = 156 \text{ А,}$$

де j – економічна щільність струму, рівна $1,3 \text{ А/мм}^2$,

F – площа поперечного перерізу дроту, рівна 120 мм^2 .

б) знаходимо $I_{нагр W1}$ через перетік потужності

$$I_{нагр W1} = \frac{S_{перет}^{W1}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}};$$

$$\frac{S_{\text{перет}}^{W1}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{cp}}} = \sum (S_{\text{нг}} - S_{\text{нагр}}) \cdot \frac{Z_{W2}}{\sqrt{(Z_{W1} \cdot Z_{W3}) / (Z_{W1} + Z_{W3}) + Z_{W2}}} = 117 \text{ МВ А};$$

$$I_{\text{нагр } W1} = \frac{117000}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 2} = 293,7 \text{ А.}$$

Приймаємо $K_I = \frac{300}{5}$.

$$Z_{\text{cp}} = 43,0 \cdot \frac{300/5}{110000/100} = 2,34 \text{ Ом.}$$

- Виставляємо уставку на реле

$$N = \frac{Z_{\text{учmin}}}{Z_{\text{cp}}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{2,34} \cdot 100\% = 21,36.$$

- Перевірка чутливості

$$K_{\text{ч}W1}^I = \frac{I_{\text{к4 min 3-4}}^{(3)} \cdot K_{\text{cx}}}{K_I \cdot I_{\text{TP}}} \geq 1,3,$$

де K_{cx} - коефіцієнт схеми, рівний 1 у.о.,

I_{TP} - струм точної роботи, 3А.

$$K_{\text{ч}W1}^I = \frac{524,1 \cdot 1}{300/5 \cdot 3} = 2,91 \geq 1,3.$$

Розрахунок другого ступеня дистанційного захисту

- первинний опір спрацьовування захисту
 - а) відбудова від КЗ за трансформатором (для захисту 4-3)

$$Z_{c3W1}^{II} = K_{H1} \cdot \left(Z_{W1} + \frac{Z_T}{K_{TP3}} \right) \cdot d = \left(24,9 + j42,7 + \frac{11,11}{0,22} \right) \cdot 1 =$$

$$= 21,66 + j81,08 = 83,92 \cdot e^{j75^\circ} \text{ Ом},$$

де K_{TP2} - коефіцієнт струморозподілення, у.о.,

$$K_{TP2} = \frac{I_{\kappa1 \max 3-4(W1)}^{(3)}}{I_{\kappa1 \max 1-3}^{(3)}} = \frac{636,88}{2799,5} = 0,22,$$

$$d = \frac{\sin 75^\circ}{\sin 75^\circ} = 1.$$

б) відбудова від Z_{c3} паралельної лінії в каскаді (див. перший ступень)

в) відбудова від Z_{c3} лінії, що захищається

$$Z_{c3W1}^{II} = K_{H4} \cdot Z_{W1} = 1,25 \cdot (24,9 + j42,7) = 31,12 + j53,37 \text{ Ом}.$$

Менше з двох Z_{c3W1}^I приймаємо за розрахункове, тобто

$$Z_{c3W1}^{II} = 31,12 + j53,37 = 61,78 \cdot e^{j59,75^\circ} \text{ Ом}.$$

• вторинний опір спрацьовування реле

$$Z_{cp} = Z_{c3W1}^{II} \cdot \frac{K_I}{K_U} = 61,78 \cdot \frac{300 / 5}{110000 / 100} = 3,37 \text{ Ом}.$$

• виставляємо уставку на реле

$$N = \frac{Z_{ycm \min}}{Z_{cp}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{3,37} \cdot 100\% = 14,83.$$

• перевірка чутливості

$$а) K_{\psi W1}^{II} = \frac{Z_{c3W1}^{II}}{Z_{W1}} \cdot \frac{\sin \varphi_{M\psi}}{\sin \varphi_3} = \frac{61,78}{49,43} \cdot 1 = 1,25 \leq 1,5;$$

$$\text{б) } K_{\text{чW1}}^I = \frac{I_{\text{к4 max3-4}}^{(3)} \cdot K_{\text{сх}}}{K_I \cdot I_{\text{TP}}} = \frac{524,1 \cdot 1}{300 / 5 \cdot 3} = 2,91 \geq 1,5.$$

Розрахунок третього ступеня дистанційного захисту

- первинний опір спрацьовування захисту
- відбудова від опору навантаження

$$Z_{\text{сзW1}}^{\text{II}} = \left(\frac{0,9 \cdot U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot K_B \cdot K_H \cdot \cos(\varphi_{\text{MЧ}} - \varphi_H)} \right) \cdot d =$$

$$= \left(\frac{0,9 \cdot 110000}{\sqrt{3} \cdot 293,7 \cdot 1,05 \cdot 1,1 \cdot \cos 49^\circ} \right) \cdot 0,44 = 256,83 \text{ Ом},$$

де K_H - коефіцієнт надійності, рівний 1,1 у.о.,

K_B - коефіцієнт повернення, рівний 1,05 у.о.,

$\varphi_{\text{MЧ}}$ - кут максимальної чуттєвості реле, рівний 75° ,

φ_H - кут навантаження, рівний 26° ,

$$d = \frac{\sin \varphi_H}{\sin \varphi_{\text{MЧ}}} = \frac{\sin 26^\circ}{\sin 75^\circ} = 0,44.$$

- вторинний опір спрацьовування реле

$$Z_{\text{ср}} = Z_{\text{сзW1}}^{\text{III}} \cdot \frac{K_I}{K_U} = 256,83 \cdot \frac{300 / 5}{110000 / 100} = 14,0 \text{ Ом}.$$

- виставляємо уставку на реле

$$N = \frac{Z_{\text{усmmin}}}{Z_{\text{ср}}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{14,0} \cdot 100\% = 3,57.$$

- перевірка чутливості

$$a) K_{\varphi W1}^{III} = \frac{Z_{c3W1}^{III}}{Z_{W1}} \cdot \frac{\sin \varphi_{M\varphi}}{\sin \varphi_H} = \frac{256,83}{49,43} \cdot \frac{\sin 75^\circ}{\sin 26^\circ} = 11,445 \geq 1,5;$$

$$б) K_{\varphi W1}^I = \left(\frac{Z_{c3W1}^{III}}{Z_{W1} + (Z_{W2} / K_{TP4})} \right) \cdot d = \left(\frac{256,83}{49,43 + (46,43 / 0,022)} \right) \cdot 0,44 = \\ = 0,05 \leq 1,25,$$

де K_{TP4} - коефіцієнт струморозподілення, у.о.,

$$K_{TP4} = \frac{I_{\kappa 5 \min 3-4(W1)}^{(2)}}{I_{\kappa 5 \min 4-5}^{(2)}} = \frac{26,29}{1195,1} = 0,022.$$

$$в) K_{\varphi W1}^{III} = \frac{I_{\kappa 3 \min 3-4}^{(2)} \cdot K_{cx}}{K_I \cdot I_{TP}} = \frac{758 \cdot 1}{300/5 \cdot 2} = 6,31 \geq 1,5.$$

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК АВТОМАТИЧНИХ УСТАВОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ГЕНЕРАТОРІВ

Основні умови вибору типів захистів

Ці умови визначають розрахункові режими і вимоги, які висуваються до захисту в залежності від параметрів генераторів.

Для вибору струму спрацьовування захисту за умовами відбудови від струму небалансу при зовнішніх КЗ розглядається трифазне КЗ на шинах генераторної напруги. (Іноді в якості розрахункового рекомендується режим несинхронного включення генератора, проте таке включення генератора практично не застосовується). Чутливість захисту перевіряється при двофазному КЗ на виводах генератора в режимі його опробування.

Струм спрацьовування захисту узгоджується з номінальним струмом генератора в залежності від його потужності.

При потужності генератора до 50 МВт на практиці використовується схема диференціального захисту із застосуванням токового реле РТ-40 і додаткового опору 10 Ом в диференціальному ланцюзі захисту. При нових проектних рішеннях рекомендується реле типу РНТ-565.

При потужності генератора до 100 МВт використовуються диференціальні реле типу РНТ-565, рекомендується для підвищення чутливості захисту приймати уставку спрацьовування від 0,5 до 0,6 номінального струму генератора. Для виключення помилкового спрацьовування захисту при обриві в її струмових ланцюгах (якщо це можливо в особливих умовах експлуатації та при забезпеченні необхідної чутливості) струм спрацьовування може бути збільшений до $I_{сз} = (1,3 - 1,4)I_{ГНОМ}$.

Для генераторів з форсованим охолодженням потужністю понад 100 МВт рекомендується знижувати струм спрацьовування захисту до $0,1 \cdot I_{ГНОМ}$. З цією метою в схемі диференційного захисту використовується реле з магнітним гальмуванням типу ДЗТ-11.

ПРИКЛАД 3.1

Розрахувати захист генератора G1 від міжфазних КЗ (рис. 3.1).

Вихідні дані

Технічні характеристики елементів ЕЕС:

генератори G1, G2: Т-12-2У3;

трансформатори T1, T2: ТД-16000/35; T3: ТДН-10000/35;

лінії електропередач W1: ОАБ-35-3х70, l=10 км; W2: АС 70/11, l=10 км;

реактор LR: РБ-10-630-0,4У3.

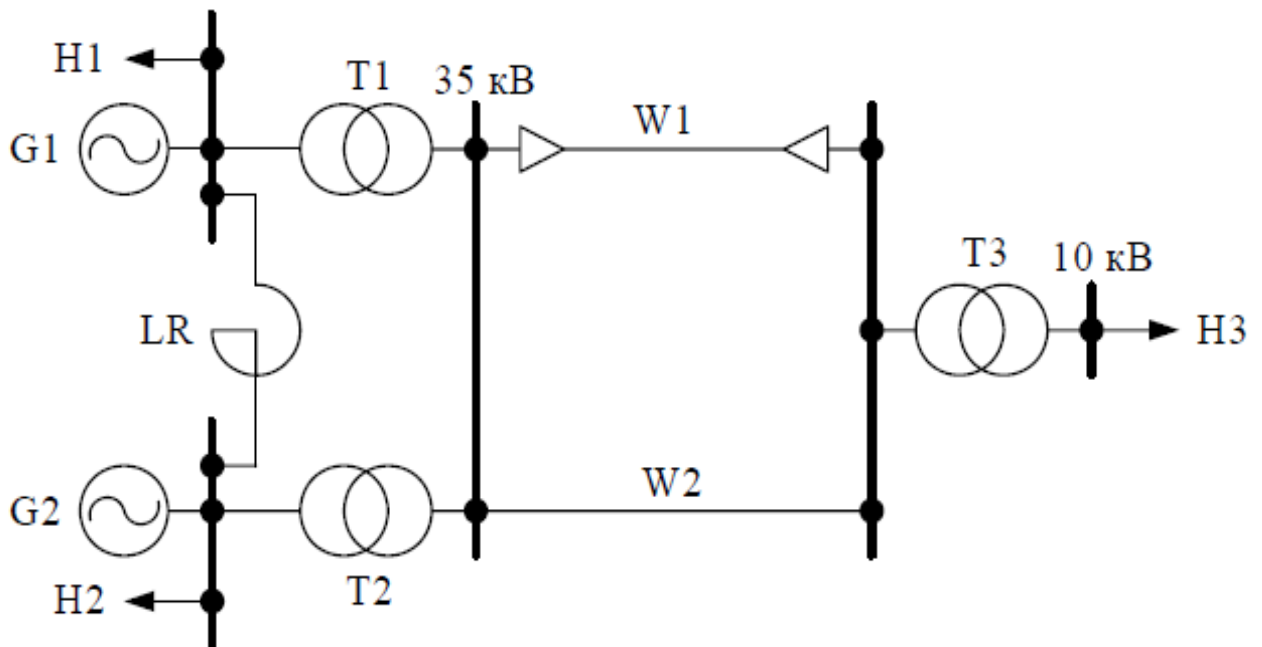


Рис. 3.1 Принципова схема електричної мережі

РОЗВ'ЯЗАННЯ

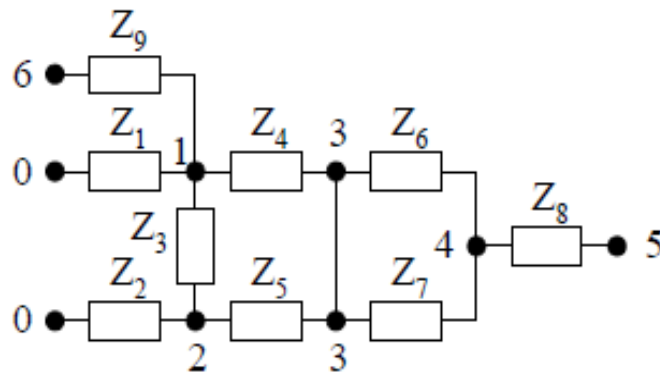


Рис. 3.1 Схема заміщення електричної мережі для розрахунку струмів КЗ

Визначення параметрів схеми заміщення:

$$X_1 = X_2 = X_d'' = \frac{U_{cp}^2}{S_{НОМ}} = 0,131 \frac{10,5^2}{15} = 0,96 \text{ Ом},$$

де X_d'' - надперехідний індуктивний опір генератора, у.о.,

U_{cp} - середньономінальна напруга елемента, що захищається, кВ,

$S_{НОМ}$ - номінальна потужність генератора, МВА.

$$X_3 = X_{LR} \left(\frac{U_{cp}}{U_{срн}} \right)^2 = 0,4 \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,4 \text{ Ом},$$

де X_{LR} - індуктивний опір реактора, Ом,

$U_{срн}$ - середньономінальна напруга реактора, кВ.

$$X_4 = X_5 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{НОМ}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{16} = 0,55 \text{ Ом},$$

де $u_k \%$ - напруга короткого замикання трансформатора, %,

$S_{НОМ}$ - номінальна потужність трансформатора, МВА.

$$R_6 = R_{1^*} \cdot l \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,443 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,36 \text{ Ом},$$

де R_{1^*} - питомий активний опір лінії струмам прямої послідовності, Ом/км,

l - довжина лінії електропередачі, км,

U_{cpH} - середньономінальна напруга лінії, кВ.

$$X_6 = X_{1^*} \cdot l \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,137 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,11 \text{ Ом},$$

де X_{1^*} - питомий індуктивний опір лінії струмам прямої послідовності, Ом/км.

$$Z_6 = 0,36 + j0,11 = 0,38 \cdot e^{j16,99^\circ} \text{ Ом}.$$

$$R_7 = R_{1^*} \cdot l \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,428 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,34 \text{ Ом};$$

$$X_7 = X_{1^*} \cdot l \cdot \left(\frac{U_{cp}}{U_{cpH}} \right)^2 = 0,432 \cdot 10 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,35 \text{ Ом};$$

$$Z_7 = 0,34 + j0,35 = 0,49 \cdot e^{j45,83^\circ} \text{ Ом}.$$

$$X_8 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{Hом}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{10} = 0,88 \text{ Ом}.$$

$$X_9 = X_1 = 0,08 \cdot \left(\frac{U_{cp}^2}{U_{cpH}} \right) = 0,08 \cdot 6 \cdot \left(\frac{10,5^2}{10,5} \right) = 0,48 \text{ Ом}.$$

Розрахунок струмів короткого замикання:

Для розрахунку релейного захисту визначаються струми в максимальному й мініальному режимах.

Розрахунок струмів КЗ в максимальному режимі у вузлі 3:

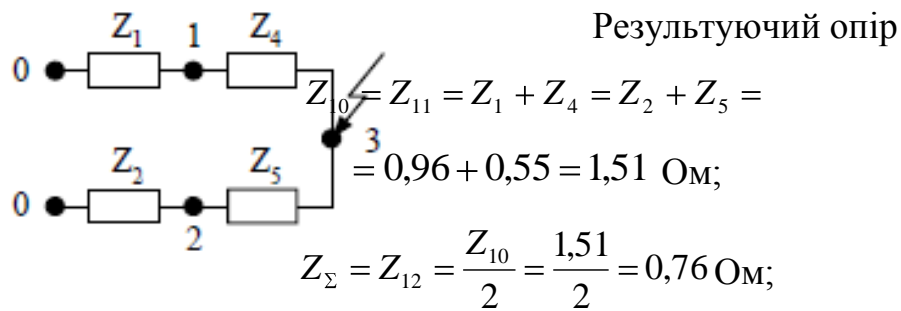


Рис. 3.2 Схема заміщення електричної мережі для точки КЗ 3

$$I_{\text{кЗmax}}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,76} = 7,98 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кЗmax}}^{(3)} = \frac{I_{\text{кЗmax}}^{(3)}}{2} = \frac{7,98}{2} = 3,99 \text{ кА}.$$

Мінімальний режим передбачає собою виконання трьох умов:

- відключення генераторів в еквівалентній системі

$$X_{c \text{ min}} = (1,3 \div 2,0) \cdot X_{c \text{ max}};$$

- відключення генераторів на електричній станції полягає в зниженні потужності генераторів в два рази;

- відключення одного з паралельно працюючих ланцюгів лінії електропередачі, розмикання замкнутої електричної мережі шляхом відключення вимикача в кінці наступного за елементом ділянки, що захищається.

Розрахунок струмів КЗ в мінімальному режимі в вузлі 3:

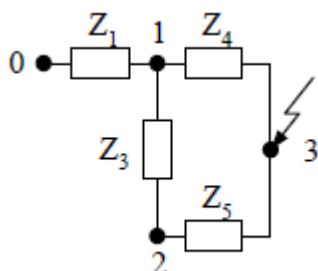


Рис. 1.4 Схема заміщення електричної мережі для розрахунку струмів КЗ в мінімальному режимі ЕЕС.

Результуючий опір

$$Z_{10} = Z_3 + Z_5 = 0,4 + 0,55 = 0,95 \text{ Ом};$$

$$Z_{11} = \frac{Z_4 \cdot Z_{10}}{Z_4 + Z_{10}} = \frac{0,55 \cdot 0,95}{0,55 + 0,95} = 0,35 \text{ Ом};$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{12} = Z_1 + Z_{11} = 0,96 + 0,35 = 1,31 \text{ Ом}$$

$$I_{к3\max}^{(2)} = \frac{U_{cp}}{2 \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{10,5}{2 \cdot 1,31} = 4,01 \text{ кА.}$$

Значення інших струмів зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 Результати розрахунків режимів КЗ

Режим	Вид КЗ	Вузол КЗ	Струм КЗ у вузлі, кА
MAX	(3)	1	6,31
	(3)	3	7,98
	(3)	4	6,81
	(3)	5	3,44
MIN	(3)	1	5,47
	(2)	3	4,01
	(2)	4	3,1
	(2)	5	2,04

Згідно ППЕ, проведемо розрахунок диференціальної відсічки

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{cз} = K_H \cdot I_{HB} = 1,3 \cdot (K_a \cdot K_o \cdot f_I \cdot I_{к1\max}^{(3)}) = 1,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 6,31 = 0,62 \text{ кА,}$$

де K_H - коефіцієнт надійності, рівний 1,3 у.о.,

K_a - коефіцієнт, який враховує перехідний режим, рівний 1,5-2 у.о.,

K_o - коефіцієнт однотипності трансформаторів струму, рівний 0,5 у.о.,

f_I - допустима похибка трансформаторів струму, рівна 0,1 о. е.

$$I_{c3} = K_H \cdot I_{НОМ} = 1,3 \cdot 0,825 = 1,07 \text{ кА},$$

де $I_{НОМ}$ - номінальний струм генератора.

Більший I_{c3} приймаємо за основу.

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{800/5} \cdot 1070 = 6,69 \text{ А},$$

де K_{cx} - коефіцієнт схеми, рівний 1,

K_I - коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Тип реле - РТ-40/10, уставку виставляємо повідцем на реле.

- коефіцієнт чутливості

$$K_{ч} = \frac{I_{к1\min}^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{5,47}{0,62} = 8,82 \geq 2;$$

тобто, захист проходить.

ПРИКЛАД 3.2.

Розрахувати захист генератора G1 від надструмів при зовнішніх КЗ і перевантаження. Вихідні дані прикладу 3.1.(Рис. 3.1).

РІШЕННЯ

Згідно ПУЕ[5], розрахуємо максимальний струмовий захист з комбінованим пуском мінімальної напруги.

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = \frac{K_H \cdot I_{НОМ}}{K_B} = \frac{1,1 + 0,825}{0,85} = 1,07 \text{ кА},$$

де K_B - коефіцієнт повернення, рівний 0,85 о. е.

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{\frac{800}{5}} \cdot 1070 = 6,69 \text{ А.}$$

- тип реле - РТ-40/10, уставку виставляємо повідцем на реле.
- коефіцієнт чутливості:

$$K_{ч} = \frac{I_{k1 \min}^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{5,47}{1,07} = 5,11 \geq 1,5; \quad K_{ч} = \frac{I_{k3 \min}^2}{I_{c3}} = \frac{4,01}{1,07} = 3,74 \geq 1,25.$$

Пусковий орган - реле мінімальної напруги

- первинна напруга спрацьовування захисту

$$U_{c3} = \frac{0,9 \cdot U_{ном}}{K_B \cdot K_H} = \frac{0,9 \cdot 10,5}{1,2 \cdot 1,2} = 6,56 \text{ кВ,}$$

де $U_{ном}$ - номінальна напруга генератора.

- вторинна напруга спрацьовування реле

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{K_U} = \frac{6560}{10500/100} = 62,48 \text{ В,}$$

де K_U - коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

- тип реле - РН-54/200, уставку виставляємо повідцем на реле.
- коефіцієнт чутливості

$$K_{ч} = \frac{U_{вз}}{U_{k2 \max}^{(3)}} = \frac{U_{c3} \cdot K_B}{\sqrt{3} \cdot I_{k2}^{(3)} \cdot X_3} = \frac{6,56 \cdot 1,2}{\sqrt{3} \cdot 6,06 \cdot 0,4} = 1,87 \geq 1,25 ;$$

де $U_{вз}$ - напруга повернення захисту,

$I_{k2}^{(3)}$ - струм, що протікає від місця установки захисту до точки КЗ,

X_3 - опір гілки до точки КЗ.

Пусковий орган - реле максимальної напруги

- первинна напруга спрацьовування захисту

$$U_{c3} = 0,06 \cdot U_{ном} = 0,06 \cdot 10,5 = 0,63 \text{ кВ} .$$

- вторинна напруга спрацьовування реле

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{K_U} = \frac{630}{10500/100} = 6 \text{ В} .$$

- тип реле – РН - 53/60, уставку виставляємо повідцем на реле.
- коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{U_{k3 \text{ min}}^{(2)}}{U_{c3}} = \frac{I_{k3}^{(2)} \cdot X_4}{U_{c3}} = \frac{4,01 \cdot 0,55}{0,63} = 3,50 \geq 1,25 .$$

Захист проходить за чутливістю.

Згідно ПУЕ, від перевантаження застосуємо максимальний струмовий захист.

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{ном} = \frac{1,1}{0,85} \cdot 0,825 = 1,07 \text{ кА} .$$

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{800/5} \cdot 1070 = 6,69 \text{ А} .$$

- тип реле - РТ-40/10, уставку виставляємо повідцем на реле.
- час спрацьовування захисту

$$t_{c3} = t_{c3 \text{ см эл}} + \Delta t$$

де Δt – сходи́нка селективності, рівна 0,4-0,6 с.

Розділ 4 РОЗРАХУНОК АВТОМАТИЧНИХ УСТАВОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Основні умови вибору типу захистів силових трансформаторів

Потужність трансформатора, кількість обмоток і сторін живлення, схема з'єднання обмоток, режим роботи нейтралі є визначальними умовами для вибору типу релейного захисту цього основного обладнання електроенергетичної системи [7,8].

Так поздовжній диференційний захист застосовується для трансформаторів потужністю 6,3 МВА і вище, а також для всіх автотрансформаторів (при потужності трансформатора менше 6,3 МВА застосовується струмова відсічка в поєднанні з МТЗ). Для двообмоткових трансформаторів використовується двоохрелейна схема захисту, для трьохобмоткових трансформаторів і автотрансформаторів – трьохрелейна схема (на стороні нижчої напруги для підвищення чутливості ТТ з'єднуються в повну зірку). Захист виконується з використанням диференційних реле типу РНТ, ДЗТ. Реле типу РНТ-560 забезпечують підвищене відбудовування від перехідних режимів з аперіодичної складової, реле типу ДЗТ-11 - підвищене відбудовування від періодичних струмів небалансу. Реле типу ДЗТ-21 створюють відбудовування від аперіодичних і періодичних струмів небалансу.

Вибір типу реле визначається розрахунком з урахуванням наступних умов. Реле типу РНТ-565 має підвищену відбудовування від струмів небалансу з аперіодичною складовою, в тому числі і при однополярних кидках струму намагнічення трансформатора або автотрансформатора. Такі реле широко експлуатуються, але на підстанціях, які проектуються не рекомендуються до установки, за винятком захисту двообмоткових трансформаторів потужністю менше 25 МВ·А. Реле типу ДЗТ-11 мають магнітне гальмування, що забезпечує відбудовування від періодичних струмів небалансу, в тому числі на трансформаторах з регулюванням напруги під навантаженням (РПН).

Для вибору струму спрацьовування захисту за умовами відбудови від

струму небалансу розглядаються такі режими, при яких струм небалансу буде найбільшим. Вибір розрахункових умов визначається параметрами системи. Для трансформаторів з одностороннім живленням розрахунковими є трифазні КЗ на шинах середнього (СН) і нижчого (НН) напружень (точки К1 і К2, рис. 4.1). При двосторонньому живленні розрахунковим може бути і КЗ на шинах вищої (ВН) напруги (точка К3).

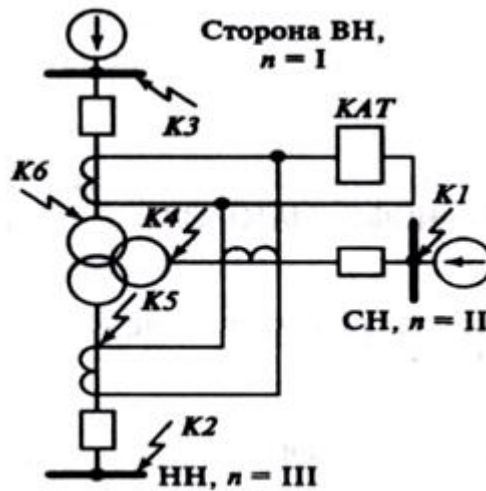


Рис. 4.1. Схема трансформаторної підстанції для визначення місць КЗ при розрахунку уставок релейного захисту трансформаторів

Для перевірки чутливості розглядаються такі режими, при яких чутливість буде мінімальною. При односторонньому живленні коефіцієнт чутливості перевіряється при внутрішньому двофазному КЗ на сторонах СН і НН в мінімальному режимі роботи системи (точки К4 і К5, рис. 4.1). При двосторонньому живленні розрахункової по чутливості може виявитися і однофазне або двофазне КЗ на стороні ВН (точка К6, рис.4.1). Зауважимо, що при декількох трансформаторах на підстанції розрахунковим є режим роздільної роботи. Це справедливо як для перевірки чутливості, так і для вибору струму спрацьовування.

ПРИКЛАД 4.1.

Розрахувати захист трансформатора ТЗ від міжфазних КЗ (рис.3.1).
Вихідні дані елементів електричної мережі аналогічні прикладу 3.1.

РІШЕННЯ

Первинні струми трансформатора

$$I_{1\text{ ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 0,157 \text{ кА}; I_{1\text{ НН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,55 \text{ кА}.$$

Коефіцієнти трансформації трансформаторів струму

$$K_{1\text{ ВН}} = \frac{I_{1\text{ ВН}} \cdot K_{\text{СХ ВН}}}{5} = \frac{157 \cdot \sqrt{3}}{5} = \frac{271,9}{5}, \text{ приймаємо рівним } \frac{300}{5};$$

$$K_{1\text{ НН}} = \frac{I_{1\text{ НН}} \cdot K_{\text{СХ НН}}}{5} = \frac{550 \cdot 1}{5} = \frac{550}{5}, \text{ приймаємо рівним } \frac{600}{5}.$$

Вторинні струми трансформатора

$$I_{2\text{ ВН}} = \frac{I_{1\text{ ВН}} \cdot K_{\text{СХ ВН}}}{K_{1\text{ ВН}}} = \frac{157 \cdot \sqrt{3}}{300/5} = 4,53 \text{ А}; I_{2\text{ НН}} = \frac{I_{1\text{ НН}} \cdot K_{\text{СХ НН}}}{K_{1\text{ НН}}} = \frac{550 \cdot 1}{600/5} = 4,58 \text{ А}.$$

Сторона нижчої напруги - основна, так як $I_{2\text{ НН}} > I_{2\text{ ВН}}$.

Згідно ПУЕ, проведемо розрахунок **диференційного відсічення**:

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{\text{СЗ}} = 3,5 \div 5 \cdot I_{\text{НОМ}} = 3,5 \cdot 0,550 = 1,925 \text{ кА};$$

- попередній коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к 5 min}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ}}} = \frac{2,04}{1,925} = 1,06 < 2$$

Захист недостатньо чутливий, тому застосуємо більш складний тип захисту - **диференційний захист з реле РНТ-565**.

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{c3} = K_H \cdot I_{НОМ} = 1,3 \cdot 0,550 = 0,715 \text{ кА} ;$$

$$I_{c3} = K_H \cdot I_{НБ} = 1,3 \cdot 0,757 = 0,984 \text{ кА} ;$$

$$I'_{НБ} = K_a \cdot K_o \cdot f_1 \cdot I_{к5 \text{ max}}^{(3)} = 1 \cdot 0,1 \cdot 3,44 = 0,344 \text{ кА} ;$$

$$I''_{НБ} = \frac{\Delta U\%}{100} \cdot I_{к5 \text{ max}}^{(3)} = \frac{12}{100} \cdot 3,44 = 0,413 \text{ кА} ,$$

де $\Delta U\% = 0,5 \cdot \pm 8 \times 1,5 = 12\%$;

$$I_{НБ} = I'_{НБ} + I''_{НБ} = 0,344 + 0,413 = 0,757 \text{ кА} ;$$

Більший I_{c3} приймаємо за основу.

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_1} \cdot I_{c3} = \frac{1}{\frac{600}{5}} \cdot 984 = 8,20 \text{ А} ;$$

- число витків основної сторони

$$W_{осн p} = \frac{F_{cp}}{I_{cp}} = \frac{100}{8,20} = 12,2 ; \text{приймаємо } W_{осн p} = 12 .$$

- перерахунок струму спрацьовування реле

$$I_{cp} = \frac{F_{cp}}{W_{осн}} = \frac{100}{12} = 8,33 \text{ А} .$$

- число витків неосновної сторони

$$W_{1 p} = W_{осн} \cdot \frac{I_{осн в}}{I_{1 в}} = 12 \cdot \frac{4,58}{4,53} = 12,1 ; \text{приймаємо } W_{1 p} = 12 ;$$

- складова струму небалансу, обумовлена округленням числа витків неосновної сторони

$$I'''_{НБ} = \frac{W_{1 p} - W_1}{W_{1 p}} \cdot I_{к5 \text{ max}}^3 = \frac{12,1 - 12}{12,1} \cdot 3,44 = 0,028 \text{ кА} ;$$

- сумарний струм небалансу

$$I_{НБ\Sigma} = I'_{НБ} + I''_{НБ} + I'''_{НБ} = 0,344 + 0,413 + 0,028 = 0,785 \text{ кА} ;$$

- уточнений струм спрацьовування захисту

$$I_{сз} = K_I \cdot I_{нб} = 1,3 \cdot 0,785 = 1,020 \text{ кА} ;$$

- уточнений струм спрацьовування реле

$$I_{ср} = \frac{K_{сх}}{K_I} \cdot I_{сз} = \frac{1}{\frac{600}{5}} \cdot 1020 = 8,50 \text{ А} ;$$

- коефіцієнт чутливості

$$K_{ч} = \frac{I_{к5 \text{ min}}^{(2)} \cdot K_{сх} \cdot W_{осн}}{K_I \cdot F_{ср}} = \frac{2040 \cdot 1 \cdot 12}{(600/5) \cdot 100} = 2,04 > 2 .$$

ПРИКЛАД 4.2

Розрахувати захист трансформатора ТЗ від надструмів зовнішніх КЗ і перевантаження (рис. 3.1). Вихідні дані елементів електричної мережі аналогічні прикладу 3.1.

РІШЕННЯ

Згідно ПУЕ, застосуємо максимальний струмовий захист.

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{сз} = \frac{K_H \cdot K_{сз}}{K_B} \cdot I_{раб \text{ max}} = \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,8} \cdot 0,220 = 0,333 \text{ кА} ,$$

де $I_{раб \text{ max}} = 1,4 \cdot I_{ном} = 1,4 \cdot 0,157 = 0,220 \text{ кА} ;$

$K_{сз}$ - коефіцієнт самопуску, рівний, 1,1 о. е.;

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{сз} = \frac{K_H \cdot K_{сз}}{K_B} \cdot I_{раб \text{ max}} = \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,8} \cdot 0,220 = 0,333 \text{ кА} ,$$

- тип реле - РТ-40/10, уставку виставляємо повідцем на реле;
- коефіцієнт чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к5 min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,58}{0,333} = 1,74 > 1,5 ,$$

де $I_{\text{к5 min}}^{(2)} = 2,04 \cdot \frac{10,5}{37} = 0,58 \text{ кА} ;$

- час спрацьовування захисту

$$t_{\text{сз}} = t_{\text{сз см ел}} + \Delta t$$

Згідно ПУЕ, розрахунок **максимального струмового захисту від перевантаження.**

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{\text{сз}} = \frac{K_{\text{н}}}{K_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном}} = \frac{1,06}{0,85} \cdot 0,157 = 0,196 \text{ кА} ,$$

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{\text{ср}} = \frac{K_{\text{сх}}}{K_{\text{т}}} \cdot I_{\text{ср}} = \frac{1}{300/5} \cdot 196 = 3,27 \text{ кА} ,$$

- тип реле - РТ-40/6, уставку виставляємо повідцем на реле;
- час спрацьовування захисту

$$t_{\text{сз}} = t_{\text{сз св. т.}} + \Delta t .$$

ПРИКЛАД 4.3

Розрахувати захист трансформатора Т1 від міжфазних КЗ (рис. 4.1)

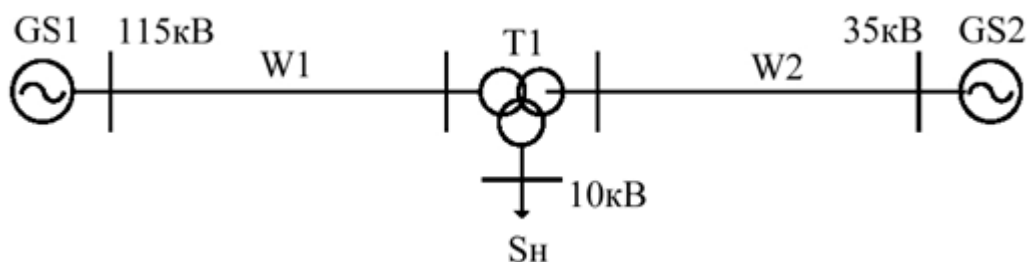


Рис.4.1. Схема електричної мережі (приклад 4.3)

Вихідні дані

T1 - ТДТН-63000/110;

W1 - АС 240/39, l=100 км;

W2 - АС 120/19, l=50 км;

GS1 - $S_{\text{НОМ}}=2200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $X_{1*}=0,513$, $X_{0*}=0,770$;

GS2 - $S_{\text{НОМ}}=1200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $X_{1*}=0,532$, $X_{0*}=0,800$;

$S_{\text{Н}}=50 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $\cos\varphi=0,8$.

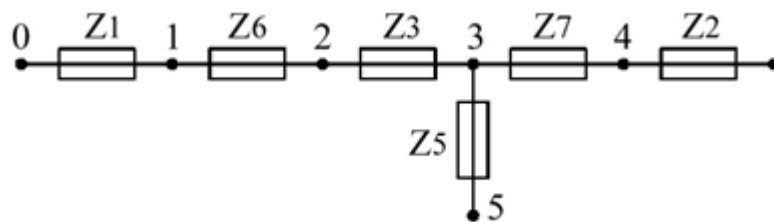


Рис.4.2. Схема замещения электрической сети

РІШЕННЯ

Параметри схеми замещения

$$X_1 = X_{1*} \cdot \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,513 \cdot \frac{115^2}{2200} = 3,08 \text{ Ом},$$

$$X_2 = 0,532 \cdot \frac{115^2}{1200} = 5,86 \text{ Ом},$$

$$X_3 = \frac{u_{\text{к\%,В}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,8 \cdot 115^2}{100 \cdot 63} = 22,7 \text{ Ом},$$

$$\text{Де } u_{\text{к\%,В}} = \frac{1}{2} u_{\text{к\%,ВН-СН}} + u_{\text{к\%,ВН-НН}} - u_{\text{к\%,СН-НН}} = \frac{1}{2} 10,5 + 18 - 7 = 10,8 \text{ \%}.$$

$$X_5 = \frac{7,25 \cdot 115^2}{100 \cdot 63} = 15,2 \text{ Ом},$$

$$X_6 = X_{1*} \cdot 1 \cdot \frac{U_{\text{ср}}^2}{U_{\text{срН}}^2} = 0,405 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 40,5 \text{ Ом},$$

$$R_6 = R_{1*} \cdot 1 \cdot \frac{U_{\text{ср}}^2}{U_{\text{срН}}^2} = 0,120 \cdot 100 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 12,0 \text{ Ом},$$

$$X_7 = X_{1*} \cdot 1 \cdot \frac{U_{cp}^2}{U_{cpH}^2} = 0,414 \cdot 50 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 200 \text{ Ом},$$

$$R_7 = R_{1*} \cdot 1 \cdot \frac{U_{cp}^2}{U_{cpH}^2} = 0,249 \cdot 50 \cdot \frac{115^2}{115^2} = 120 \text{ Ом},$$

Вибір коефіцієнта трансформації трансформаторів струму інапруги.

Знайдемо струм по лінії W1

а)

$$I_{W1} = \frac{\Delta S_{W1}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}} = \frac{39,4}{\sqrt{3} \cdot 115} = 198 \text{ А},$$

$$\Delta S_{W1} = S_H \cdot \frac{Z_9}{Z_9 + Z_8} = 50 \cdot \frac{120 + j206}{120 + j206 + 12,0 + j66,3} = 39,4 \text{ МВ} \cdot \text{А},$$

$$Z_9 = Z_7 + Z_2 = 120 + j200 + j5,86 = 120 + j206, \text{ Ом},$$

$$Z_8 = Z_1 + Z_6 + Z_3 = j3,08 + 12,0 + j40,5 + j22,7 = 12,0 + j66,3, \text{ Ом}.$$

б)

$$I_{W1} = j \cdot F = 1,3 \cdot 240 = 312 \text{ А},$$

де j - економічна щільність струму, рівна $1,3 \text{ А/мм}^2$,

F - площа перетин дроту, рівна 240 мм^2 ,

Приймаємо коефіцієнт трансформації

$$k_I = \frac{300}{5}.$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора напруги обираємо за номінальною напругою лінії, яка захищається

$$k_U = \frac{110000}{100}.$$

Розрахунок струмів КЗ в вузлі 5 при максимальному режимі

$$Z_{екв.} = \frac{Z_8 \cdot Z_9}{Z_8 + Z_9} + Z_5 = 68,0 \text{ Ом},$$

$$I_{K5}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot Z_{екв.}} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 68} = 976 \text{ А},$$

$$I_{к5W1}^{(3)} = I_{к5}^{(3)} \frac{Z_9}{Z_9 + Z_8} = 976 \frac{120 + j206}{120 + j206 + 12,0 + j66,3} = 769 \text{ A.}$$

Результати розрахунків режимів КЗ зведемо в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Режим	Точка КЗ	Вид КЗ	Гілка	Струм по гілці, А
Max	1	(3)	1-2	221
			2-3	985
	3	(3)	3-4	278
	4	(3)	3-4	223
	5	(3)	3-5	976
Min	5	(3)	1-2	769
	1	(3)	1-2	220
	2	(3)	1-2	1422
	5	(3)	3-5	965
	5	(3)	1-2	758
	5	(2)	3-5	835
	5	(2)	2-3	656
	1	(2)	1-2	190
	2	(2)	2-3	220
4	(2)	4-3	193	

РІШЕННЯ

Приймаємо повздовжній диференціальний струмовий захист РНТ-565.

Розрахунок проводиться в наступному порядку:

- первинні номінальні струми

$$I_{1ВН} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМВН}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,32 \text{ кА,}$$

$$I_{1\text{CH}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ CH}}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 0,94 \text{ кА},$$

$$I_{1\text{HH}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ HH}}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 11} = 3,31 \text{ кА},$$

- коефіцієнти схем трансформаторів струму

$$K_{\text{СХВН}} = \sqrt{3}, K_{\text{СХ CH}} = \sqrt{3}, K_{\text{СХ HH}} = 1;$$

- коефіцієнти трансформації трансформаторів струму

$$K_{I\text{BH}} = \frac{I_{1\text{BH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{5} = \frac{320 \cdot \sqrt{3}}{5} = \frac{554}{5}, K_{I\text{BH}} = \frac{600}{5},$$

$$K_{I\text{CH}} = \frac{I_{1\text{CH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{5} = \frac{940 \cdot \sqrt{3}}{5} = \frac{1628}{5}, K_{I\text{CH}} = \frac{2000}{5},$$

$$K_{I\text{HH}} = \frac{I_{1\text{HH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{5} = \frac{3310 \cdot 1}{5} = \frac{3310}{5}, K_{I\text{HH}} = \frac{4000}{5};$$

- вторинні струми в плечах захисту

$$i_{2\text{BH}} = \frac{I_{1\text{BH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{K_{I\text{BH}}} = \frac{320 \cdot \sqrt{3}}{600/5} = 4,62 \text{ А},$$

$$i_{2\text{CH}} = \frac{I_{1\text{CH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{K_{I\text{CH}}} = \frac{940 \cdot \sqrt{3}}{2000/5} = 4,07 \text{ А},$$

$$i_{2\text{HH}} = \frac{I_{1\text{HH}} \cdot K_{\text{СХ}}}{K_{I\text{HH}}} = \frac{3310 \cdot 1}{4000/5} = 4,14 \text{ А},$$

Сторону вищої напруги приймаємо за основну.

- Первинний струм спрацьовування захисту

а) $I_{\text{СЗ}} = K_{\text{Н}} \cdot I_{1\text{HH}} = 1,3 \cdot 320 = 416 \text{ А},$

$I_{1\text{BH}}$ - номінальний струм основної сторони трансформатора Т1.

б) $I_{\text{СЗ}} = K_{\text{Н}} \cdot I_{\text{НО}} = 1,3 \cdot 255 = 332 \text{ А},$

$$I_{\text{нб}} = I'_{\text{нб}} + I''_{\text{нб}} = 97,8 + 157 = 255 \text{ A},$$

$$I'_{\text{нб}} = K_a \cdot K_o \cdot f_i \cdot I_{\text{к5 max}}^3 = 1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 985 = 97,8 \text{ A},$$

де $K_a=1$ -коefficient, що враховує перехідний процес, о. е.,

$K_o=1$ коefficient однотипності трансформаторів струму, о. е.,

$f_i=0,1$ - відносна похибка трансформатора струму, о. е.

$$I''_{\text{нб}} = \frac{\Delta U\%}{100} \cdot I_{\text{к5 max}}^{(3)} = \frac{16,0}{100} \cdot 985 = 157 \text{ A},$$

де $\Delta U\% = 0,5 \cdot \pm 9 \cdot 1,78 = 16\%$ -половина сумарного діапазону регулювання напруги з РНП,

$I_{\text{к5 max}}^{(3)}$ -ток трифазного КЗ, що протікає через трансформатор при зовнішньому КЗ, найбільший, приведений до основної сторони (табл.4.1);

• вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{\text{сп}} = \frac{K_{\text{сх}}}{K_I} \cdot I_{\text{сз}} = \frac{\sqrt{3}}{\frac{600}{5}} \cdot 416 = 6,00 \text{ A};$$

• попередньо перевіряємо coefficient чутливості

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к5 min}}^{(2)} \cdot K_{\text{сх}}}{K_I \cdot I_{\text{сп}}} = \frac{835 \cdot \sqrt{3}}{(600/5) \cdot 6,00} = 2,01 > 2,00;$$

• розрахункове число витків основної обмотки $W_{\text{осн р}}$

$$W_{\text{осн р}} = \frac{F_{\text{сп}}}{I_{\text{сп}}} = \frac{100}{6,00} = 16,7,$$

де $F_{\text{сп}}=100$ - сила, що намагнічує спрацьовування реле, А,

• приймаємо число витків основної обмотки $W_{\text{осн}}=16$;

• струм спрацьовування реле на основній стороні

$$I_{\text{сп осн}} = \frac{F}{W_{\text{осн}}} = \frac{100}{16} = 6,25 \text{ A};$$

• розрахункове число витків для сторони 35 кВ

$$W_{\text{Iр}} = W_{\text{осн}} \cdot \frac{i_{2 \text{ осн}}}{i_{2 \text{ I}}} = W_{\text{осн}} \cdot \frac{i_{2 \text{ вн}}}{i_{2 \text{ сн}}} = 16 \cdot \frac{4,62}{4,07} = 18,2 \text{ в},$$

- приймаємо ціле число витків $W_I=18$ в;
- розрахункове число витків для сторони 10 кВ

$$W_{IIp} = W_{осн} \cdot \frac{i_{2\text{ осн}}}{i_{2\text{ II}}} = 16 \cdot \frac{4,62}{4,14} = 17,8 ,$$

- приймаємо ціле число витків $W_{II}=18$ в;
- складові струму небалансу I_{H6}''', I_{H6}'''' зумовлені округленням кількості витків неосновних сторін

$$I_{H6}''' = \frac{W_{Ip} - W_I}{W_{Ip}} \cdot I_{к3\text{ max}}^3 = \frac{18,2 - 18}{18,2} \cdot 985 = 10,8 \text{ A} ,$$

$$I_{H6}'''' = \frac{W_{IIp} - W_{II}}{W_{IIp}} \cdot I_{к5\text{ max } 3-5}^3 = \frac{17,8 - 18}{17,8} \cdot 978 = 11,0 \text{ A} ,$$

- сумарний струм небалансу

$$I_{H6} = I_{H6}' + I_{H6}'' + I_{H6}''' + I_{H6}'''' = 97,8 + 157 + 10,8 + 11,0 = 277 \text{ A} ;$$

- уточнений первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{сз\text{ уточн}} = K_H \cdot (I_{1,вн} + I_{H6}''' + I_{H6}'''') = 1,3 \cdot (320 + 10,8 + 11,0) = 444 \text{ A} ;$$

- уточнений вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{ср\text{ уточн}} = \frac{K_{сх}}{K_I} \cdot I_{сз\text{ уточн}} = \frac{\sqrt{3}}{600/5} \cdot 444 = 6,41 \text{ A} ;$$

- коефіцієнт чутливості

$$K_{ч} = \frac{I_{к5\text{ min}}^{(2)} \cdot K_{сх} \cdot W_{осн}}{K_I \cdot F_{ср}} = \frac{835 \cdot \sqrt{3} \cdot 16}{(600/5) \cdot 100} = 1,93 ,$$

де $I_{к5\text{ min}}^{(2)}$ - струм двофазного КЗ в мінімальному режимі в зоні дії захисту.

Згідно ПУЕ при виконанні поздовжнього диференційного струмового захисту на трансформаторі, потужністю менше 80 МВ·А, допускається зниження коефіцієнта чутливості до 1,5 при КЗ на стороні НН.

ПРИКЛАД 4.4

Розрахувати захист трансформатора Т1 від зовнішніх КЗ (рис.4.1), вихідні дані мережі аналогічні прикладу 4.3.

=

РІШЕННЯ

Виконуємо розрахунок максимального струмового спрямованого захисту на стороні ВН

Розрахунок ведеться в наступному порядку:

- первинний струм спрацьовування захисту

$$I_{сз} = \frac{K_H \cdot K_{сз}}{K_B} = \frac{1,1 \cdot 1,2}{0,85} \cdot 448 = 696 \text{ А,}$$

де $I_{\text{раб max}} = 1,4 \cdot I_{1\text{ном}} = 1,4 \cdot 320 = 448 \text{ А,}$

K_H - коефіцієнт надійності, рівний 1,1-1,3 о. е.,

$K_{сз}$ - коефіцієнт самозапуску навантаження, рівний 1-3 о. е.,

K_B - коефіцієнт повернення, рівний 0,85 о. е.;

- вторинний струм спрацьовування реле

$$I_{ср} = \frac{K_{сх}}{K_I} \cdot I_{сз} = \frac{1}{400/5} \cdot 696 = 8,7 \text{ А,}$$

- вибираємо реле струму типу РТ 40/10. Уставку виставляємо повідцем.

- коефіцієнт чутливості

$$K_{чI} = \frac{I_{к5 \text{ min}}^{(2)}}{I_{сз}} = \frac{656}{696} = 0,94 < 1,5 ,$$

де $I_{к5 \text{ min}}^{(2)}$ - струм двофазного КЗ в мінімальному режимі наприкінці ділянки, що захищається, (див. табл. 3.4);

- час спрацьовування захисту

$$t_{сз} = t_{сз \text{ прис найб}} + \Delta t.$$

Захист не задовольняє вимогам чутливості.

Розрахунок максимального струмового спрямованого захисту з пуском мінімальної напруги

- первинний струм спрацьовування захисту, А

$$I_{c3} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{1\text{ном}} = \frac{1,1}{0,85} \cdot 320 = 414 \text{ А,}$$

- вторинний струм спрацьовування реле, А

$$I_{cp} = \frac{K_{cx}}{K_I} \cdot I_{c3} = \frac{1}{400/5} \cdot 414 = 5,18 \text{ А,}$$

- вибираємо реле струму типу РТ40/6;
- коефіцієнт чутливості

$$K_{чI} = \frac{I_{k5\text{ min}}^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{656}{414} = 1,59 > 1,5, \quad K_{чI} = \frac{I_{k4\text{ min}}^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{193}{414} = 0,47 < 1,25,$$

де $I_{k5\text{ min}}^{(2)}$, $I_{k4\text{ min}}^{(2)}$ - струм двофазного КЗ через захист в мінімальному режимі при КЗ за трансформатором і суміжним елементом.

Пуск мінімальної напруги

- первинна напруга спрацьовування захисту, кВ,

$$U_{c3} = \frac{0,9 \cdot U_{\text{ном}}}{K_H \cdot K_B} = \frac{0,9 \cdot 115}{1,1 \cdot 1,1} = 85,5;$$

де K_H - коефіцієнт надійності, рівний 1,1-1,3о. е.,
 K_B - коефіцієнт повернення, рівний 1,1-1,25о. е. ;

- вторинна напруга спрацьовування реле, В,

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{K_U} = \frac{85500}{110000/100} = 77,7 ,$$

- реле напруги РН-54/160, уставку виставляємо повідцем;
- коефіцієнт чутливості

$$K_{чU} = \frac{U_{вз}}{U_{k\text{ max}}^{(3)}},$$

де $U_{вз} = K_B \cdot U_{c3} = 1,1 \cdot 85500 = 94050$ -напруга повернення захисту, В,

$U_{k \max}^{(3)}$ -залишкова напруга в місці установки захисту притрифазному КЗ в максимальному режимі наприкінці ділянки, що захищається та в кінці зони дії захисту, В,

$$U_{k5 \max}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{k5 \max 2-3}^{(3)} \cdot X_3 + I_{k5 \max 3-5}^{(3)} \cdot X_5 = \sqrt{3} \cdot 978 \cdot 15,2 \cdot 762 \cdot 22,7 = 55708 \text{ В};$$

$$U_{k4 \max}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{k4 \max 4-3}^{(3)} \cdot Z_3 + Z_7 = \sqrt{3} \cdot 223 \cdot 0 + j22,7 + 120 + j200 = 97710 \text{ В};$$

$$K_{\text{чU}} = \frac{U_{\text{BЗ}}}{U_{k \max}^{(3)}} = \frac{94050}{55708} = 1,69 > 1,5$$

$$K_{\text{чU}} = \frac{U_{\text{BЗ}}}{U_{k \max}^{(3)}} = \frac{94050}{97710} = 0,96 < 1,25.$$

Захист не задовольняє вимогам чутливості.

Розрахунок струмового спрямованого захисту зворотної послідовності

- первинний струм спрацьовування захисту, А,

$$I_{\text{сз}} = 0,2 - 0,8 \cdot I_{\text{ном}} = 0,4 \cdot 320 = 128,$$

- вторинний струм спрацьовування реле, А,

$$I_{\text{ср}} = \frac{K_{\text{сх}}}{K_{\text{I}}} \cdot I_{\text{сз}} = \frac{1}{\frac{400}{5}} \cdot 128 = 1,6,$$

- уставка в відносних одиницях

$$\frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{ном. KWZ}}} = \frac{1,6}{5} = 0,32,$$

де $I_{\text{ном. KWZ}}$ - номінальний струм фільтра реле потужності, А;

- коефіцієнт чутливості захисту

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{kmin}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}},$$

де $I_{\text{kmin}}^{(2)}$ -найменший струм двофазного КЗ в мінімальному режимі в кінці ділянки, що захищається і в кінці зони дії, А,

$$K_{\text{чI}} = \frac{I_{\text{к5 min}}^{(2)}}{I_{\text{с3}}} = \frac{656}{128} = 5,13 > 1,5, \quad K_{\text{чI}} = \frac{I_{\text{к4 min}}^{(2)}}{I_{\text{с3}}} = \frac{193}{128} = 1,51 > 1,25;$$

- коефіцієнт чутливості за потужністю

$$K_{\text{чквз}} = \frac{I_{\text{кmin}}^{(2)} \cdot U_{\text{ост}}}{K_{\text{I}} \cdot K_{\text{U}} \cdot S_{\text{сп}}},$$

де $S_{\text{сп}}$ - потужність спрацьовування зворотної послідовності реле напряму потужності, приймається рівною $8\text{В}\cdot\text{А}$,

$$K_{\text{чквз}} = \frac{I_{\text{кmin 2-3}}^{(2)} \cdot U_{\text{ост}}}{K_{\text{I}} \cdot K_{\text{U}} \cdot S_{\text{сп}}} = \frac{656 \cdot 27583}{\frac{400}{5} \cdot \frac{11000}{100} \cdot 8} = 25,7 > 2,$$

$$K_{\text{чквз}} = \frac{I_{\text{кmin 3-4}}^{(2)} \cdot U_{\text{ост}}}{K_{\text{I}} \cdot K_{\text{U}} \cdot S_{\text{сп}}} = \frac{193 \cdot 48829}{\frac{400}{5} \cdot \frac{11000}{100} \cdot 8} = 13,4 > 1,4.$$

Захист задовольняє вимогам чутливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ершов, Ю. А. Релейная защита и автоматика электрических систем. Расчет релейной защиты объектов ЭЭС: Учебное пособие / Сост. Ю. А. Ершов, О. П. Халезина; КГТУ - Красноярск, 2004. 126с.
2. Расчёт устройств релейной защиты и режимов коротких замыканий в ЭЭС на ЭВМ: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Сост. А.М. Дяков, Ю.А. Ершов, В.Б. Зорин; КрПИ - Красноярск, 19*4.Расчёт устройств релейной защиты и режимов коротких замыканий в ЭЭС на ЭВМ : Методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Сост. А.М. Дяков, Ю.А. Ершов, В.Б. Зорин; КрПИ - Красноярск, 1984.
3. Ершов, Ю. А. Релейная защита и автоматика электрических систем. Проектирование релейной защиты воздушных линий электропередачи: Методические указания/ Сост. Ю. А. Ершов, О. П. Халезина; КГТУ - Красноярск, 20*4. 52с.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 1. Релейная защита блоков генератор - трансформатор, генератор - автотрансформатор. - М.: Энергия, 2001. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Минэнерго СССР. - М.: Энергия, 1977. -144 с.
6. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 5. Релейная защита блоков генератор - трансформатор, генератор - автотрансформатор. - М.: Энергия, 1963.
7. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчёт. - М.: Энергия, 1980.
8. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Схемы. - М.: Энергия, 1990.
9. Алексеева О.Н., Петрова С.С., Таджибаев А.И. Релейная защита электрооборудования электрических станций и подстанций: Учебное пособие. - Л.: ЛПИ, 1*84. - 72 с.

10. Дони, Н. А. Панели высокочастотной защиты для линий электропередачи 110-330 кВ / Н. А. Дони, Л. А. Надель, А. М. Наумов, Я. С. Гельфанд // Электротехническая промышленность. Сер. АНН, *983 г. № 6. 183 с.
11. Бирг, А. Н. Устройства дистанционной и токовой защит типов ШДЭ 28*1, ШДЭ 2802 / А. Н. Бирг, Г. С. Нудельман, Э. К. Федоров. М.: Энергоатомиздат, 1988 г. 144 с.
12. Орлов, И. Н. Электротехнический справочник. Т. 3 / Под ред. И. Н. Орлова. - М.: Энергоатомиздат, 1998 г. 800 с.
13. Дьяков, А.Ф., Платонов В.В. Основы проектирования релейной защиты и автоматики ЭЭС/Состав. А. Ф.Дьяков, В. В. Платонов. М: Энергия, 2000.

А. С. Мних
к.т.н., доцент

**ОСНОВИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ
ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

**Методичні вказівки
до самостійної роботи**
*для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології"*

Підписано до друку 11.06.2015р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 2,8. Наклад 3 прим.
Внутрішній договір № 90/15

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
ЗДІА