

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

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

**МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ**

із навчальної дисципліни

«Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

Харків 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробники:

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

Рецензенти:

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедрою електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

1 Структура навчальної дисципліни
Розподіл часу навчальної дисципліни за темами
(заочна форма навчання)

Номер та назва навчальної теми	Кількість годин відведених на вивчення навчальної дисципліни						Вид контролю
	Всього	з них:					
		Лекції	Семінарські	Практичні	Лабораторні	Самостійна робота	
Тема 1 Принципи побудови релейного захисту	16	1		1		14	
Тема 2 Принцип дії та особливості виконання електромеханічних реле	16	1		1		14	
Тема 3 Структура релейного захисту	16	1		1		14	К/р на 15 хвил.
Тема 4 Первинні вимірювальні перетворювачі струму та напруги	16	1		1		14	К/р на 15 хвил.
Тема 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням	16	1		1		14	
Тема 6 Струмові захисти ліній з двостороннім живленням (струмові спрямовані захисти). Диференційні струмові захисти	16	1		1		14	К/р на 15 хвил.
Тема 7 Дистанційні захисти ЛЕП. Високочастотні захисти ліній	16	1		1		14	
Тема 8 Релейний захист силових трансформаторів і автотрансформаторів	16	1		1		14	К/р на 15 хвил.
Тема 9 Релейний захист електродвигунів	18	2		2		14	
Тема 10 Релейний захист збірних шин електростанцій та підстанцій	19	2		2		15	
Всього за семестр № 5:	165	12		12		141	екзамен

2. Методичні вказівки до практичних занять

Практичне заняття № 1

Тема 1. Розрахунок трансформатора струму та напруги в схемах релейного захисту

Практичне заняття за темою № 1. Розрахунок трансформатора струму та напруги в схемах релейного захисту

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок трансформатора струму та напруги в схемах релейного захисту

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які основні параметри трансформатора струму та напруги потрібно враховувати при розрахунках для схем релейного захисту?
2. Які методи використовуються для розрахунку співвідношення відносних значень струму та напруги у трансформаторі для забезпечення ефективної роботи релейного захисту?
3. Які фактори впливають на вибір типу трансформатора струму та напруги для конкретної схеми релейного захисту і як це може вплинути на точність захисту системи?

Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок трансформатора струму та напруги в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку трансформатора струму та напруги в схемах релейного захисту

Хід проведення практичного заняття

1.1. Обчислити розрахункове навантаження TC z_n за початковими даними:

$$R_{np} = 0,6 \text{ Ом}; z_{pa} = z_{pc} = 1,2 \text{ Ом}; z_{pb} = 0,9 \text{ Ом}; z_{p0} = 1,24 \text{ Ом}; z_{p.obp} = 0,7 \text{ Ом}$$

(тільки для рис. 1.1, б). На рис 1.1, а і б приведені схеми, з'єднань TC і реле відповідно в повну і неповну зірку.

Рішення. Відношення напруги U_T на затисках вторинної обмотки TC до вторинного струму I_T в цій обмотці складає навантаження на TC , т.ч.

$$z_n = U_T / I_T \quad (1.1)$$

Навантаження на $ТС$ залежить від схеми з'єднань $ТС$ і реле, від виду к. з. і від величини зовнішніх опорів : дротів R_{np} , реле z_p і інших апаратів, що включаються послідовно в ланцюги струму кожної фази і в нульовий дріт.

В цілях спрощення обчислень усі зовнішні опори складаються арифметично (а не геометрично), чим створюється деякий розрахунковий запас.

Розрахунковим навантаженням на $ТС$ називають найбільший опір z_n , обчислюване по (1.1) для одного з трьох або двох $ТС$ залежно від їх схем з'єднання між собою і з реле, а також виду к. з.

Напруга на вторинній обмотці кожного $ТС$ $U_T^{(3)} = I_T^{(3)} (R_{np} + z_p)$ чи, враховуючи (1.1),

$$z_n = U_T^{(3)} / I_T^{(3)} = R_{np} + z_p. \quad (1.2)$$

Розглянемо схему повної зірки (рис. 1.1, а).

При трифазному к. з. струм в нульовому дроті дорівнює нулю (струмом небалансу нехтуємо). Вторинні струми рівні за величиною і зрушені по фазі по відношенню один до одного на 120° .

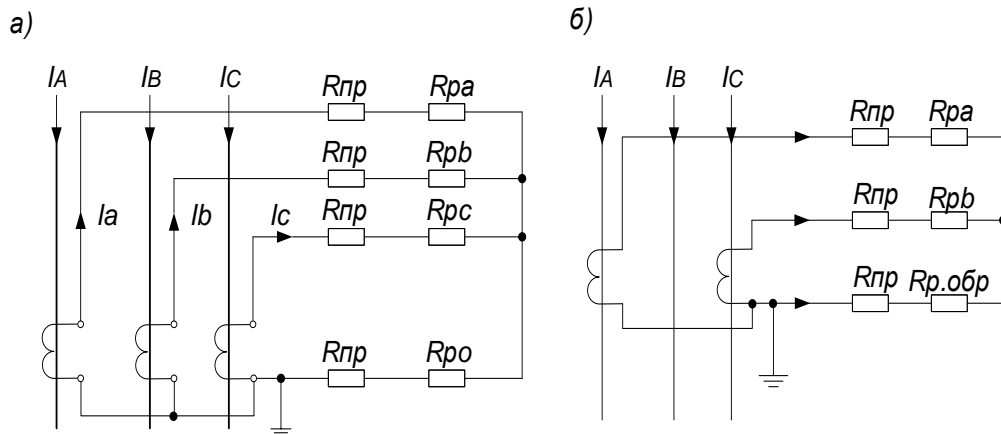


Рисунок 1.1 – Схеми з'єднань $ТС$ і реле : а — у повну зірку;

б — в неповну зірку

Розрахункове значення $z_{n,расч}$ слід прийняти для того $ТС$, у якого опори реле у фазному дроті найбільші. У літературі зазвичай це не підкреслюється, і опори реле в усіх фазах вважаються однаковими. За умовами завдання і з урахуванням

перехідних опорів контактів $R_k = 0,05 \text{ Ом}$

$$z_{н.расч}^{(3)} = R_{np} + z_{pa} + R_k = 0,6 + 1,2 + 0,05 = 1,85 \text{ Ом.}$$

При двофазному к. з. $U_T^{(2)} = I_T^{(2)}(R_{np} + z_p)$ чи з обліком (1.1) і (1.2)

$$z_n^{(2)} = z_n^{(3)}. \quad (1.3)$$

При однофазному к. з., наприклад, фази A вторинний струм к. з. протікає по фазному і нульовому дроту. В цьому випадку

$$z_{н.расч}^{(1)} = I_a^{(1)}(R_{np} + z_{pa} + z_{p0} + R_{np} + R_k) / I_a^{(1)},$$

чи

$$z_{н.расч} = 2R_{np} + z_{pa} + z_{p0} + R_k. \quad (1.4)$$

По умові цього завдання і з обліком $R_k = 0,05 \text{ Ом}$

$$z_{н.расч}^{(1)} = 2 \cdot 0,6 + 1,2 + 1,24 + 0,05 = 3,69 \text{ Ом.}$$

Розглянемо схему неповної зірки (рис. 1.1, б). Розрахункове найбільше навантаження по умові цього завдання має місце при двофазному к. з. між фазами A і B , коли вторинний струм фази A протікає по реле фази a і реле в зворотному дроті

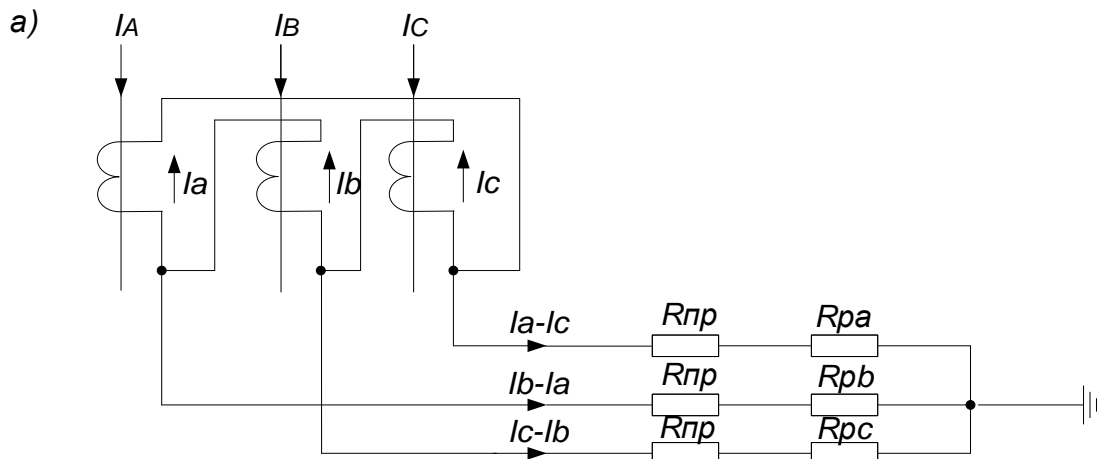
$$z_{на расч} = I_a(R_{np} + z_{pa} + z_{p.обр} + R_k) / I_a,$$

звідки

$$z_{на расч} = 2R_{np} + z_{pa} + z_{p.обр} + R_k, \quad (1.5)$$

чи з обліком $R_k = 0,05 \text{ Ом}$

$$z_{на расч} = 2 \cdot 0,6 + 1,2 + 0,7 + 0,05 = 3,15 \text{ Ом.}$$



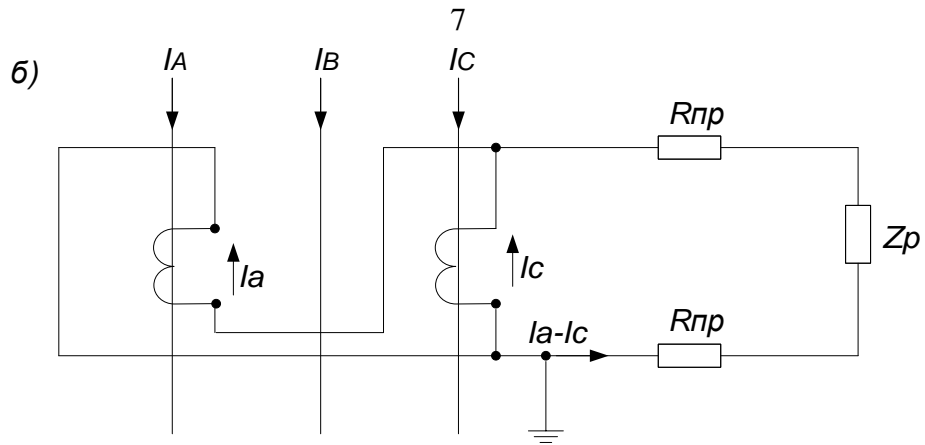


Рисунок 1.2 – Схеми з'єднань ТС і реле:

a — ТС в трикутник, реле в зірку; *б* — одного реле на різницю струмів двох фаз

1.2. Розрахувати навантаження ТС при дії реле в умовах трифазного і двофазних к. з. за початковими даними: $R_{np} = 0,15 \text{ Ом}$; опори реле при втягнутому якорі $z_{PTB} = 2,1 \text{ Ом}$; $z_{PTM} = 0,32 \text{ Ом}$; перехідні опори контактів $R_k = 0,05 \text{ Ом}$.

На рис. 1.3 приведена розрахункова схема максимального струмового захисту з витримкою часу і відсічення, з вторинними реле прямої дії типу *PTB*, включеними на струми фаз *A* і *C*, і типу *PTM*, включеного на різницю цих струмів.

Рішення. З рис. 1.3 видно, що ТС фаз *A* і *C* знаходяться в однакових фізичних умовах, тому розглядаємо ТС фази *a*. Загальне вираження навантаження складаємо з її визначення по (1.1) і на підставі струморозподілення, наведеного на рис. 1.3:

$$z_n = U_a / I_c = \left| [I_a (R_{np} + z_{PTB}) + (I_a - I_c)(R_{np} + z_{PTM})] / I_a \right|. \quad (1.6)$$

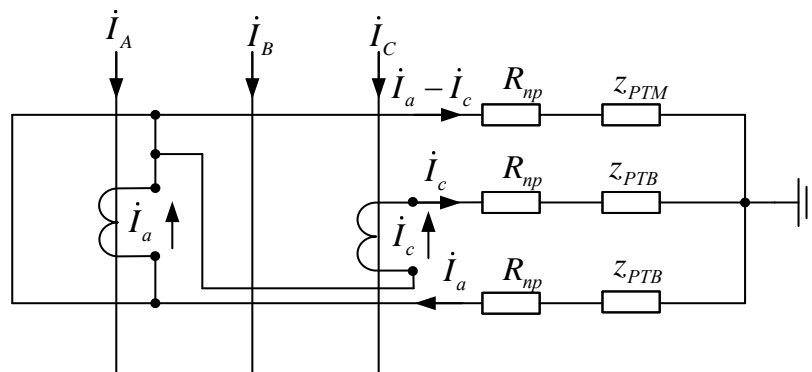


Рисунок 1.3 – До завдання 1.2. Схема заміщення двох реле на фазні струми та одного реле на різницю струмів двох фаз

Трифазне к.з. Приймаємо $\dot{I}_a = I_a$, тоді $\dot{I}_c = I_a e^{j120^\circ}$ і $\dot{I}_a - \dot{I}_c = \sqrt{3} I_a e^{-j30^\circ}$.

Підставляючи ці значення в (1.6), отримуємо

$$\begin{aligned} z_n^{(3)} &= \left| R_{np} + z_{PTB} + \sqrt{3}e^{-j30^\circ} (R_{np} + z_{PTM}) \right| = \\ &= \left| 2,5R_{np} + z_{PTB} + 1,5z_{PTM} - j\frac{\sqrt{3}}{2}(R_{np} + z_{PTM}) \right| = \\ &= \sqrt{(2,5R_{np} + z_{PTB} + 1,5z_{PTM})^2 + \frac{3}{4}(R_{np} + z_{PTM})^2}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

К. з. між фазами А і С. В цьому випадку $\dot{I}_c^{(2)} = -\dot{I}_a^{(2)}$ і $\dot{I}_b^{(2)} = 0$. Підставляючи ці значення в (1.6), отримуємо

$$z_{nAC}^{(2)} = 3R_{np} + z_{PTB} + 2z_{PTM}. \quad (1.8)$$

К. з. між фазами А і В. В цьому випадку $\dot{I}_c^{(2)} = 0$ і $\dot{I}_b^{(2)} = -\dot{I}_a^{(2)}$. Підставляючи ці значення в (1.6), отримуємо

$$z_{nAB}^{(2)} = 2R_{np} + z_{PTB} + z_{PTM}. \quad (1.9)$$

Згідно з випробуваннями, проведеними в інституті "Енергосетьпроект", в розрахунках навантажень на ТС величини опорів реле *PTM* і *PTB* слід приймати рівними 80% від значень опорів при втягнутому якорі, що відповідає приблизно 90% пройденого ними шляху. Згідно з цим приймаємо $z_{PTB} = 0,8 \cdot 2,1 = 1,68 \text{ Ом}$ і $z_{PTM} = 0,8 \cdot 0,32 = 0,256 \text{ Ом}$. Підставимо в (1.7) -(1.9) значення згідно з умовою завдання і рекомендаціями "Енергосетьпроекта". Тоді враховуючи $R_k = 0,05 \text{ Ом}$,

$$z_n^{(3)} = \sqrt{(2,5 \cdot 0,15 + 1,68 + 1,5 \cdot 0,256)^2 + \frac{3}{4}(0,15 + 0,256)^2} + 0,05 = 2,17 \text{ Ом};$$

$$z_{nAC}^{(2)} = 3 \cdot 0,15 + 1,68 + 2 \cdot 0,256 + 0,05 = 2,692 \text{ Ом};$$

$$z_{nAB}^{(2)} = 2 \cdot 0,15 + 1,68 + 0,256 + 0,05 = 2,286 \text{ Ом}.$$

Слід зазначити, що в розрахунках навантажень на ТС не можна брати величини опорів реле *PTB*, *PTM* і котушки відключення *ТЭО* при загальмованому (нижньому) положенні якорі, які приблизно в 3 рази менше, ніж при втягнутому його положенні.

Питання для самоперевірки

1. Наведіть схеми включення трансформаторів струму та реле в схемах струмового захисту.

2. Поясніть необхідність підтримки навантаження на вторинній обмотці трансформатора струму на заданому рівні.
3. Розкрийте механізм насичення трансформатора струму за умов відсутності навантаження.
4. Розкрийте основні складові загальної похибки передачі струму в трансформаторі струму.
5. Які стандартні рівні використовуються для визначення номінального струму вторинної обмотки трансформатора струму, навіщо?

Література [5 с. 118-133; 6 с. 115-125; 7 с. 87-106; 8 с. 36-42]

Практичне заняття № 2**Тема 2. Розрахунок максимального струмового захисту лінії****Практичне заняття за темою № 2. Розрахунок максимального струмового захисту лінії**

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок максимального струмового захисту лінії

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які параметри лінії передачі електроенергії необхідно врахувати при розрахунку максимального струмового захисту?
2. Які методи використовуються для визначення максимального допустимого струму у лінії передачі електроенергії?
3. Як впливає тип струмового реле на розрахунок максимального струмового захисту лінії та як вибрати найбільш ефективний тип реле для конкретної ситуації? Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок максимального струмового захисту лінії в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку максимального струмового захисту лінії

Хід проведення практичного заняття**Практичне заняття № 2**

2.1. Визначити витримки часу максимальних струмових захистів мереж 10 і 35 кВ і трансформаторів $Tr1$ і $Tr2$. Схема живлення радіальних мереж 35 і 10 кВ від понижуючої підстанції 110/35/10 кВ приведена на рис. 2.1.

Початкові дані: 1. При к. з. у точках $K1$, $K2$ і $K3$ починають одночасно працювати послідовно включені захисти.

2. Усі захисти погоджені по чутливості.

3. Захисти 1—5 виконані з вторинними реле прямої дії типу $РТВ$ з обмежено

залежною від струму характеристикою часу дії, захисти 6—16 мають незалежну від струму характеристику часу дії.

4. На усіх секційних вимикачах є автоматика включення резервного живлення (ABP) двосторонньої дії, в нормальному режимі вони відключені.

5. Витримки часу захисту 1 і 3 у незалежній частині характеристики $t_1 = t_2 = 0,5 \text{ с}$, захисту 15 і 16 $t_{15} = 1,2 \text{ с}$ і $t_{16} = 1,8 \text{ с}$.

6. Час відключення вимикачів $t_{o.б} = 0,1 \text{ с}$.

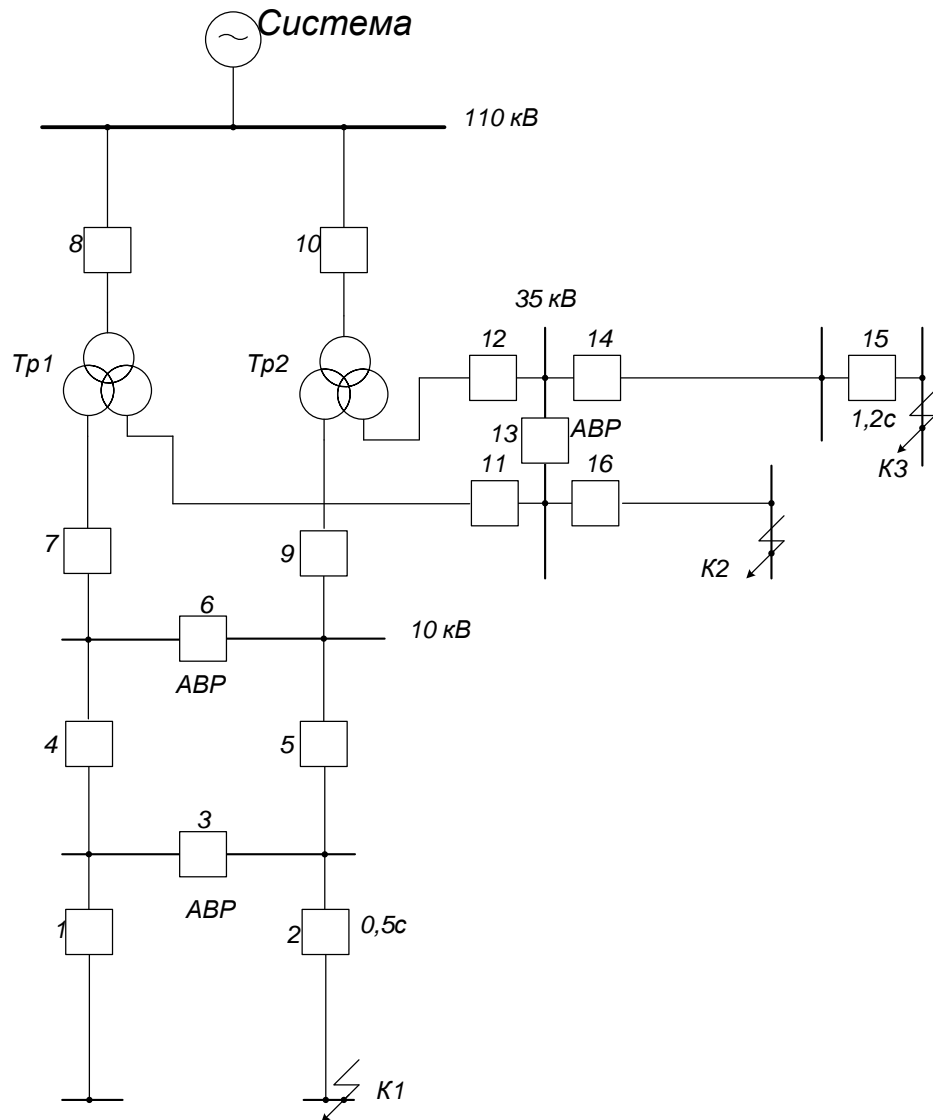


Рисунок – 2.1. Схема живлення радіальних мереж 35 і 10 кВ від понижуючої підстанції 110/35/10 кВ

Рішення. Ступінь селективності в незалежній частині характеристики реле типу *РТВ* при $t_{o.б} = 0,1 \text{ с}$ $\Delta t_{зав} = 0,5 \text{ с}$ і для захисту з незалежною характеристикою

часу дії $\Delta t_{i\hat{a}\zeta} = 0,32 \div 0,45 \text{ н}$. Приймаємо $\Delta t_{нез} = 0,4 \text{ с}$.

Розгляд захисту розпочинаємо з мережі 10 кВ. Захист 3 має бути відбудований за часом в незалежній частині своєї характеристики від захистів 1 і 2, т. ч. $t_3 = t_1 + \Delta t_{зав} = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ с}$. Аналогічно захист 4 і 5 узгоджуються за часом із захистом 3, т. ч. $t_4 = t_5 = t_3 + \Delta t_{зав} = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ с}$.

Ступінь селективності між двома захистами з різними характеристиками часу дії визначаємо за формулою

$$\Delta t = \Delta t_{p1} + \Delta t_{p.\hat{a}2} + t_{o.\hat{a}} + t_{\zeta\ddot{a}i}, \quad (2.1)$$

$$\text{чи } \Delta t = 0,06 + 0,15 + 0,1 + 0,1 = 0,41 \text{ с}.$$

Ступінь селективності вичислений з умови застосування реле часу з межами уставок 0,25—3,5 с. Таким чином,

$$t_6 = t_5 + \Delta t = 1,5 + 0,4 = 1,9 \text{ с}.$$

Визначаємо витримки часу захисту з незалежною характеристикою часу дії

$$t_{14} = t_{15} + \Delta t_{нез} = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ с}; \quad t_{13} = t_{16} + \Delta t_{нез} = 1,8 + 0,4 = 2,2 \text{ с};$$

$$t_{11} = t_{12} = t_{13} + \Delta t_{нез} = 2,2 + 0,4 = 2,6 \text{ с}; \quad t_7 = t_9 = t_6 + \Delta t_{нез} = 1,9 + 0,4 = 2,3 \text{ с};$$

$$t_8 = t_{10} = t_{11} + \Delta t_{нез} = 2,6 + 0,4 = 3 \text{ с}.$$

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 2.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_{15}, \text{н}$	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,1	1,1
$t_{16}, \text{с}$	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	1,7
$t_{i.\hat{a}}, \text{с}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1

2.2. Розрахувати і побудувати характеристику часу спрацювання реле *PT-81/1* для будь-якої проміжної уставки за часом За характеристиками для двох крайніх уставок $t_{yl} = 0,5 \text{ с}$ і $t_{yH} = 4 \text{ с}$, наведених на рис. 2.2, а.

Зазвичай в каталозі і довідниках наводяться обмежено залежні характеристики часу спрацювання реле типу *PT-81/1* для уставок в незалежній частині 0,5; 1; 2; 3 і 4 с.

Рішення. Виконаємо побудову обмежено залежної характеристики часу спрацювання реле *PT-81/1* для однієї з проміжних уставок за часом, наприклад для

уставки $t_y = 1,5$ с. Виходимо з основного положення [9]: залежність витримки часу від уставки за часом при одній і тій кратності струму в реле (практично — від одиниці до десяти) зображується прямою лінією Oa (рис. 2.2, в). На цьому малюнку на осі абсцис відкладені уставки (не у масштабі) t_{yI}, t_{yII} і а на осі ординат витримки часу t_I і t_{II} для однієї і тієї ж кратності струму в реле, отримані з характеристик I і II (рис. 2.2, а).

На осі ординат відкладений також шуканий час t для проміжної уставки t_y . З рис. 2.2, в визначаємо цей час:

$$t = t_I + \delta v = t_I + \delta \operatorname{ctg} \alpha = t_I + \delta e \frac{a\delta}{\partial \delta} = t_I + (t_y - t_{yI})(t_{II} - t_I) / (t_{yII} - t_{yI}). \quad (2.2)$$

Для різних кратностей струму в реле $k_p = I_p / I_{c.p}$ (пояснюючий рис. 2.2, в даний не в масштабі) з кривих I та II знаходимо t_I і t_{II} і по приведеній формулі (2.2) обчислюємо значення t . Результати обчислень зводимо в табл. 2.1.

Таблиця 2.2. – Результати розрахунку

Кратність струму в реле	t_I, c	t_{II}, c	t, c
1	5	15,0	7,85
1,5	2,5	11,5	5,27
2	1,7	9,1	3,8
3	0,9	6,65	2,54
4	0,6	5,55	2,0
6	0,5	4,6	1,67
8	0,5	4,2	1,56
10	0,5	4,0	1,5
12	0,5	4,0	1,5

По даним табл. 2.2 на рис. 2.2, а нанесена характеристика часу спрацювання реле типу $PT-81/1$ для проміжної уставки за часом $t_y = 1,5$. Слід зазначити, що проміжна характеристика може бути побудована при двох будь-яких відомих характеристиках, що знаходяться вище і нижче шуканої, які наводяться в каталогах і довідниках.

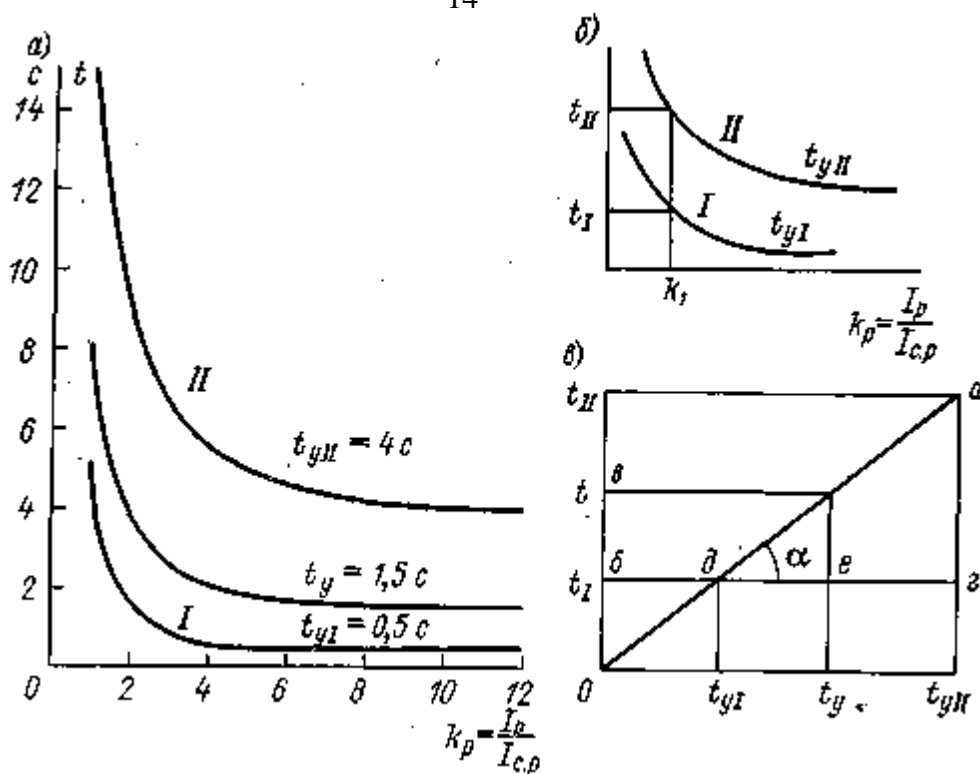


Рисунок – 2.2 а — характеристики часу спрацювання реле *PT-81/1* при уставках 0,5; 1,5 і 4 с;

б і в — до визначення проміжної характеристики реле

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для розрахунку завдання 2.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_{ϕ}, c	0,7	1,2	1,4	1,7	2,2	2,6	3,3	3,8	1,6	2,4	3,5	0,6

Питання для самоперевірки

1. Поясніть сутність максимального струмового захисту та необхідність його введення.
2. Розкрийте сутність терміну «ступінь селективності» та поясніть правила застосування даного параметру.
3. Обґрунтуйте форму часово-струмової залежності.
4. Поясніть послідовність розрахунку проміжних часово-струмових характеристик.
5. Обґрунтуйте необхідність врахування струму само запуску двигунів та поясніть яким чином він враховується за умов налаштування максимально

струмового захисту.

Література [5 с. 123-137; 7 с. 112-148; 8 с. 97-109]

Практичне заняття № 3

Тема 3. Розрахунок максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу

Практичне заняття за темою № 3. Розрахунок максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які фактори впливають на розрахунок максимального струмового відсічення без витримки?
2. Як впливає використання витримки часу на ефективність струмового відсічення? Як це відображається на реакції системи на події?
3. Які основні методи використовуються для визначення максимального струмового відсічення з витримкою часу та як вони відрізняються від методів без витримки?

Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу

Хід проведення практичного заняття

Практичне заняття № 3

3.1. Розрахувати струми спрацювання і зони дії фазних максимальних відсічень ліній 220 кВ I – II і II – III з одностороннім живленням за початковими даними, приведеними на рис. 3.1, а.

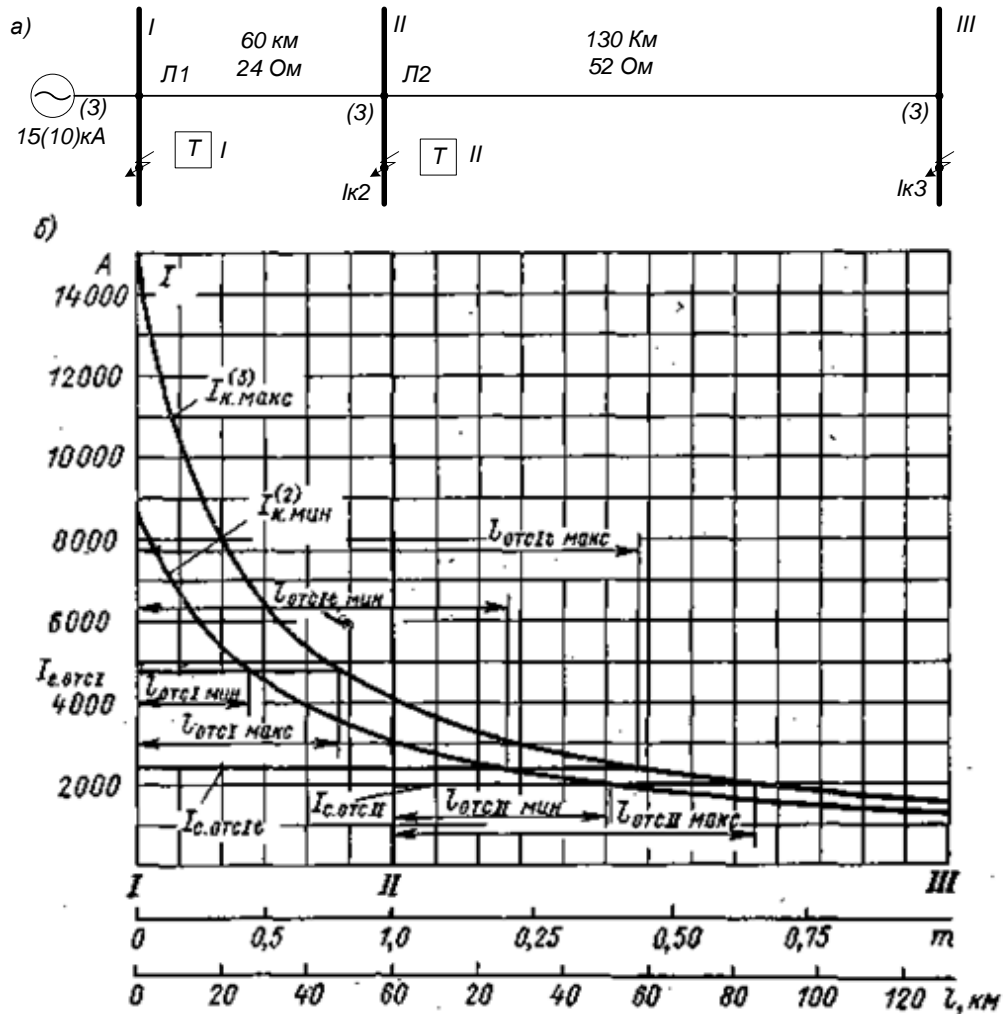


Рисунок 3.1 – До завдання 3.1: а — початкова схема;

б — графічне визначення зон дії захистів.

Рішення. Фазні відсічки без витримки часу (відсічення миттєвої дії) за умовою селективності не повинні діяти за межами ліній, що захищаються, при будь-яких видах к. з. і будь-яких режимах роботи системи. Для цього струм спрацювання відсічень має бути відбудований, т. ч. бути більше максимального струму в лінії при к. з. будь-якого виду в її кінці і максимальному режимі роботи системи. Зазвичай в мережах з великим струмом замикання на землю встановлюють відсічки і ступінчасті захисти струму нульової послідовності, тому фазні відсічки виконують двохранейними для мереж як з великим, так і з малим струмом замикання на землю. Спрощена схема струмової відсічки приведена на рис. 3.1. Для настроєння від роботи розрядників, що встановлюються на лініях, проміжне реле II у цій схемі повинно мати час спрацювання 0,06—0,08 с.

Струмові відсічки в мережах з великим струмом замикання на землю в

основному призначаються для захисту лінії від міжфазних к. з. Якщо струми у фазах лінії при к. з. на землю в її кінці більше, ніж при трифазних к. з., то відсічка відбудовується від цих найбільших струмів.

Струм спрацювання фазного перерізу має бути також відбудований від кидків струмів намагнічення силових трансформаторів, що примкнули до лінії.

Зона дії фазного перерізу визначається при мінімальних струмах в лінії, що мають місце при двофазних к. з. і мінімальному режимі роботи системи.

Ці зони визначають графо-аналітичним методом, а для простих схем також і аналітичним методом.

Обчислюємо максимальні надперехідні струми при трифазному к. з. у кінці лінії $I - II$ і $II - III$ відповідно $I_{кII}^{(3)}$ і $I_{кIII}^{(3)}$, від яких мають бути відбудовані струми спрацювання перерізів $I_{с.омсI}$ і $I_{с.омсII}$.

Опори системи в максимальному і мінімальному режимах обчислюємо за даними струмів трифазного к. з. на шинах I (рис. 3.1, а) і середній розрахунковій напрузі $U_{ср.ф} = 230 / \sqrt{3} = 133 \text{ кВ}$:

$$x_{0.макс} = U_{ср.ф} / I_{кIмакс}^{(3)} = 133000 / 15000 = 8,86 \text{ Ом};$$

$$x_{0.мин} = U_{ср.ф} / I_{кIмин}^{(3)} = 133000 / 10000 = 13,3 \text{ Ом}.$$

При питомому опорі ліній $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$ струми у кінці кожної лінії рівні:

$$I_{кIIмакс}^{(3)} = U_{ср.ф} / (x_{с.макс} + x_{y0} l_{I-II}) = 133 / (8,86 + 0,4 \cdot 60) = 4,05 \text{ кА};$$

$$I_{кIIIмакс}^{(3)} = U_{ср.ф} / [x_{с.макс} + x_{y0} (l_{I-II} + l_{II-III})] = 133 / (8,86 + 0,4 \cdot 190) = 1,57 \text{ кА}.$$

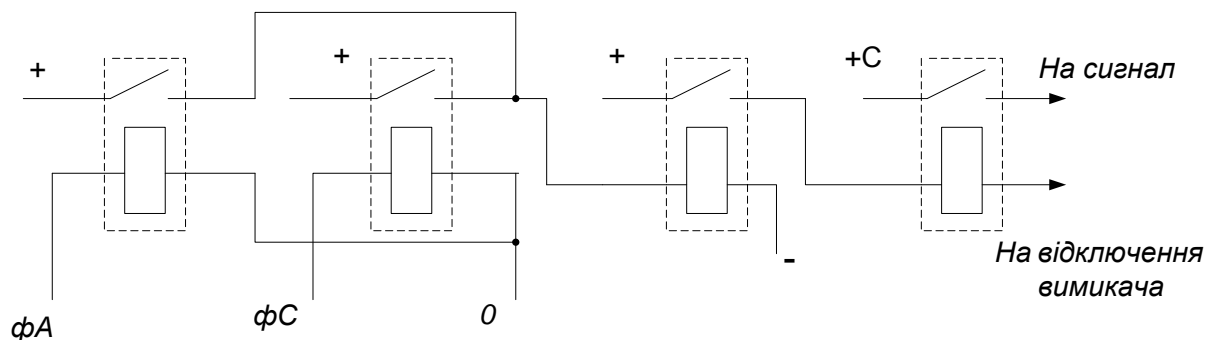


Рисунок 3.2 – Спрощена схема двофазного, двохрелейного максимального струмового відсічення без витримки часу

Струми спрацювання відсічок ліній $I—II$ і $II—III$ обчислюються за формулою

$$I_{с.отс} = k_n I_{к.макс}, \quad (3.1)$$

де k_n — коефіцієнт надійності, що враховує погрішність в розрахунку струмів к. з. і похибка в струмі спрацювання реле.

Для реле $PT-40$ $k_n = 1,2 \div 1,3$; для реле $PT-80$ $k_n = 1,5 \div 1,6$; для реле PTM $k_n = 1,4 \div 1,5$ [8].

У виразі 3.1 коефіцієнт повернення реле k_g не враховується, оскільки струмові реле при зовнішніх к.з. не спрацьовують.

Оскільки x_{0c} більше $x_{1c} \approx x_{2c}$ і $x_{0y0} \approx 3,5x_{1y0}$, те струми при трифазних к. з. більше, ніж струми при замиканнях на землю, тому відсічення відбудовуємо від струмів $I_k^{(3)}$:

$$I_{с.отсI} = k_n I_{кIIмакс}^{(3)} = 1,2 \cdot 4,05 = 4,86 \text{ кА};$$

$$I_{с.отсII} = k_n I_{кIIIмакс}^{(3)} = 1,2 \cdot 1,57 = 1,88 \text{ кА}.$$

Графічно для визначення максимальної зони дії відсічень обчислюються максимальні струми при трифазних к. з. $k_n I_{к.макс}^{(3)}$ і мінімальні струми при двофазних к. з. $I_{к.мин}^{(2)}$ у декількох точках лінії. По вчислених струмах будуються криві залежності струмів к. з. у лінії від її довжини (рис. 3.1, б). По точках перетину прямої що відповідає струму спрацювання відсічення, з цими кривими визначають зони дії відсічок. Надперехідні струми трифазного і двофазного к. з. у лініях $I—II$ і $II—III$ обчислюємо по формулах:

$$I_{к.л}^{(3)} = U_{ср.ф} / (x_c + x_{y0} ml);$$

$$I_{к.л}^{(2)} = (\sqrt{3} / 2) I_{к.л}^{(3)},$$

де m — частина довжини l ;

x_c — опір системи в максимальному або в мінімальному режимі.

Результати обчислень зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Відносна довжина лінії (m) від шин до точки к.з.	Струми в лініях (А) при к.з.	
	Трифазне (максимальний режим системи)	Двофазне (мінімальний режим системи)
	<i>Лінія I-II</i>	
0	15000	8670
0,3	8280	5520
0,6	5710	4160
1	4060	3090
	<i>Лінія II-III</i>	
0	4060	3090
0,3	2740	2180
0,6	2075	1680
1	1570	1290

Провівши на графіку прямі, що відповідають значенням $I_{c.omcI}$ і $I_{c.omcII}$, визначаємо мінімальні і максимальні зони, що захищаються. Ці зони дорівнюють (рис. 3.1, б): для відсічки *I* — 43,3 і 77,4% і для відсічки *II* — 39,2 і 65,3% відповідно від довжини ліній, що захищаються. По ПУЕ зона, що захищається, має бути не менше 15—20% довжини ділянки, що захищається, при ушкодженнях в нормальному робочому режимі.

Для забезпечення розрахункової зони дії відсічок струмова погрішність TC_f не має бути більше 10% при 110% величини струму спрацювання відсічень.

Аналітично зони дії пеперізів можуть бути визначені з умови рівності струму при к. з. на лінії у кінці зони дії відсічення струму спрацювання пеперізу т. ч.

$$I_{c.отс} = I_{к.макс}^{(3)} = E_{с.ф} / (x_{с.макс} + x_{отс.макс}^{(3)}),$$

звідки

$$x_{отс.макс}^{(3)} = (E_{с.ф} / I_{с.отс}) - x_{с.макс} \quad (3.2)$$

чи

$$x_{\%отс.макс}^{(3)} = 100x_{отс.макс}^{(3)} / x_{л} = [(E_{с.ф} / I_{с.отс}) - x_{с.макс}]100 / x_{л}. \quad (3.2a)$$

Аналогічно при двофазному к. з.

$$x_{\%отс.мин}^{(2)} = 100[(0,867 E_{с.ф} / I_{с.отс}) - x_{с.мин}] / x_{л}, \quad (3.3)$$

де $x_{л} = x_{уд} l$ — опір лінії.

По (3.2) і (3.3) перевіримо для лінії *I—II* отримані значення зон дії відсічень графо-аналітичним методом:

$$x_{\%отс.макс}^{(3)} = \frac{100}{24} \left(\frac{230000}{\sqrt{3} \cdot 4860} - 8,86 \right) = 76,3;$$

$$x_{\%отс.макс}^{(2)} = \frac{100}{24} \left(\frac{0,867 \cdot 230000}{\sqrt{3} \cdot 4860} - 13,3 \right) = 43,4.$$

Порівняння результатів аналітичного і графо-аналітичного розрахунку показує їх збіг, проте аналітичний метод набагато простіше, точніше і дає можливість виконання розрахунків за допомогою електронно-обчислювальних машин (*ЕОМ*). З точки зору учбового і фізичного представлення графоаналітичний метод дає наочне представлення і пояснення розрахунку відсічок.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 3.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{к.мін}^{(2)}, кА$	3,01	3,02	3,03	3,04	3,05	3,06	3,07	3,08	3,09	3,1	3,2	3,21
$I_{к.макс}^{(3)}, кА$	1,57	1,56	1,57	1,54	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59	1,67	1,59	1,57

3.2. Розрахувати струми спрацювання і зони дії максимальних струмових відсічок *I* і *II* без витримки часу, встановлених на обох кінцях *I* і *II* для лінії 330 кВ з двостороннім живленням, за початковими даними, приведеними на рис. 3.3, а. При розрахунку струмів спрацювання врахувати, що у будь-якій точці к. з. на землю на лінії повні струми в пошкоджених фазах з обох боків лінії менше струмів при трифазних к. з. на лінії.

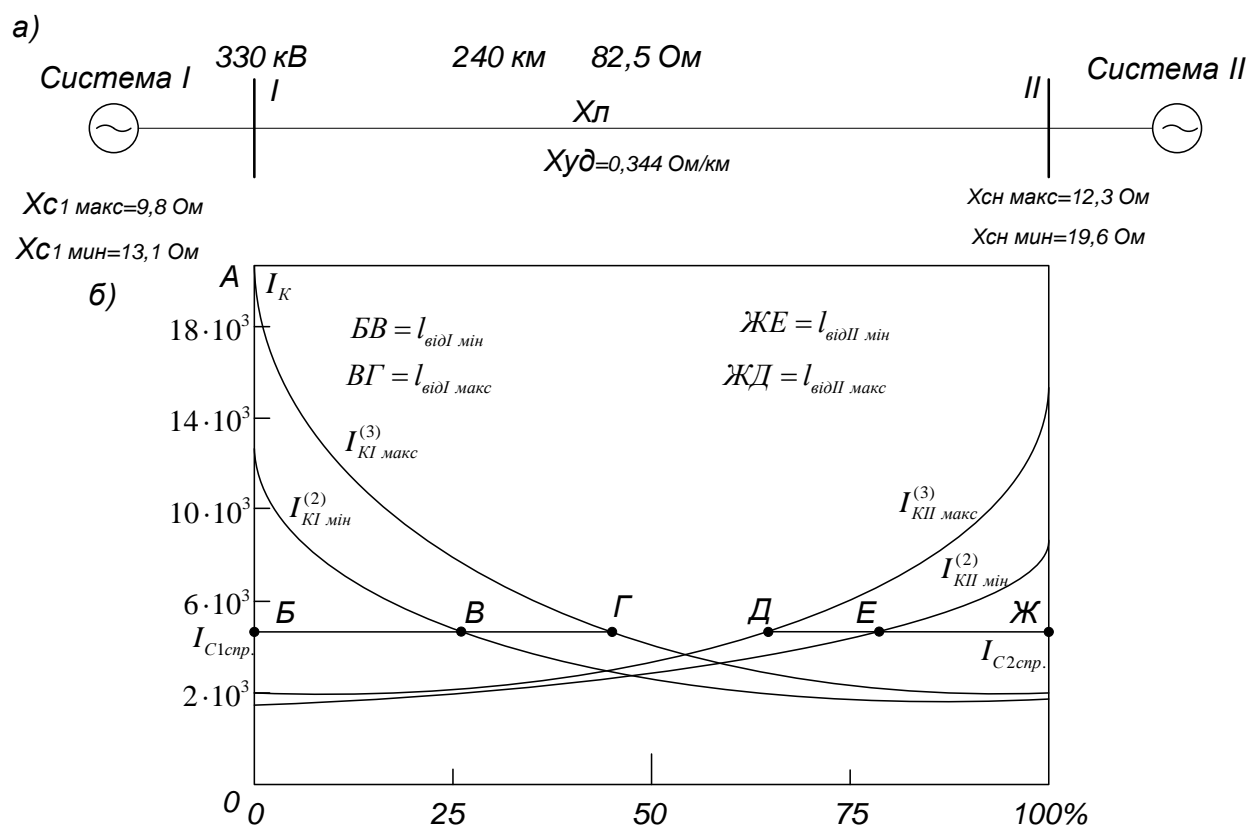


Рисунок 3.3 – До завдання 3.2: а — початкова схема лінії з двостороннім живленням;
 б — графічне визначення зон дії перерізів

Рішення. На лініях з двостороннім живленням максимальні фазні струмові відсічення без витримки часу, встановлювані на обох кінцях ліній, мають бути відбудовані:

а) від максимальних значень надперехідних струмів, що протікають по лінії, що захищається, при трифазних к. з. на її кінцях, що рівнозначно к. з. на шинах, до яких лінія підключена;

б) від максимальних значень струмів при гойданнях генераторів системи I відносно генераторів системи II $I_{\text{кач. макс}}$, які мають місце на лінії при розбіжності за фазою е. р. с. цих систем на 180° у їх максимальних режимах.

Більше значення струму, розраховане за цими умовами береться за розрахункове.

Максимальні струми трифазного к. з., що протікають по лінії від системи I при к. з. у шин II $I_{Ik}^{(3)}$ і від системи II при к. з. у шин I $I_{Ik}^{(3)}$:

$$I_{Ik}^{(3)} = U_{cp.\phi} / (x_{cI.макс} + x_{л}) = \left(\frac{340}{\sqrt{3}} \right) / (9,8 + 82,5) = 2,13 \text{ кА};$$

$$I_{IIk}^{(3)} = U_{cp.\phi} / (x_{cII макс} + x_{л}) = \left(\frac{340}{\sqrt{3}} \right) / (12,3 + 82,5) = 2,07 \text{ кА}.$$

Максимальний струм гойдань обчислюваний за виразом

$$I_{кач.макс} = \frac{2 \cdot 1,1 U_{cp.\phi}}{x_{cI макс} + x_{л} + x_{cII макс}} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 340}{\sqrt{3}(9,8 + 82,5 + 12,3)} = 4,13 \text{ кА}.$$

Відбудовуємо відсічення від струму гойдань по (3.1), де $k_n = 1,2 - 1,3$

$$I_{с.отсI} = I_{с.отсII} = k_n I_{кач.макс} = 1,25 \cdot 4,13 = 5,17 \text{ кА}.$$

Зони дії відсічень для наочності визначимо графоаналітичним методом, а для перевірки також і аналітично по (3.2) і (3.3).

Струми к.з. у лінії від системи *I* і обчислюємо. Результати розрахунку приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Відносна довжина лінії (m) від шин I до точки к.з., %	Струм в лінії А при к.з.			
	Трифазне (максимальний режим)		Двофазне (мінімальний режим)	
	Від системи I	Від системи II	Від системи I	Від системи II
0	20000	2070	13000	1670
25	6460	2650	5050	2090
50	3850	3670	3140	2800
75	2740	5960	2270	4230
100	2130	16000	1780	8670

По даним табл. 3.2 на рис. 3.3, б приведені криві струмів в лінії $I_{кI}$ і $I_{кII}$ від систем *I* і *II* залежно від місця к. з. на ній, *m* — частина довжини лінії у відсотках, вважаючи, від шин *I*. Проводимо лінії *БВГ* і *ЖЕД* до перетину з кривими струмів. По точках перетину визначаємо графічно зони дії фазних відсічень. З боку системи *I* мінімальні і максимальні зони відповідно рівні 24 і 34%.

Те ж з боку системи *II* — 16 і 30%.

Для сторони системи *II* вичислимо ці зони по (3.2) і (3.3):

$$x_{\% \text{отс II макс}}^{(3)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{U_{\text{ср.ф}}}{I_{\text{с.отс II}}} - x_{\text{с II макс}} \right) = \frac{100}{82,5} \left(\frac{340}{\sqrt{3} \cdot 5,17} - 12,3 \right) = 31,2;$$

$$x_{\% \text{отс II мин}}^{(3)} = \frac{100}{x_{\text{л}}} \left(\frac{0,867 U_{\text{ср.ф}}}{I_{\text{с.отс II}}} - x_{\text{с II мин}} \right) = \frac{100}{82,5} \left(\frac{0,867 \cdot 340}{\sqrt{3} \cdot 5,17} - 19,6 \right) = 16,2.$$

Аналітичний метод точніше і набагато прискорює розрахунок зон, оскільки не потрібно обчислення струмів в різних точках лінії і графічної побудови кривих.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані для розрахунку завдання 3.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$x_{\text{с1. макс}}, \hat{I} \text{ в}$	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
$x_{\text{с1. мин}}, \hat{I} \text{ в}$	12,9	12,9	12,9	12,9	13	13	12,9	12,9	12,9	12,9	13	13
$x_{\text{с2. макс}}, \hat{I} \text{ в}$	12,2	12,2	12,2	12,5	12,5	12,5	12,2	12,2	12,2	12,5	12,5	12,5
$x_{\text{с2. мин}}, \hat{I} \text{ в}$	19,5	19,5	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5	19,5	19,3	19,3	19,4	19,5

3.3. Розрахувати струми спрацювання максимальних фазних відсічок без витримки часу, а для лінії ЛІ з витримкою часу і аналітичним методом визначити зони їх дії для лінії ЛІІ і лінії ЛІІІ за даними, приведеними на рис. 3.4. Для одного випадку к. з. виконати розрахунок графоаналітичним методом.

Рішення. Лінія ЛІІІ — одностороннього живлення, тому струм спрацювання перерізів без витримки часу відбудовуємо від максимального надперехідного струму при трифазному к. з., приведенного на рис. 3.4, по (3.1):

$$I_{\text{с.отс III}} = k_{\text{н}} I_{\text{кЛІІІ макс}} = 1,25 \cdot 2270 = 2840 \text{ А.}$$

Перерізи без витримки часу лінії ЛІІ з боку І має бути відбудована від максимальних струмів: а) при трифазних к. з. на шинах І і ІІІІ; б) при розгойдуваннях генераторів системи І по відношенню до генераторів системи ІІ. Обчислюємо струм розгойдування:

$$I_{\text{кач}} = 2E_{\text{с.ф}} / (x_{\text{сІ макс}} + x_{\text{ЛІ}} + x_{\text{ЛІІ}} + x_{\text{сІІ макс}}) = 2 \cdot 66500 / (4 + 6,4 + 4,8 + 6) = 6270 \text{ А.}$$

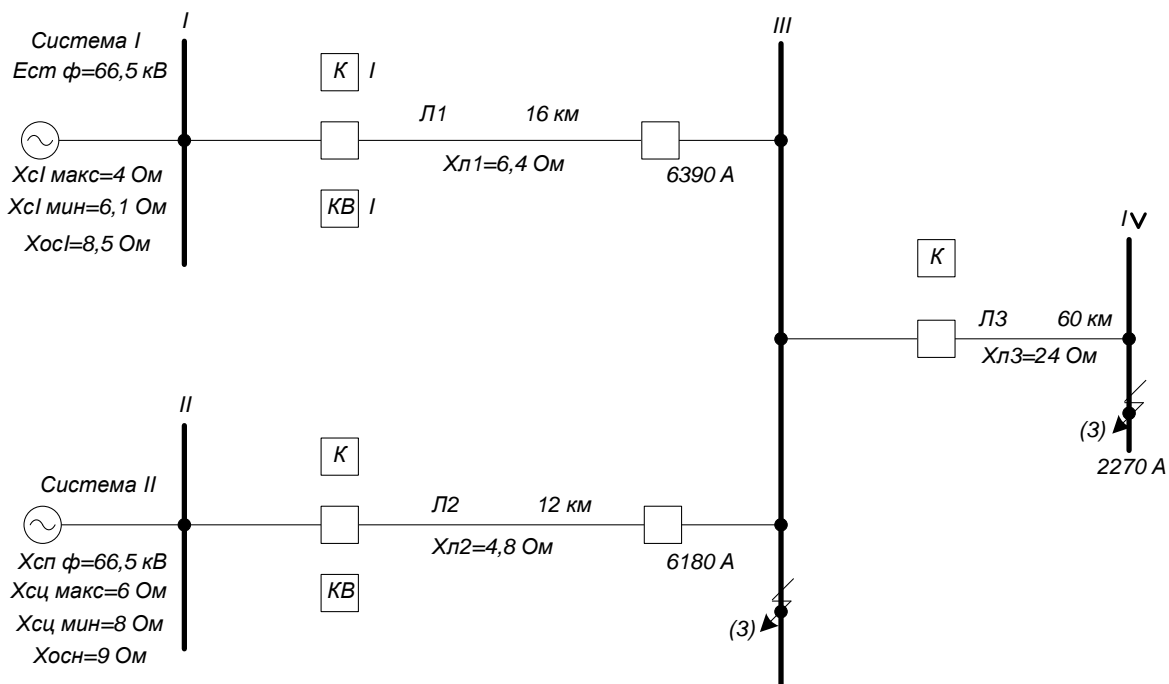


Рисунок 3.4 – Початкова схема

Струм в лінії $Л1$ при к. з. на шинах I

$$I_{клЛ1}^{(3)} = E_{с.ф} / (x_{сII макс} + x_{Л2} + x_{Л1}) = 66500 / (6 + 4,8 + 6,4) = 3870 \text{ А.}$$

Розрахунковим є максимальний струм в лінії $Л1$ при к. з. на шинах III :

$$I_{с.отсI} = k_n I_{кЛ1 макс} = 1,25 \cdot 6390 = 7980 \text{ А.}$$

Відсічка без витримки часу на лінії $Л1$ з боку шин III не може бути застосована, оскільки при розрахованому струмі спрацювання 7980 А вона не діє при к. з. на лінії у шин III , струм в якій рівний 6160 А (див. рис. 3.4).

Струм спрацювання відсічок I з витримкою часу на лінії $Л1$ з боку шин I має бути погоджений по чутливості з відсіченням без витримки часу III лінії $Л3$ на межі її спрацювання в умовах, коли по лінії $Л3$ протікає мінімальний, а по лінії $Л1$ — максимальний надперехідний струм.

Ця умова виконуватиметься при мінімальному опорі системи I (максимальний режим) і максимальному опорі системи II (мінімальний режим) до шин III (рис. 3.4):

$$x_{I мин} = x_{сI макс} + x_{Л1} = 4 + 6,4 = 10,4 \text{ Ом;}$$

$$x_{II макс} = x_{сII мин} + x_{Л2} = 8 + 4,8 = 12,8 \text{ Ом.}$$

Розрахунковий еквівалентний опір системи *I* і *II* до шин *III*

$$x_{\text{э.расч}} = \frac{x_{I \text{ мин}} x_{II \text{ макс}}}{x_{I \text{ мин}} + x_{II \text{ макс}}} = \frac{10,4 \cdot 12,8}{10,4 + 12,8} = 5,73 \text{ Ом.}$$

Струм трифазного к. з. у лінії *ЛЗ* на межі спрацювання відсічення *III* визначаємо за формулою

$$I_{\text{кЛЗ}} = I_{\text{с.отсIII}} = E_{\text{с.ф}} / (x_{\text{э.расч}} + x_{\text{отсIII мин}}^{(3)}), \quad (3.4)$$

де $x_{\text{отсIII мин}}^{(3)}$ — мінімальний опір (зона) лінії *ЛЗ*, при якій діє переріз *III* при трифазному к. з. у приведених вище умовах. З цього виразу визначаємо

$$x_{\text{отсIII мин}}^{(3)} = [E_{\text{с.ф}} / I_{\text{с.отсIII}}] - x_{\text{э.расч}} = (66500 / 2840) - 5,73 = 17,67 \text{ Ом}; \quad (3.5)$$

по відношенню до довжини лінії *ЛЗ*

$$x_{\% \text{отсIII мин}}^{(3)} = 100 x_{\text{отсIII мин}}^{(3)} / x_{\text{ЛЗ}} = 100 \cdot 17,67 / 24 = 73,5.$$

Обчислюємо розрахунковий струм в лінії *ЛІ*, від якого має бути відбудоване відсічення *I* з витримкою часу, за формулою

$$I_{\text{ЛІ расч}} = I_{\text{кЛЗ}} x_{\text{э.расч}} / x_{I \text{ мин}} = I_{\text{с.отсIII}} x_{\text{э.расч}} / x_{I \text{ мин}}, \quad (3.6)$$

де у кінці зони дії відсічення *III* $I_{\text{кЛЗ}} = I_{\text{отсIII}}$.

Струм спрацювання відсічення *I* з витримкою часу обчислюємо по (3.1):

$$I_{\text{отсI}} = k_n I_{\text{ЛІ расч}} = \frac{k_n x_{\text{э.расч}} I_{\text{отсIII}}}{x_{I \text{ мин}}} = \frac{1,25 \cdot 5,73 \cdot 2840}{10,4} = 1960 \text{ А.}$$

Зону на лінії *ЛЗ*, у якій діє відсічення *I* з витримкою часу при трифазному к. з. $x_{\text{отсI ЛЗ}}^{(3)}$ визначаємо з формули

$$I_{\text{с.отсI}} = I_{\text{кЛЗ}} t \frac{x_{\text{э.расч}}}{x_{I \text{ мин}}} = \frac{E_{\text{с.ф}} x_{\text{э.расч}}}{(x_{\text{э.расч}} + x_{\text{отсI ЛЗ}}^{(3)}) x_{I \text{ мин}}},$$

звідки

$$x_{\text{отсI ЛЗ}}^{(3)} = (E_{\text{с.ф}} x_{\text{э.расч}} / I_{\text{с.отсI}} x_{I \text{ мин}}^{(3)}) - x_{\text{э.расч}};$$

$$x_{\text{отсI ЛЗ}}^{(3)} = \frac{66500 \cdot 5,73}{1960 \cdot 10,4} - 5,73 = 12,97 \text{ Ом.}$$

По відношенню до довжини лінії *ЛЗ*

$$x_{\% \text{отсI ЛЗ}}^{(3)} = 100 x_{\text{отсI ЛЗ}}^{(3)} / x_{\text{ЛЗ}} = 100 \cdot 12,97 / 24 = 54.$$

Зони дії відсічення I без витримки часу при трифазному к. з. у максимальному режимі і при двофазному к. з. у мінімальному режимі системи I обчислюємо по (3.2) і (3.3)

$$x_{\%отс I Л1}^{(3)} = \frac{100}{x_{Л1}} \left(\frac{E_{с.ф}}{I_{с.отс I}} - x_{сI макс} \right) = \frac{100}{6,4} \left(\frac{66,5}{7,98} - 4 \right) = 67,7;$$

$$x_{\%отс I Л1}^{(2)} = \frac{100}{x_{Л1}} \left(\frac{0,867 E_{с.ф}}{I_{с.отс I}} - x_{сI мин} \right) = \frac{100}{6,4} \left(\frac{0,867 \cdot 66,5}{7,98} - 6,1 \right) = 17,7.$$

Для повноти обчислень визначимо мінімальні зони дії на лінії ЛЗ перерізів III без витримки часу і перерізом I з витримкою часу, які мають місце при двофазних к. з. на лінії і мінімальних режимах систем I і II . Ці обчислення виконуємо за формулами:

$$x_{\%і ÷ ÷ ÷ III і ÷ і}^{(2)} = 100[(0,867 E_{\tilde{n},\delta} / I_{\tilde{n},\delta \div \tilde{n} III}) - x_{\tilde{y},\dot{i} \div \tilde{e} i}] x_{\tilde{E} 3}; \quad (3.7)$$

$$x_{\%і ÷ ÷ ÷ I \tilde{E} 3}^{(2)} = \frac{100}{x_{\tilde{E} 3}} \left(\frac{0,867 E_{\tilde{n},\delta} x_{\tilde{y},\dot{i} \div \tilde{e} i}}{I_{\tilde{n},\delta \div \tilde{n} II} x_{I,\dot{i} \div \tilde{e} i}} - x_{\tilde{y},\dot{i} \div \tilde{e} i} \right), \quad (3.8)$$

де

$$x_{I.мин} = x_{сI.мин} + x_{Л1} = 6,1 + 6,4 = 12,5 \text{ Ом};$$

$$x_{\tilde{y},мин} = \frac{x_{I.мин} x_{II.мин}}{x_{I.мин} + x_{II.мин}} = \frac{12,5(8 + 4,8)}{12,5 + 8 + 4,8} = 6,32 \text{ Ом};$$

$$x_{\%отс III мин}^{(2)} = \frac{100}{24} \left[\frac{0,867 \cdot 66,5}{2,84} - 6,32 \right] = 58,2;$$

$$x_{отс I Л3 мин}^{(2)} = \frac{100}{24} \left[\frac{0,867 \cdot 66,5 \cdot 6,32}{1,96 \cdot 12,5} - 6,32 \right] = 35,6.$$

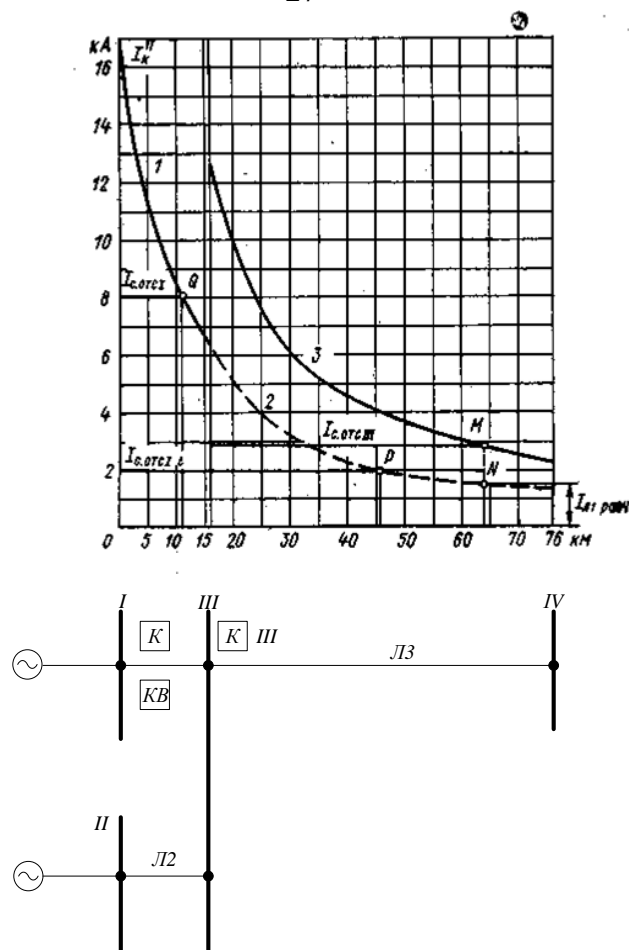


Рисунок 3.5 – Графоаналітичний розрахунок відсічень *I* і *III*

На рис. 3.5 приведено для наочності графо-аналітичне визначення струмів спрацювання захистів: *I* — без витримки і з витримкою часу, *III* — без витримки і зони їх дії для випадку трифазного к. з., детально описаного в [2].

Крива *1* — струм в лінії *Л1* при к. з. на ній; крива *2* — струм в лінії *Л1* при к. з. на лінії *Л3*; крива *3* — струм в лінії *Л3* при к. з. на ній. Точки перетину перпендикулярів, приведених з точок *М*, *Р* і *Q* на вісь абсцис, визначають на останній зоні дії захистів *I* і *III*.

Таблиця 3.5 – Вихідні дані для розрахунку завдання 3.3.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{\hat{e}.c.III}^{(3)}, \text{кА}$	2,4	2,5	2,36	2,4	2,45	2,55	2,66	2,45	2,48	2,78	2,69	2,1
$I_{\hat{e}.c.IV}^{(3)}, \text{кА}$	3,1	3,2	3,23	3,24	3,4	3,5	3,45	3,25	3,24	3,52	3,62	3,41

1. Поясніть сутність максимального струмового захисту та необхідність його введення.
2. Розкрийте сутність терміну «ступінь селективності» та поясніть правила застосування даного параметру.
3. Обґрунтуйте форму часово-струмової залежності.
4. Поясніть послідовність розрахунку проміжних часово-струмових характеристик.
5. Обґрунтуйте необхідність врахування струму само запуску двигунів та поясніть яким чином він враховується за умов налаштування максимально струмового захисту.

Література [5 с. 123-137; 7 с. 112-148; 8 с. 97-109]

Практичне заняття № 4**Тема 4. Розрахунок максимального струмового направленої захисту****Практичне заняття за темою № 4. Розрахунок максимального струмового направленої захисту**

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок максимального струмового направленої захисту

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які параметри та характеристики лінії потрібно враховувати при розрахунку максимального струмового направленої захисту?
2. Які методи використовуються для визначення порогового значення струму для спрацювання струмового направленої захисту, щоб відокремити відмовлену ділянку лінії?
3. Як впливають фактори, такі як типи навантаження та конфігурація лінії, на розрахунок та ефективність струмового направленої захисту? Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок максимального струмового відсічення без витримки та з витримкою часу в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку максимального струмового направленої захисту

Хід проведення практичного заняття**Практичне заняття № 4**

4.1. Вибрати витримки часу к. з. максимальних струмових направлених і ненаправлених одноступінчатих захистів 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 (рис. 4.1.) і вказати, які з цих захистів мають бути спрямованими для радіальної мережі з ізольованою нейтраллю і двостороннім живленням.

Початкові дані. Витримки часу при к. з. максимальних струмових захистів 1, 5, 8, 11 ліній з одностороннім живленням, приєднаних до шин А, Б, В і Г, приведені на рис. 4.1; ступінь селективності $\Delta t = 0,55$ с.

Рішення. У радіальній мережі з двостороннім живленням можливо забезпечити

селективне відключення пошкодженої лінії максимальними струмовими захистами з витримкою часу, якщо деякі з них виконати спрямованими, т. ч. діючими тільки при напрямі потужності від шин у бік лінії.

Контроль напрямку потужності на лінії здійснюється реле напрямку потужності змішаного типу, електромеханічний момент обертання яких виражається рівнянням $M_{\text{сп}} = kU_p I_p \cos(\varphi_p + \alpha)$, де $\alpha = 30$ чи 45° . У мережах з ізольованою нейтраллю максимальні струмові захисти виконують двофазними двохранейними за схемою неповної зірки, включаючи захисти на струми фаз A і C . Прийнята 90-градусна схема включення реле напрямку потужності змішаного типу, т. ч. $\dot{I}_{pa} = \dot{I}_a$; $\dot{U}_{pa} = \dot{U}_{bc}$; $\dot{U}_{pb} = \dot{U}_{ca}$; $\dot{I}_{pc} = \dot{I}_c$; $\dot{U}_{pc} = \dot{U}_{ab}$.

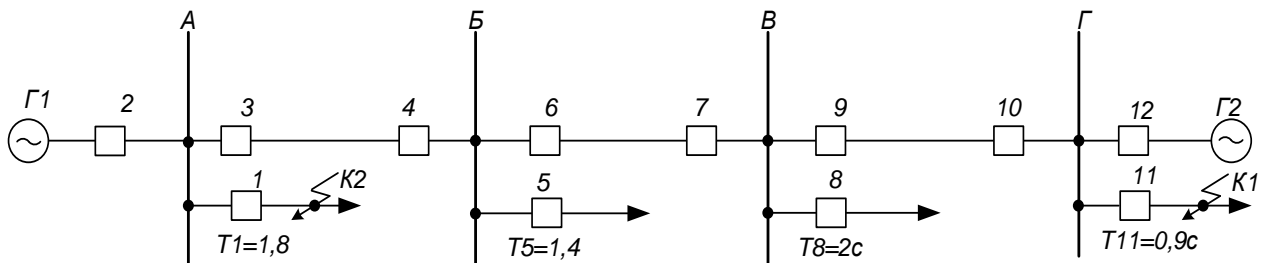


Рисунок 4.1 – Радіальна мережа з ізольованою нейтраллю і двостороннім живленням

На рис. 4.2 приведена схема включення фази A максимального струмового спрямованого захисту з незалежною характеристикою часу спрацювання. Струмові реле T здійснює пофазний пуск. Цей захист в розподільних мережах виконується на змінному оперативному струмі. У мережі з ізольованою нейтраллю, а також в мережі з глухозаземленою нейтраллю, де максимальні спрямовані захисти автоматично виводяться з дії (блокуються) при к. з. на землю, струм спрацювання пускового органу T обчислюється за (2.3).

У разі відсутності такого блокування в мережах з глухозаземленою нейтраллю для запобігання можливої неправильної роботи реле напрямку потужності, включеного на струм неушкодженої фази $I_{н.ф}$, при к. з. на землю струм спрацювання пускового органу має бути також відбудований від цього струму за формулою

$$I_{с.з} = k_n I_{н.ф}, \quad (4.1)$$

де $k_n = 1, 2 \div 1, 3$; $I_{н.ф} = I_{нагр} + kI_k$; kI_k — доля струму к. з., що замикається по неущкодженій фазі ($k < 1$). Більше зі значень, отриманих по (2.3) і (4.1), береться за розрахункове.

Для схеми мережі, приведеної на рис. 4.1, для забезпечення селективної дії захисту 3, 4, 6, 7, 9 і 10 мають бути направленими, а захисту 1, 2, 5, 8, 11 і 12 — ненаправленими.

Витримки часу і струми спрацювання максимальних струмових направлених захистів визначаються за зустрічно-ступінчастим принципом. Цей принцип полягає в тому, що узгодження захистів по струму і часу робиться між тими захистами, які діють при однаковому напрямі потужності к. з. по радіальних лініях (від шин у бік лінії), що захищаються.

Так, при міжфазному к. з. у точці KI можуть діяти спрямовані захисти 3, 6, 9 і ненаправлені — 2, 11 і 5.

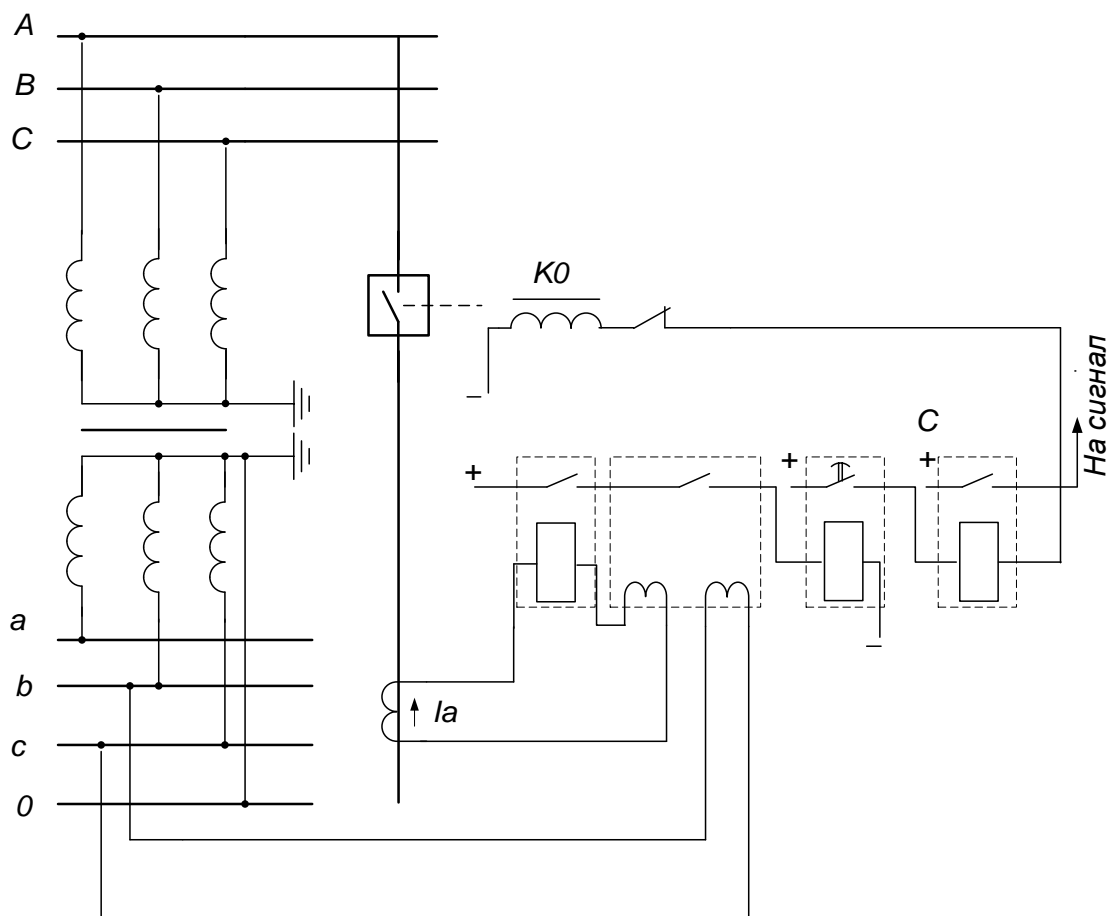


Рисунок 4.2 – Спрощена схема включення однієї фази максимального спрямованого захисту

Щоб забезпечити селективну дію, витримки часу вибираються для цих захистів за ступінчастим принципом, збільшуючись у міру наближення до джерела $Г1$:

$$t_9 = t_{11} + \Delta t = 0,9 + 0,55 = 1,45 \text{ с.}$$

Захист 6 має бути погоджений не із захистом 9, а із захистом 8, що має велику витримку часу:

$$t_6 = t_8 + \Delta t = 2 + 0,55 = 2,55 \text{ с}; \quad t_3 = t_6 + \Delta t = 2,55 + 0,55 = 3,1 \text{ с};$$

$$t_2 = t_3 + \Delta t = 3,1 + 0,55 = 3,65 \text{ с.}$$

При міжфазному к. з. у точці $K2$ можуть діяти направлені захисти 4,7,10 і ненаправлені захисти 1, 2 і 5. Тому $t_4 = t_1 + \Delta t = 1,8 + 0,55 = 2,35 \text{ с};$
 $t_7 = t_4 + \Delta t = 2,35 + 0,55 = 2,9 \text{ с};$
 $t_{10} = t_7 + \Delta t = 2,9 + 0,55 = 3,45 \text{ с};$
 $t_{12} = t_9 + \Delta t = 3,45 + 0,55 = 4 \text{ с.}$

Узгодження захисту 4 із захистом 2 і захисту 9 із захистом 12 не вимагається, оскільки при к. з. між вимикачем 2 і генератором $Г1$ і між вимикачем 12 і генератором $Г2$ на генераторах $Г1$ і $Г2$ спрацюють швидкодіючі диференціальні захисту останніх.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 4.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T1, \text{с}$	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$T11, \text{с}$	0,8	0,7	0,6	0,5	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

4.2. Вибрати витримки часу к. з. максимальних струмових направлених і ненаправлених одноступінчатих захистів ліній, працюючих за кільцевою схемою і вказати, які з цих захистів мають бути спрямованими для кільцевої мережі з ізольованою нейтраллю і одним джерелом живлення $Г1$, приведеною на рис. 4.3.

Початкові дані. Витримки часу при к. з. максимальних струмових захистів ліній з одностороннім живленням, приєднаних до шин $A, B, B, Г$ і $Д$, приведені на рис. 4.3, ступінь селективності $\Delta t = 0,5 \text{ с}$.

Рішення. У кільцевих мережах з одним джерелом живлення, так само як і в радіальних мережах з двостороннім живленням, витримки часу максимальних струмових спрямованих одноступінчатих захистів вибирають за зустрічно-

ступінчастим принципом (див. завдання 4.1).

Проте в кільцевих мережах з одним джерелом живлення спрямовані захисту 2 і 13, встановлені на приймальних кінцях головних ліній AB і AD , можуть бути виконані з невеликою витримкою часу 0,3—0,5 с, яка потрібна для настроєння від струмів, генерованих електродвигунами навантаження при к. з. у живлячій мережі (точка $K1$ на рис. 4.3).

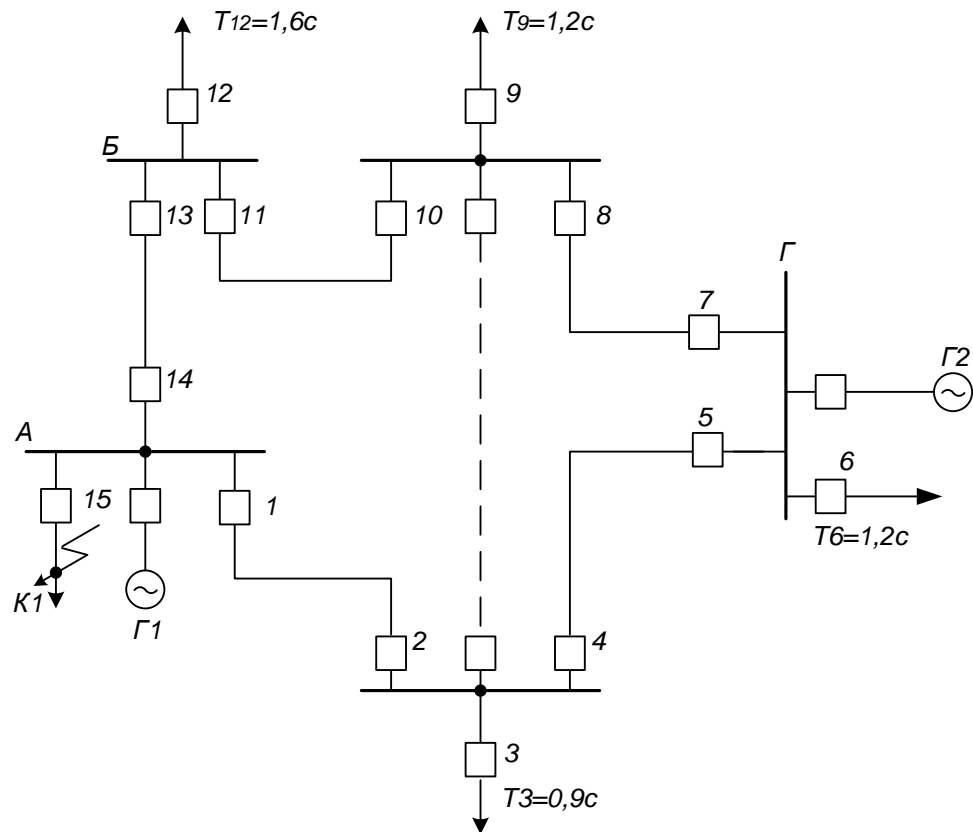


Рисунок 4.3 – Кільцева мережа з ізольованою нейтраллю і одним джерелом живлення

Крім того, в даній мережі можлива почергова дія, що називається каскадною дією, спрямованих захистів 2 до 13 при к. з. поблизу шин A .

При к. з. на лінії AB у шин A струм к. з., в основному, проходить через вимикач 14, тому захист 13 діятиме тільки після відключення вимикача 7.

Аналогічно, захист 2 почне діяти після відключення вимикача 1 при к. з. поблизу нього.

Каскадна дія подовжує час ліквідації к. з.

Для кільцевої мережі, приведеної на рис. 4.3, забезпечити селективну дію

можливо, якщо захист 2, 5, 8, 10, 13 будуть спрямованими.

Витримки часу спрямованих захистів 2 і 13 приймаємо: $t_2 = t_{13} = 0,4$ с.

В цьому випадку для забезпечення селективності захист 5 узгоджується із захистом 3, а не із захистом 2 $t_5 = t_3 + \Delta t = 0,9 + 0,5 = 1,4$ с;
 $t_8 = t_5 + \Delta t = 1,4 + 0,5 = 1,9$ с; $t_{11} = t_8 + \Delta t = 1,9 + 0,5 = 2,4$ с;
 $t_{14} = t_{11} + \Delta t = 2,4 + 0,5 = 2,9$ с; витримку часу захисту 10 необхідно погоджувати не із захистом 13, а із захистом 12, що має більший час спрацювання,
 $t_{10} = t_{12} + \Delta t = 1,6 + 0,5 = 2,1$ с, і для забезпечення селективності із захистом 8 вона має бути спрямованою; $t_7 = t_{10} + \Delta t = 2,1 + 0,5 = 2,6$ с;

$$t_4 = t_7 + \Delta t = 2,6 + 0,5 = 3,1$$
 с; $t_1 = t_4 + \Delta t = 3,1 + 0,5 = 3,6$ с.

Слід зазначити, що якщо кільцева мережа має два джерела живлення (Г2 показаний штриховою лінією) або якщо мережа має хоч би один діагональний зв'язок, що не проходить через шини джерела живлення (штрихова лінія ВД), то в цих випадках не можна добитися селективної дії спрямованих захистів, оскільки унеможливлено вибрати витримки часу за зустрічно-ступінчастим принципом.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 4.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_{3,c}$	1,3	1,4	1,5	1,3	1,6	1,7	1,2	1,1	1,5	1,3	1,0	1,5
$T_{6,c}$	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2	0,8	0,7	1,1	1,0	0,8	1,1
$T_{9,c}$	1,7	1,8	1,9	1,5	1,6	1,5	1,5	0,9	1,5	1,4	1,5	1,7
$T_{12,c}$	1,3	1,4	1,5	1,1	1,4	1,1	1,1	1,5	1,1	1,3	1,4	1,5

Питання для самоперевірки

1. Поясніть сутність максимального струмового направленого захисту та необхідність його введення.
2. В яких схемах електроживлення використовують максимальний струмовий направлений захист і чому?
3. За яким принципом визначають витримку часу та струм спрацювання максимального струмового направленого захисту?

4. Як забезпечується селективна робота максимального струмового направленої захисту?
5. Як впливає на селективну дію максимального струмового направленої захисту діагональний зв'язок при кільцевому з'єднанні енергосистеми з двома джерелами живлення.

Література [1 с. 131-157; 3 с. 20-29; 6 с. 97-109]

Практичне заняття № 5**Тема 5. Розрахунок направленої струмового захисту****Практичне заняття за темою № 5. Розрахунок направленої струмового захисту**

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок направленої струмового захисту

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які основні принципи дії направленої струмового захисту, і як вони відрізняються від звичайного струмового захисту?
 2. Які параметри та характеристики системи потрібно враховувати при розрахунку параметрів направленої струмового захисту?
 3. Як впливають фактори, такі як довжина лінії, типи навантаження та структура мережі, на вибір та розрахунок параметрів направленої струмового захисту?
- Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок направленої струмового захисту в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку направленої струмового захисту

Хід проведення практичного заняття**Практичне заняття № 5**

5.1. Розрахувати первинні струми спрацювання перших східців — струмових відсічень нульової послідовності без витримки часу $I_{1,2}$ і графічно визначити зони їх дії при однофазних к. з., за початковими даними, приведеними на рис. 5.1, для лінії 220 кВ АБ з двостороннім живленням

Рішення. Первинний струм спрацювання першого ступеня — струмової відсічки нульової послідовності без витримки часу на лінії з двостороннім живленням має бути відбудований від максимального струму нульової

послідовності в лінії при к. з. на землю на шинах, до яких підключена ця лінія.

При $x_{0\Sigma} > x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$ струми $I_0^{(1)} > I_0^{(1,1)}$ (див. завдання 4.8), тому струми нульової послідовності в лінії обчислювалися для випадку металевого однофазного к. з. на шинах A , B і в двох місцях на лінії AB табл. 2.1. Результати розрахунку приведені в таблиці. 5.1.

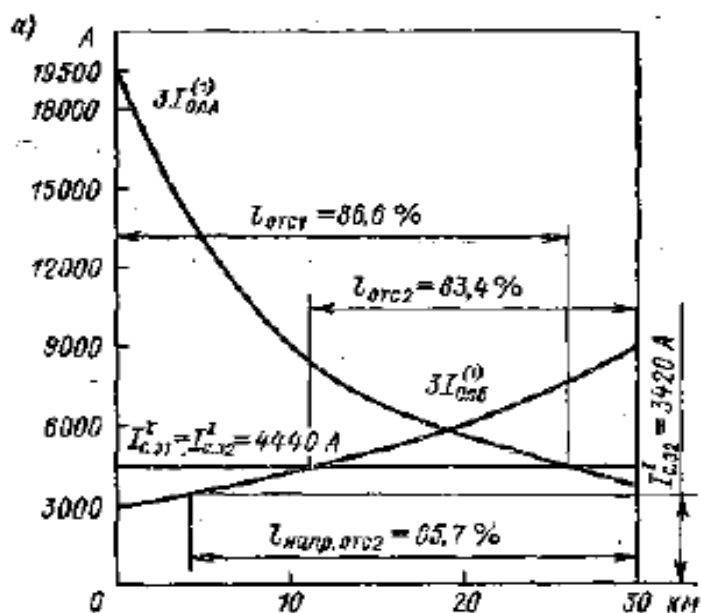
За даними таблиці. 5.1 на рис. 5.1, a приведені криві струму $3I_0$ у лінії AB , що притікає до місця однофазного к. з. від систем A і B .

Струм спрацювання першого ступеня без елемента напрямку M_0 (рис. 5.2) захистів 1 і 2 обчислюємо:

$$I_{c.31}^I = I_{c.32}^I = k_H 3I_{0л.макс} = 1,2 \cdot 3700 = 4440 \text{ A}.$$

На рис. 5.1, a проводимо пряму $I_{c.31}^I$ паралельно осі абсцис, при цьому точки перетину цієї прямої з кривими струмів в лінії від систем A і B $I_{0\dot{A}}^{(1)}$ і $I_{0\dot{B}}^{(1)}$ показують зони дії відсічень 1 і 2 при однофазному к. з., які відповідно складають 86,6 і 63,4%.

Зону дії відсічення 2 можна збільшити, застосувавши для цього захисту елемент контролю напрямку потужності.



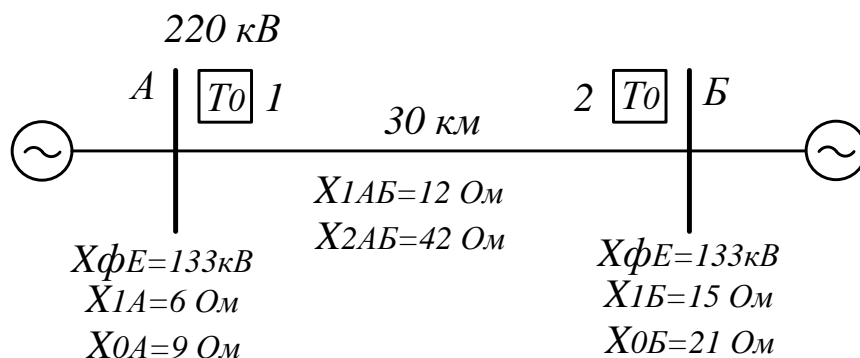


Рисунок 5.1 – Графічне визначення зон дії ненаправленої і направленої струмових перерізів нульової послідовності на лінії з двостороннім живленням

В цьому випадку захист діятиме тільки при напрямі потужності к. з. від шин B у бік лінії BA і не діяти при к. з. на землю на шинах B . Направлений струмовий захист нульової послідовності 2 має бути відбудований від максимального струму в лінії $3I_{0LB}^{(1)}$ при однофазному к. з. на протилежному кінці у шин A , т. ч. від струму 2850 А, а не від струму 3700 А.

В цьому випадку $I_{c,32}^I = 1,2 \cdot 2850 = 3420 \text{ А}$.

Проводячи пряму $I_{c,32}^I = 3420 \text{ А}$ від шин B до перетину з кривою струму $3I_{0LB}^{(1)}$ визначаємо зону дії спрямованого струмового відсічення нульової послідовності 2 при однофазному к. з., яка рівна 85,7%.

Слід підкреслити, що при двофазному к. з. на землю струми нульової послідовності менш вичислених і, отже, зони, що захищаються, будуть також менш вичислених.

Таблиця 5.1

Місце однофазного к. з.	Струми нульової послідовності в лінії АБ $3I_{0л}$, А	
	від системи А	від системи Б
Початок лінії у шин А	19650	2850
10 км від шин А	9070	4410
20 км від шин А	5690	6010
Початок лінії у шин Б	3700	9000

На практиці необхідно визначати і мінімальні зони дії перерізів.

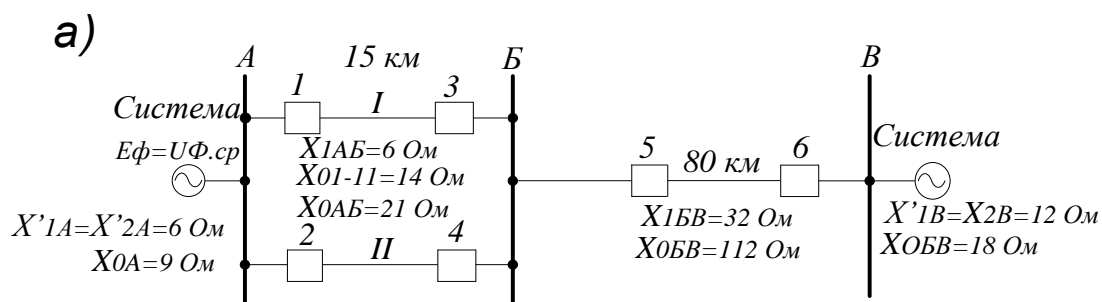
Зазвичай направлений захист нульової послідовності з витримкою часу і без такої застосовують в мережах із заземленими нульовими точками, розташованими з обох боків ділянки мережі.

Ці захисти діють при одному напрямі потужності — від шин у бік ліній, що захищаються, і їх витримки часу підбираються за ступінчастим принципом. Вони встановлюються з метою підвищення чутливості на тому кінці ліній, де при зовнішніх к. з. на шинах струми нульової послідовності в лінії мають більше значення.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 5.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_{1A}, \text{Ом}$	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
$X_{0A}, \text{Ом}$	10	11	12	10	11	12	10	11	12	10	11	12
$X_{1B}, \text{Ом}$	16	18	17	16	18	17	16	18	17	16	18	17
$X_{0B}, \text{Ом}$	20	22	24	20	22	24	20	22	24	20	22	24

5.2. Визначити первинні струми спрацювання першого ступеня без витримки часу $I_{c.31}^I$ і другому ступеню $I_{c.31}^{II}$ струмового захисту нульової послідовності I (2), встановленою на паралельних лініях I і II з однаковими параметрами і взаємодукцією між ними ($x_{0I-II} = 14,1 \text{ Ом}$) за початковими даними, приведеними на рис. 5.3, а.



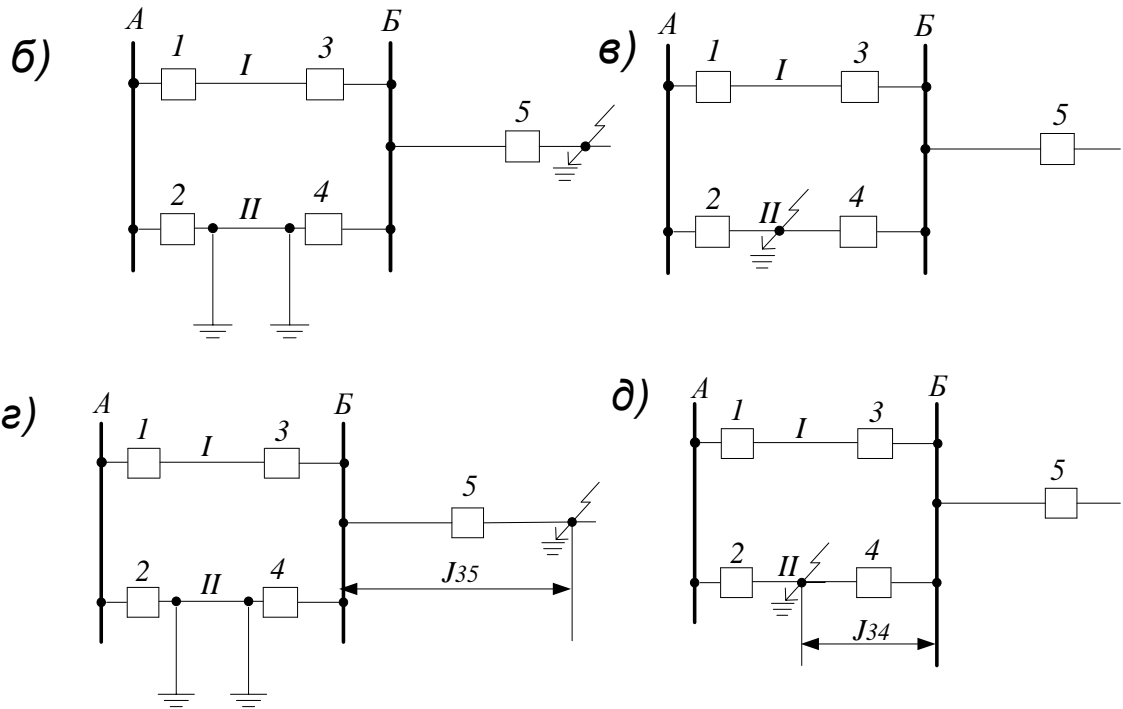


Рисунок 5.3 – Розрахункові режими визначення струму спрацювання першого і другого ступеня захисту I паралельної лінії

Рішення. 1. Первинний струм спрацювання першого ступеня захисту I визначається з урахуванням наявності взаєміндукції між паралельними лініями. В цьому випадку максимальний струм в лінії $3I_{0л.макс}$ може мати місце: а) при однофазному к. з. ($x_{0\Sigma} > x_{1\Sigma}$) у шин B і відключеною і заземленою по кінцях іншої паралельної лінії II (рис. 5.3, б); для заданої схеми в цьому режимі $I_{0AB.макс}^{(1)} = 1470 \text{ A}$; б) при однофазному к. з. на лінії у шин A і відключеному вимикачі 2 (рис. 5.3, в), т. ч. при каскадній дії захисту на лінії II ; для заданої схеми в цьому режимі $I_{0AB}^{(1)} = 1057 \text{ A}$ (розрахунок виконувався по аналогії із завданням 4.1).

Таким чином, $I_{с.з1}^I$ необхідно відбудувати від найбільшого струму I_0 у лінії $I_{0AB.макс}^{(1)} = 1740 \text{ A}$:

$$I_{с.з1}^I = k_n 3I_{0AB.макс}^{(1)} = 1,2 \cdot 3 \cdot 1470 = 5290 \text{ A}.$$

Зони дії першого ступеня визначаються графічно.

Тут вичислимо тільки коефіцієнт чутливості при однофазному к. з. на початку

лінії I для визначення її ефективності:

$$k_{ч.з}^I = 3I_{0AB}^{(1)} / I_{с.31}^I = 3 \cdot 3360 / 5290 = 1,9.$$

де $I_{0AB}^{(1)}$ — струм в лінії I при однофазному к. з. на ній у шин A (розрахунок не наводиться).

Цей ступінь може бути не спрямованим, оскільки максимальний струм, що протікає по лінії I при однофазному к. з. на шинах A і відключеною і заземленою по кінцях іншої паралельної лінії II $3I_0 = 609 \text{ A} < I_{с.31}^I = 5290 \text{ A}$.

2. Первинний струм спрацювання другого ступеня захисту $I_{с.31}^{II}$ має бути відбудований від максимального струму, що протікає по лінії I при к. з. на землю:

а) у кінці зони першого ступеня захисту, що захищається 5 при відключеній і заземленій іншій паралельній лінії II (рис. 5.3, з)

$$I_{с.31}^{II} = k_H k_T I_{с.35}^I, \quad (5.1)$$

де k_T в (5-9) приведений на випадок наявності підживлення на шинах B . Для схеми рис. 5-9, а $k_T = 1$;

б) у кінці зони першим ступенем захисту, що захищається 4 (рис. 5.3, д) при к. з. на паралельній лінії II і каскадному її відключенні; якщо в цьому режимі перший ступінь захисту 4 охоплює і захищає усю лінію, то $I_{с.31}^{II}$ визначається в припущенні замикання на землю через перехідний опір у кінці лінії II у режимі її каскадного відключення за формулою:

$$I_{с.31}^{II} = k_H k_T I_{с.34}^I \quad (5.2)$$

де $I_{с.34}^I$ — струм, спрацювання першого ступеня захисту 4. Більше з їх значень, що отримуються по (5.1) і (5.2), береться за розрахункове.

З (5.1) і (5.2) витікає, що для визначення $I_{с.31}^{II}$ необхідно розрахувати $I_{с.34}^I$ і $I_{с.35}^I$.

Струм спрацювання першого ступеня захисту 4 визначається аналогічно тому, як це виконано для першого ступеня захисту 1. Захист 4 для значного підвищення чутливості має бути спрямованою, оскільки при к. з. на землю на шинах B струм в

лінії *II* значно більше, чим при к. з. на шинах *A*. В результаті розрахунку отримано $I_{c.34}^I = 732 \text{ A}$, $k_T = 0,88$, і її коефіцієнт чутливості при каскадному відключенні однофазного к. з. у шин *A* $k_T = 4,87$ (розрахунок не наводиться).

Струм спрацювання першого ступеня захисту 5 визначається, як при роботі обох паралельних ліній, так і при відключеній і заземленій по кінцях однієї з них. Розрахунковим випадком виявилось відключення і заземлення однієї з паралельних ліній, при якому $I_{c.35}^I = 810 \text{ A}$, $k_T = 1$.

Порівняння результатів цих розрахунків показує, що слід визначати по (5.1)

$$I_{c.31}^{II} = k_H k_T I_{c.35}^I = 1,1 \cdot 1 \cdot 810 = 891 \text{ A}.$$

Мінімальний коефіцієнт чутливості другого ступеня захисту *I* має місце при двофазних к. з. на землю, оскільки $x_{0\Sigma} > x_{1\Sigma}$ і, отже, $I_0^{(1,1)} < I_0^{(1)}$, і обчислюється при к. з. на шинах *B* і включених обох паралельних лініях:

$$k_{c.31}^{II} = 3 \cdot 560 / 891 = 1,88.$$

При однофазному к.з. $k_{c.31} = 2,84$, і при каскадному відключенні однофазного к. з. у шин *A* лінії *II* $k_{c.31} = 5,14$.

По ПУЕ k_q має бути не менше 1,5.

Струми спрацювання захисту 2 і 3 аналогічні відповідно до розглянутих захистів 1 і 4.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 5.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_{1AB}, \text{Ом}$	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9
$X_{01-11}, \text{Ом}$	13	15	12	13	15	12	13	15	12	15	13	12
$X_{0AB}, \text{Ом}$	22	21	22	23	25	24	21	25	21	22	20	21
$X_{1BB}, \text{Ом}$	30	31	33	31	30	31	33	30	32	30	31	33
$X_{0BB}, \text{Ом}$	110	114	115	110	115	117	118	116	110	112	113	114

Питання для самоперевірки

1. Наведіть формулу для визначення струму прямої, зворотної та нульової

послідовностей?

2. При яких струмах к.з. використовують направлений струмовий захист?
3. Чому на практиці визначають мінімальні зони дії направлених струмових захистів?
4. Із якими видами заземлення електричних мереж застосовують направлений захист нульової послідовності і чому?
5. Яким має бути мінімальний коефіцієнт чутливості другого ступеня і відповідно до яких правил?

Література [1 с. 54-74; 5 с. 42-51; 6 с. 4-91]

Практичне заняття № 6

Тема 6. Розрахунок повздовжнього диференційного захисту ліній

Практичне заняття за темою № 6. Розрахунок повздовжнього диференційного захисту ліній

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок повздовжнього диференційного захисту ліній

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які основні принципи роботи повздовжнього диференційного захисту ліній, і як він відрізняється від інших видів захисту?
2. Які параметри та характеристики лінії передачі електроенергії необхідно враховувати при розрахунку параметрів повздовжнього диференційного захисту?
3. Як впливають фактори, такі як довжина лінії, типи навантаження та структура мережі, на вибір та розрахунок параметрів повздовжнього диференційного захисту? Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок повздовжнього диференційного захисту ліній в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку повздовжнього диференційного захисту ліній

Хід проведення практичного заняття

Практичне заняття № 6

6.1. Виконати розрахунок подовжнього диференціального захисту типу ДЗЛ2, встановленого на одиночній лінії АБ 110 кВ по вихідним даним, приведеним на рис. 6.1.

Рішення.1. Короткі технічні дані захисту. Приведемо технічні дані захисту ДЗЛ2, необхідні для її розрахунку. Повні дані цього захисту приведені в технічному описі і інструкції з експлуатації (ОБК 462. 454, видавництво 02) заводу, а захисту ДЗЛ1 — в [4, 3, 8,].

У захисті ДЗЛ2 (ДЗЛ1) застосований комбінований активно-індуктивний фільтр струмів прямої і зворотної послідовності, який перетворює трифазну систему струмів, що подаються на його входні затискачі, в однофазну — на його вихідні затискачі. Це дає можливість виконати захист односистемним, встановивши по одному реле на кожен кінець лінії і з'єднавши обоє реле двома допоміжними дротами телефонного або кордельного кабелю граничною довжиною до 20 км.

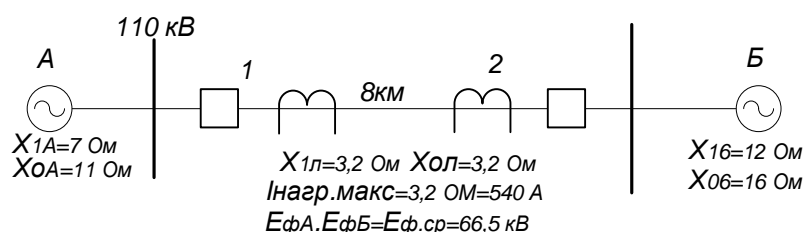


Рисунок 6.1 – Умовна схема захисту лінії

Результуюча е. р. с. на виході фільтру визначається виразом [4]:

$$\dot{E}_{\phi} = \dot{E}_{\phi 1} + \dot{A}_{\phi 2} = \dot{I}_{B1} e^{-j90^0} (x_M - \sqrt{3}R) + \dot{I}_{B2} e^{-j90^0} (x_M + \sqrt{3}R) \quad (6.1)$$

де $\dot{I}_{B1}, \dot{I}_{B2}$ — струми прямої і зворотної послідовності фази В при всіх видах к. з. між будь-якими фазами А, В і С;

x_M — опір взаємоіндукції між обмотками трансреактора фільтру;

R — активні опори, включені у фази А і С, фільтру.

Складові е. р. с, обумовлені струмами нульової послідовності у фільтрі, взаємно компенсуються, унаслідок чого на виході фільтру результуюча е. р. с. від цих струмів дорівнює нулю, тобто $E_{\phi 0} = 0$.

Вираження (6.1) можна представити у вигляді:

$$\dot{E}_{\phi} = (x_M - \sqrt{3}R)e^{-j90^0} (\dot{I}_{B1} + \frac{x_M + \sqrt{3}R}{x_M - \sqrt{3}R} \dot{I}_{B2}) = k_1 e^{-j90^0} (\dot{I}_{B1} + k \dot{I}_{B2}) \quad (6.2)$$

де k — називають коефіцієнтом фільтру

$$k = (x_M + \sqrt{3}R) / (x_M - \sqrt{3}R) \quad (6.3)$$

У даному фільтрі прийнято $\sqrt{3}R \succ x_M$, унаслідок чого k являється негативною речовою величиною. При негативному k виходить краща чутливість захисту (більше

значення E_ϕ) при двофазних к. з. на землю, чим при позитивному k [4]. У зв'язку з цим результуючу е. р. с. фільтру E_ϕ захисту ДЗЛ2 (ДЗЛ1) по (6.2) при $k < 0$ можна представити у вигляді:

$$E_\phi = \dot{I}_{B1} - k \dot{I}_{B2} \quad (6.4)$$

У захисті ДЗЛ2 передбачено ступінчасте регулювання струму спрацювання:

а.) Три уставки у відносних одиницях, з коефіцієнтом $h = 1; 1,5; 2$; зміна величини h досягається одночасно пропорційною зміною (зменшенням) x_M і R так, щоб при цьому не змінювався коефіцієнт k [див. (6.3)]. Для забезпечення лінійної характеристики фільтра уставка h вибирається залежно від максимально можливих значень вторинного струму ТС $I_{K.макс}$ при зовнішньому трьохфазному к. з. Якщо $I_{K.макс} < 100 A$; $h = 1$; при $100 < I_{K.макс} < 150$ $h = 1,5$ і при $I_{K.макс} > 150 A$ $h = 2$. Уставка h дає одночасне пропорційне зменшення E_ϕ [див. (6.2)] і, отже, збільшення струму спрацювання захисту по струму прямої і зворотної послідовності.

б.) Чотири уставки коефіцієнта $k(-4; -6; -8; -10)$ здійснюються зміною опорів R у фазах А і С фільтра, при цьому x_M залишається незмінним для прийнятого значення h .

З (6.4) витікає, що при збільшенні k підвищується вплив струмів зворотної послідовності на величину E_ϕ , а це приводить до підвищення чутливості до несиметричних к. з. Величина k показує, в скільки разів при даному h струм спрацювання захисту прямої послідовності (трифазне к. з.) більше струму спрацювання зворотної послідовності.

Слід зазначити, що в даному захисті при одній і тій же величині уставок h і k повний вторинний струм спрацювання $I_{C.3}$ залежить від вигляду к. з. і пошкоджених фаз. Вказане витікає з (6.4), оскільки величина E_ϕ , від якої залежить струм в реле, буде різною при різних видах пошкоджень із-за різних співвідношень фазних кутів і величин складових I_{B1} і I_{B2} в повному струмі к. з.

У таблиці 6.1 за даними заводу приведені повні вторинні сумарні струми

спрацювання захисту обох напівкомплектів при однобічному живленні для різних видів к. з. і всіх уставок k при $h=1$.

Ці дані приведені для к. з. на землю фази В і між фазами АВ або ВС, при яких є найбільші струми спрацювання. По цих струмах спрацювання необхідно обчислити коефіцієнти чутливості. При $h=1,5$ і 2 дійсні струми спрацювання захисту отримують множенням відповідно на 1,5 і 2 величин струмів, приведених в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1

Уставка Коефіцієнта k	Сумарний вторинний струм спрацювання захисту обох напівкомплектів при односторонньому живленні, А							
	Вид коротких замикань						По струму	
	Однофазне $I_{с.з.}^{(1)}$		Двофазне $I_{с.з.}^{(2)}$		Трьохфазне $I_{с.з.}^{(3)}$		звотної послідовності АСВ $I_{2с.з.}$	
	виконання реле							
	1А	5А	1А	5А	1А	5А	1А	5А
-4	0,8	0,8	0,38	1,9	0,8	4,0	0,2	1,0
-6	0,8	0,8	0,4	2,0	1,32	6,6	0,22	1,1
-8	0,8	4,0	0,43	2,15	1,81	9,2	0,23	1,15
-10	0,8	4,0	0,45	2,25	2,5	12,5	0,25	1,25

Сумарним вторинним струмом називають повний вторинний струм, який притікає до місця к. з. з обох боків лінії при двосторонньому живленні.

При однобічному живленні місця к. з. вторинний струм к. з. також є сумарним. Для подовздовжнього диференціального захисту ДЗЛ2 з двома комплектами реле по кінцях при односторонньому живленні з боку вхідних затисків фільтру вихідний струм теоретично розподіляється через допоміжні дроти обернено пропорційно до опорів галузь робочої обмотки живлячого реле і гілки допоміжних дротів і робочої обмотки приймального реле [4]. Практично при наявних опорах допоміжних дротів струми в робочих обмотках обох комплектів виявляються приблизно однаковими. При двосторонньому живленні місця к. з. струми в робочих обмотках обох реле також виявляються приблизно однаковими незалежно від того, з якого боку в лінію направляється велика складова струму к. з. [8]. Приведені міркування і визначають

необхідність визначення коефіцієнта чутливості захисту в цілому (а не окремих реле) по повному вторинному струму в місці к. з. як при односторонньому, так і двосторонньому живленні цього місця, і по сумарному повному струму спрацювання обох напівкомплектів, наведеному в [3, 4, 8] і в технічних даних заводу.

Ці сумарні струми спрацювання визначаються при односторонньому живленні, опору петлі $R_{np} = 700 \text{ Ом}$ і робочій ємкості $C_{np} = 0,5 \text{ мкФ}$ (таблиця. 6.1), тобто при довжині допоміжних дротів до 10 км. При більшій довжині допоміжних дротів струми спрацювання уточнюються по кривих, приведених в [3, 4, 8]. Якщо не вимагається уточнення, то дані з таблиці 6.1 слід збільшити в 1,5 разу при великих довжинах (більше 15 км) допоміжних дротів. Це збільшення створює розрахунковий запас.

У захисті передбачений швидкодіючий автоматичний контроль, що надійно виводить захист з дії при обриві сполучних дротів і струмі навантаження до 120% номінального.

Тому захист ДЗЛ2 не повинен відбудовуватися від струму навантаження.

2. Розрахунок захисту ДЗЛ2.

Розрахунок захисту полягає у виборі коефіцієнта трансформації ТС, визначенні уставок h і k і її чутливості.

Приймаємо ДЗЛ2 у виконанні 5А. Коефіцієнт трансформації ТС n_T приймаємо однаковим на обох кінцях лінії.

Він визначається за умовами:

а) відсутність, насичення комбінованого фільтру $I_{B1} + I_{B2}$ при зовнішньому к. з.

$$n_T \geq I_{Л.макс}^{(3)} / (100h) \quad (6.5)$$

де $I_{Л.макс}^{(3)} = 9250 \text{ А}$ — максимальний струм в лінії при трьохфазному к. з. на шинах Б;

б) надійності дії автоматичного контролю при обриві допоміжних дротів. Для цього доцільно так вибрати n_T , аби вторинний струм в навантаженому режимі не перевищував 4—5 А. Виконання цієї вимоги дає також підвищення надійності при к. з. у зоні захисту. За цими умовами

$$n_T \geq I_{\text{нагр. макс}} / 5 \quad (6.6)$$

По (6.6) $n_T = 540 / 5$. Приймаємо найближчий по ГОСТ 7746—98 $n_T = 600 / 5$ і по (6.5) при $h = 1$ обчислюваний вторинний максимальний струм ТС:

$$I_{B. \text{ макс}}^{(3)} = I_{Л. \text{ макс}}^{(3)} k_{CX}^{(3)} / (n_T h) = \frac{9250 \cdot 1}{(120 \cdot 1)} = 77 < 100 \text{ А}$$

Коефіцієнт фільтру k вибирається з необхідності забезпечення переважання складової kI_{B2} над складовою I_{B1} в (6.4), що гарантує надійну дію захисту при всіляких несиметричних к. з. на лінії. Розрахунковим випадком для вибору k є двофазне к. з. на землю на лінії в режимі двостороннього живлення, оскільки в цьому випадку струм I_{B1} перевищує по величині струм I_{B2} . Цей коефіцієнт обчислюється за формулою [3]

$$k = -k_H I_{B1}^{(1,1)} / I_{B2}^{(1,1)} \quad (6.7)$$

де $k_H = 2$ — коефіцієнт надійності.

Для вибору найбільшого відношення струму $I_{B1}^{(1,1)}$ до $I_{B2}^{(1,1)}$ необхідно виконати розрахунки струмів $I^{(1,1)}$ при к. з. на кожному з кінців лінії, що захищається, для декількох режимів. У нашому випадку для схеми, приведеної на рис. 6.1, максимальне відношення цих струмів дорівнює 1,64. Розрахунок не наводиться, проте відзначимо, що він виконується по (6.7): $k = -2 \cdot 1,64 = -3,28$. Уставку k можна було б прийняти рівною -4 , але враховуючи, що завод випускає захист з відрегульованою уставкою $k = -6$ і $h = 1$, приймаємо ці уставки. Перевіряємо мінімальну чутливість захисту при трифазному і однофазному к. з. в кінці лінії в шин А при однобічному живленні місця к. з. [вимикач 1 відключений, режим неуспіху АПВ з боку менш потужній частині системи В (див. рис. 6.1) по наступному загальному вираженню для будь-яких видів к. з. :

$$k_{\text{Ч}} = I_{K. \text{ мин}} (I_{C.3} h n_T) \quad (6.8)$$

де $I_{K. \text{ мин}}$ — мінімальне значення повного струму в місці к. з. на лінії при розрахунковому вигляді пошкодження; $I_{C.3}$ — сумарний вторинний повний струм

спрацювання захисту (обох напівкомплектів) при однобічному живленні одного з напівкомплектів для даного вигляду пошкодження. $I_{C.3}$ для прийнятого k і розрахункового вигляду пошкодження визначається за даними таблиці. 6.1. При великих довжинах допоміжних дротів (більше 10—12 км.) і значних k_q (більше 3) облік їх параметрів виконують приблизно, множенням $I_{C.3}$ на $k_{пров} = 1,5$. Точніший розрахунок дротів виконаний в завданні 6.3. За умовою даного завдання:

$$k_q^{(3)} = I_{K.мин}^{(3)} / (I_{C.3}^{(3)} h n_T) = \frac{4380}{6,6 \cdot 1 \cdot 120} = 5,53 > 2;$$

$$k_q^{(1)} = I_{K.мин}^{(1)} / (I_{C.3}^{(1)} h n_T) = \frac{3470}{4 \cdot 1 \cdot 120} = 7,23;$$

$$\text{Обчислимо також } k_q^{(2)} = \frac{I_{K.мин}}{I_{C.3}^{(2)} h n_T} = \frac{3800}{2 \cdot 1 \cdot 120} = 15,8.$$

Відповідно до ПУЕ k_q повинен дорівнювати приблизно 2. Якби ми отримали $k_q^{(3)}$ менше 2, то замість прийнятого $k = -6$ необхідно було б прийняти $k = -4$, і тоді по таблиці. 6-1

$$I_{C.3}^{(3)} = 4A.$$

Уставки захисту і n_T для обох напівкомплектів слід прийняти однаковими.

Якщо по яких-небудь причинах n_T по кінцях лінії відрізняються в 1,5 або 2 рази, то необхідно вирівняти м. д. с. (ампер-витки) в обох напівкомплектах захистів (1 і 2) за формулою :

$$n_{T1} h_1 = n_{T2} h_2 \quad (6.9)$$

Слід зазначити, що якщо $x_{0\Sigma} < x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$, то чутливість захисту ДЗЛ2 при двофазних к. з. на землю $k_q^{(1,1)}$ менше $k_q^{(1)}$ при однофазних к. з. [5]. В цьому випадку, знаючи $k_q^{(1)}$, можна визначити $k_q^{(1,1)}$ по кривих, приведених в [5].

Таблиця 6.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 6.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_{1л}, Ом$	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3

$X_{0Л}, Ом$	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3	3,1	3,4	3,3
$I_{наг. макс}, А$	550	545	550	547	560	520	524	560	521	542	512	536
$E_{фА}, E_{фВ}, E_{фС}, В$	66, 4	66, 5	66, 3	66, 4	66, 5	66, 1	66, 2	66, 3	66, 4	66, 5	66, 5	66, 2

6.2. Для величини $k = -6$ визначити сумарний повний вторинний струм на вході фільтру в пошкодженій фазі, при якій захист спрацює в умовах трифазного і двофазного к. з. між фазами В і С. Визначити також струм спрацювання при подачі системи струмів зворотної послідовності.

У подовжньому диференціальному струмовому захисті типа ДЗЛ2 застосований комбінований активно-індуктивний фільтр струму, е. р. с. якого на вихідних затисках пропорційна струмам прямої і зворотної послідовності на його вхідних затисках, тобто

$$\dot{E}_\phi = \dot{I}_{B1} + k \dot{I}_{B2}, \text{ де } k = -4; -6; -8; -10.$$

При замиканні на землю фази В в режимі однобічного живлення, тобто при подачі струму I_B на вхідні затиски В, О фільтру одного з напівкомплектів при включеному через в допоміжні дроти іншого напівкомплекту, захист спрацює при вторинному струмі $I_{Bcp} = 4A$. Цей струм називають сумарним струмом.

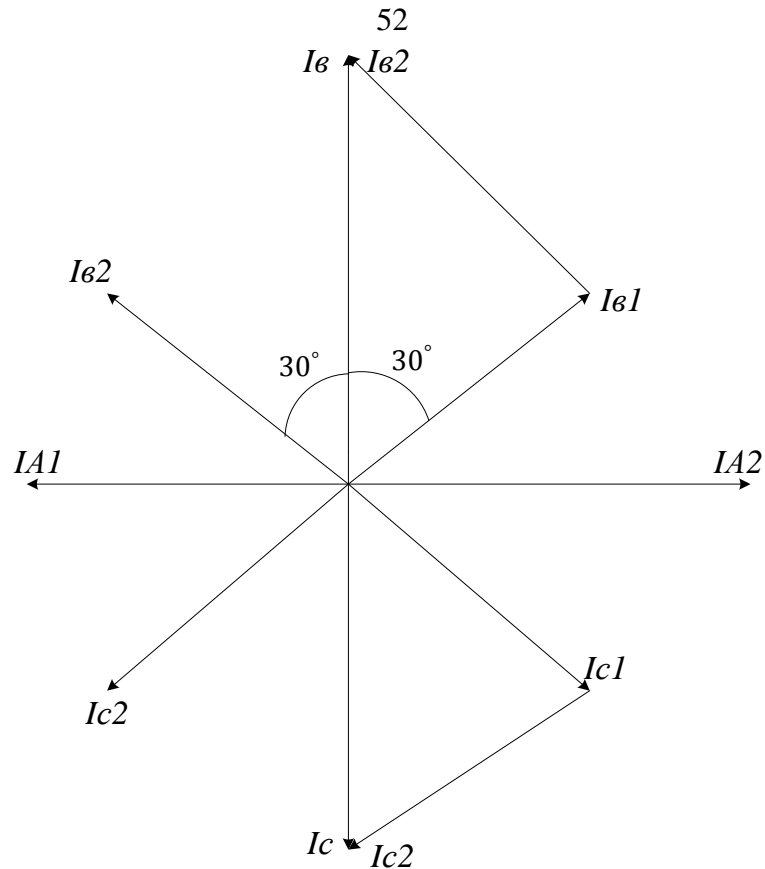


Рисунок 6.2 – Векторна діаграма струмів при к. з. між фазами В і С

Рішення. При замиканні фази В на землю $I_{B1} = I_{B2} = I_B / 3$.

Для спрацювання захисту необхідно, аби $I_{C.3}$ було рівним:

$$I_{\tilde{N}.C} = I_{B1} + kI_{B2} = \frac{1}{3}I_{B\tilde{n}\delta}(1+k) = \frac{4}{3}(1-6) = -6,6A.$$

При трифазному к. з. $I_{B2} = 0$, і тому з останнього рівняння виходить, що струм в пошкодженій фазі при спрацюванні $I_{C.3}^{(3)} = 6,6A$.

На рис. 6.2 приведена векторна діаграма струмів при к. з. між фазами В і С, з якої виходить: $\dot{I}_{B1} = I_B e^{j30^\circ} / \sqrt{3}$; $\dot{I}_{B2} = I_B e^{-j30^\circ} / \sqrt{3}$.

Підставимо ці значення в загальне вираження для струму спрацювання захисту

$$\dot{I}_{\tilde{N}.C} = \dot{I}_{B1} + k\dot{I}_{B2} = I_B (e^{j30^\circ} + ke^{-j30^\circ}) / \sqrt{3}.$$

звідки абсолютне значення

$$I_{\tilde{N}.C}^{(2)} = I_{B\tilde{n}\delta} = \frac{\sqrt{3}I_{\tilde{N}.C}}{\left| e^{j30^\circ} + ke^{-j30^\circ} \right|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6,6}{\left| 0,867 + j0,5 - 6(0,867 - j0,5) \right|} = 2,05A$$

Величина k показує, в скільки разів струм спрацювання захисту прямої послідовності більше струму спрацювання зворотної послідовності, тобто

$$I_{C.3}^{(3)} = kI_{2C.3}, \text{ звідки } I_{2C.3} = I_{C.3}^{(3)} / k = 6,6 / 6 = 1,1 \text{ A}.$$

Обчислені значення збігаються з даними таблиці 6.1 для $k = -6$, запозиченими із заводського технічного опису ДЗЛ2.

По аналогії з даним рішенням можна визначити сумарні струми спрацювання захисту з інших фаз (вони або рівні, або менш обчислених і наводяться в [3, 4] для -ДЗЛ1).

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 6.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	-4	-8	-10	-4	-8	-10	-4	-8	-10	-4	-8	-10

6.3. Визначити уставки пускових струмових реле 1РТ, 2РТ (рис. 6.4) поперечного диференціального направленої захисту від міжфазних к. з. на паралельних лініях 110 кВ за даними, приведеними на рис. 6.3. При відключенні однієї з двох паралельних ліній максимальний робочий струм, що протікає по лінії $I_{нагр.макс} = 630 \text{ A}$. Опори лінії відрізняються на 2%. Типові схеми цього захисту від всіх видів к. з. приведені в [6] на основі комплектних реле типа КЗ-6 і КЗ-7, спрощені схеми приведені в [8]. Детальні розрахунки даних в [6].

Рішення. На рис. 6.4 показана схема включення струмових ланцюгів поперечного диференціального направленої захисту одного кінця паралельних ліній. Струмові ланцюги пускових струмових реле 1РТ, 2РТ і реле напряду потужності двосторонньої дії 1РМ, 2РМ, тобто комплекту захисту від замикань між фазами включаються у фази А і С на різницю струмів однойменних фаз обох ліній.

Комплект захисту від замикань на землю — струмове реле PT_0 і реле напряду потужності двосторонньої дії PM_0 — включаються на різницю потрійних струмів нульової послідовності обох ліній. Для цього ТС $TC1$ і $TC2$ з'єднуються на циркуляцію струмів (за схемою «вісімки»).

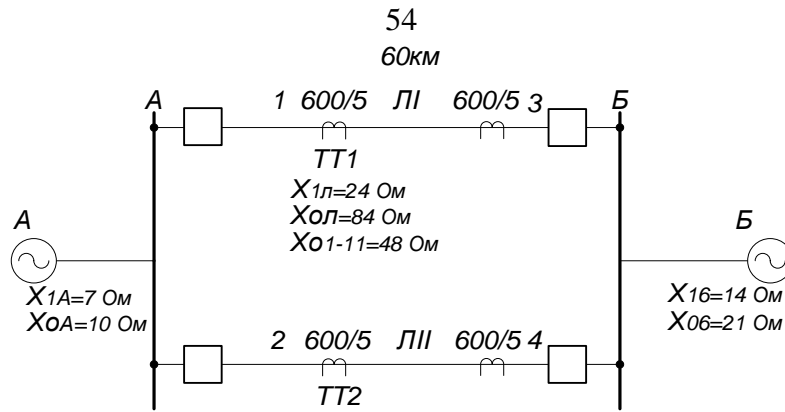


Рисунок 6.4 – Схема ділянки мережі з паралельними лініями

При нормальному режимі і зовнішніх к. з. у пускових реле протікають струми небалансу, від яких вони відбудовані, і захист не діє. При к. з. на лінії, поза межами зони каскадної дії, і мертвою зоною реле напруги потужності, спрацьовує пускове струмове реле (якщо в схемі передбачені, струмові пускові реле напруги) і через контакти реле напруги потужності, які визначають пошкоджену лінію [по знаку (напругу), струму в реле], здійснюється її відключення.

Аби виключити неправильні дії комплекту захисту від замикань між фазами від струмів неушкоджених фаз на неушкодженій лінії при однофазних і двофазних к. з. на землю, пускові реле струму і напруги нульової послідовності у вказаних режимах виводять з дії цей комплект захисту.

1. Струм спрацювання захисту.

Первинний струм спрацювання пускових струмових реле 1РТ і 2РТ за відсутності пускових мінімальних реле напруги вибирається за наступними умовами [6]:

а) За умовами налаштування від розрахункового максимального струму небалансу при перехідному режимі зовнішнього трифазного металевого к. з. на шинах протилежної підстанції:

$$I_{C.3} \geq [k'_H k_{анер} k_{ОДН} \varepsilon + k'' k_{анер} f_{НЕИД}] I_{К.макс}^{(3)} \quad (6.10)$$

де $k'_H = 1, 2; k''_H = 1, 3$ — коефіцієнти надійності;

$k_{анер} = 2$ — коефіцієнт, що враховує перехідний режим, тобто наявність аперіодичної складової струму;

$k_{ОДН} = 0,5$ — коефіцієнт однотипності ТС;

$\varepsilon = 0,1$ — відносне значення повною погрішності ТС;

$f_{НЕИД} = 0,02$ — відносне значення не ідентичності опорів обох ліній (по умові завдання) — при однаковому опорі обох ліній $f_{НЕИД} = 0$; $I_{К.макс}^{(3)} = 1750 A$ — максимальне значення струму в одній лінії при трифазному к. з. на шинах Б і роботі обох ліній. Підставимо приведені значення в (6.10):

$$I_{C.3} = (1,2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 0,1 + 1,3 \cdot 2 \cdot 0,02) 1750 = 301 A.$$

б) За умовою забезпечення повернення реле після відключення зовнішнього к. з. у режимі роботи однієї лінії або після відключення к. з. однієї з ліній в режимі роботи двома лініями

$$I_{C.3} \geq k_H I_{нагр.макс} / k_B \quad (6.11)$$

де $k_H = 1,2$ і $k_B = 0,8$ — коефіцієнти надійності і повернення реле відповідно.

Підставляючи в (6.11) з умови завдання $I_{нагр.макс} = 630 A$, отримуємо $I_{C.3} = 1,2 \cdot 630 / 0,8 = 945 A$.

в) За умовою налаштування від струму неушкодженої фази $I_{НЕП}^{(2)}$ при каскадному відключенні двофазного к. з.

$$I_{C.3} \geq k_H I_{НЕП}^{(2)} \quad (6.12)$$

де $k_H = 1,3$.

г) По умові настроєння від струму неушкоджених фаз $I_{НЕП}$, при каскадному відключенні однофазного або двофазного к. з. на землю, коли пускові реле струму або реле напруги комплекта від замикань на землю знаходяться на межі спрацювання:

$$I_{\tilde{N},\zeta} \geq k_H I_{\tilde{I} \tilde{A} \tilde{I}} \quad (6.13)$$

де $k_H = 1,3$.

Умова настроєння від максимального струму навантаження по (6.11) є, як правило, визначальною. Для ліній з двостороннім живленням умова «в» не є визначальною [6]. При достатній чутливості пускового реле струму нульової

послідовності при двофазних к. з. на землю в мінімальному режимі, що виводять з дії комплект від замикань між фазами, умова «Г» також не є визначальною [6].

Приймаємо $I_{\tilde{N}.C}$ однаковим для обох кінців ліній, тобто:

$$I_{\tilde{N}.C} = I_{\tilde{N}.C_{-A}} = I_{\tilde{N}.C_{-B}} = 945 \text{ А}.$$

2. Чутливість захисту визначається для двох режимів.

а) При включених вимикачах з обох боків лінії і к. з. у такій точці лінії, де чутливість захисту обох сторін ліній однакова. При цьому враховується, що при приближенні точки к. з. до місця установки однієї із захисту її чутливості підвищуватиметься. Це викликано збільшенням струму з цього кінця пошкодженої лінії і зменшенням струму в неушкодженої лінії, внаслідок чого струм в захисті, найближчою до місця к. з., збільшується.

Точка рівної чутливості знаходиться на відстані l_x від місця включення захисту із струмом спрацювання $I_{\tilde{N}.C_{-A}}$ і обчислюється за формулою

$$l_q = I_{C.3_{-A}} l / (I_{C.3_{-A}} + I_{C.3_{-B}}) \quad (6.14)$$

При $I_{\tilde{N}.C_{-A}} = I_{\tilde{N}.C_{-B}}$ з (6.14) отримуємо $l_x = 0,5l$, тобто при однакових струмах спрацювання захисту на обох кінцях лінії точка рівної чутливості пускових органів знаходиться посеред лінії. Визначаємо коефіцієнт чутливості пускових таких реле при двофазних к. з. у точці рівної чутливості за формулою

$$k'_{x.\partial} = I_{\zeta.A}^{(2)} / I_{\tilde{N}.C_{-A}} = I_{\zeta.A}^{(2)} / I_{\tilde{N}.C_{-A}} \quad (6.15)$$

$$\text{або } k'_{q.T} = \frac{3660}{945} = 3,86 > 2.$$

За ПУЕ $k_{x.\partial}$ має бути порядку 2.

Цей коефіцієнт також, як і $k''_{x.\partial}$ — в режимі каскадного відключення (див. нижче), необхідно визначати в мінімальному режимі роботи систем.

б) Коефіцієнт чутливості $k''_{x.\partial}$ пускових струмових реле визначається також в режимі каскадного відключення, тобто коли вимикач з протилежного боку лінії вже відключено. При $I_{\tilde{N}.C_{-A}} = I_{\tilde{N}.C_{-A}} k''_{x.\partial}$ визначається для захисту А і Б.

При $I_{\tilde{N},\tilde{C}-\tilde{A}} = I_{\tilde{N},\tilde{C}-\tilde{A}} k_{\times,\dot{O}}''$ визначають лише для захисту одної із сторін для найбільш важкого випадку при двофазному к. з. в мінімальному режимі: для ліній з однобічним живленням — зі сторони живлення; для ліній з двостороннім живленням з боку більшого живлення [6]. У заданій схеми для захисту з боку підстанції А

$$k_{q.T}'' = I_{3A}^{(2)} / I_{C.3-A} = \frac{2220}{945} = 2,36 > 1,5.$$

За ПУЕ $k_{\times,\dot{O}}''$ має бути десь 1,5.

Якщо $k_{q.T}'$ і $k_{q.T}''$ менш потрібних по ПУЕ, то струмові пускові реле доповнюються пуском (блокуванням) реле мінімальної напруги. В цьому випадку струм спрацювання $I_{C.3}$ відбудовується від струмів небалансу при зовнішніх к. з. по (6.10), а напруга спрацювання реле мінімальної напруги визначається за умовою повернення після відключення к. з. на одній з ліній або зовнішнього к. з. за формулою

$$U_{C.3} \leq U_{\text{раб.мин}} / (k_H k_B) \quad (6.15)$$

де $U_{\text{раб.мин}} = (0,9 - 0,95) U_{\text{НОМ}}$ — мінімальна робоча напруга в місці установки захисту;

$k_H = 1,2$; $k_B = 1,25$ — коефіцієнти надійності і повернення реле серії РН-54 відповідно.

Умови настроєння від напруги неушкоджених фаз при каскадному відключенні к. з., як правило, не являються розрахунковими [6].

Коефіцієнт чутливості реле мінімальної напруги визначається при к. з. на протилежному кінці лінії в режимі каскадного відключення за формулою

$$k_{q.H} = U_{C.3} / U_{3.M\Phi} \quad (6.16)$$

де $U_{3.M\Phi}$ — міжфазна залишкова напруга в місці установки захисту.

Чутливість реле на пряму потужності, виконане на індукційному принципі, не перевіряється, оскільки ПУЕ вона не регламентується [6,7].

3. Зони каскадної дії.

Як відомо, струм в поперечному диференціальному захисті дорівнює різниці струмів обох паралельних ліній, яка зменшується у міру видалення крапки до к. з. від місця установки захисту. У деякій зоні, званою зоною каскадної дії, розташованій на протилежному кінці лінії, струм в пускових реле менш їх струму спрацювання, тому захист не діє до моменту відключення к. з. з протилежної сторони. Зона каскадної дії в долях довжини лінії для кожного захисту обчислюється по формулах:

$$l_{\text{каска}}^A = I_{\tilde{N}.C-A} l_E / I_{\tilde{e}.CA}^{(2)}; \quad (6.17)$$

$$l_{\text{каска}}^B = I_{\tilde{N}.C-B} l_E / I_{\tilde{e}.CB}^{(2)} \quad (6.18)$$

де $I_{\text{к.зБ}}^{(2)}$ і $I_{\text{к.зА}}^{(2)}$ струми двофазного к. з. на межі зони каскадної дії з боку шин Б для захисту А і із сторони шин А для захисту Б (рис. 6.3). Приблизно $l_{\text{каска}}^A$ і $l_{\text{каска}}^B$ обчислюють за струмами к. з. відповідно на шинах Б і А в мінімальному режимі системи. Точніший розрахунок може бути виконаний графічно [6] або одним додатковим наближенням за допомогою розрахунку струмів к. з. на кордонах зон, обчислених по струмах к. з. на шинах А до Б.

За ПУЕ зона каскадної дії не регламентується, вочевидь тому, що при $k'_{ч.Т} \geq 2$ вона не може перевищити 30% від довжини лінії при будь-яких параметрах мережі [6].

Слід зазначити, що якщо загальна довжина каскадних ліквідованих к. з. $l_{\text{каска.общ}} = l_{\text{каска}}^A + l_{\text{каска}}^B \geq l$, то в середній частині лінії з'являється ділянка, при к. з. на якій жодний із захистів не приходить в дію. Вказане неприпустимо, тому необхідно мати $l_{\text{каска.общ}} \approx 0,6l$ (враховується к. з. через перехідний опір).

За умовою завдання по (6.17) і (6.18)

$$l_{\text{каска}}^A = \frac{I_{C.3-A}}{I_{\text{к.зБ}}} l = \frac{945l}{7160} = 0,132l \quad \text{і} \quad l_{\text{каска}}^B = \frac{I_{C.3-B}}{I_{\text{к.зА}}} l = \frac{945l}{10480} = 0,0903l.$$

Зона відмови реле напряму потужності із-за малого значення струму при к.з. на іншому кінці лінії менше зони каскадної дії струмового пускового органу, оскільки підведені до реле напряму потужності напруги досить великі в цих режимах, і воно завжди чутливіше за пускові струмові реле.

Тому, звичайно розглядають практично малоімовірні випадки мертвої зони реле на пряму потужності по напрузі при трифазних металевих к. з. поблизу їх установки, як і для іншого направленого захисту.

Замість струму к.з. необхідно підставляти струм в захисти $I_{\zeta}^{(3)}$.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 6.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{нагр. макс}, A$	650	640	620	670	625	635	645	655	670	675	680	685

Питання для самоперевірки

1. Поясніть сутність диференційного захисту та необхідність його введення?
2. Які види диференційного захисту ви знаєте? Які можливості застосування диференційного захисту?
3. Наведіть особливості роботи ДЗЛ2, який фільтр застосовують для визначення струмів прямої та зворотної послідовностей.
4. Наведіть стислу методику розрахунку захисту ДЗЛ2.
5. Який коефіцієнт чутливості повинен бути в ДЗЛ2 відповідно до ПУЕ?

Література [4 с. 123-137; 6 с. 112-148; 7 с. 97-109]

Практичне заняття № 7

Тема 7. Розрахунок максимального струмового захисту трансформатора

Практичне заняття за темою № 7. Розрахунок максимального струмового захисту трансформатора

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок максимального струмового захисту трансформатора

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які фактори необхідно враховувати при розрахунку максимального струмового захисту трансформатора?
2. Як впливає конструкція трансформатора та його технічні характеристики (наприклад, потужність, тип зв'язку) на розрахунок максимального струмового захисту?
3. Як вибрати відповідний тип струмового реле та налаштувати його параметри для забезпечення надійної роботи максимального струмового захисту трансформатора?

Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок максимального струмового захисту трансформатора в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку максимального струмового захисту трансформатора

Хід проведення практичного заняття

Практичне заняття № 7

7.1. Для трансформатора власних потреб теплової електростанції вибрати тип захисту і визначити коефіцієнти чутливості за даними: потужність 250 кВА; напруга 6/0,4 кВ; струми 24/361 А; група з'єднання обмоток $Y/Y-0$; коефіцієнт самозапуска

навантаження по відношенню до номінальної потужності трансформатора $k_3 = 1,5$; повні опори трансформатора, віднесені до напруги 0,4 кВ [9]: $z_{1T} = z_{2T} = 28,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $z_{0T} = 254 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; трансформатор живить одну секцію власних потреб, струм спрацювання відсічки на двигунах 0,38 кВ $I_{д.отс} = 346 \text{ А}$; потужність к. з. на шинах 6 кВ $S_K = 150 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Рішення. На таких трансформаторах на електростанціях передбачаються наступні типи захисту [5], спрощена схема яких приведена на рис. 7.1. На стороні ВН:

1. Струмове відсічення від всіх видів к. з. у обмотках і на виводах трансформатора (реле струму 1, 2).

2. Максимальний струмовий захист з витримкою часу від зовнішніх багатофазних к. з. (реле струму 3, 4), Ці захисту виконуються в двофазному двоохрелейному виконанні на постійному оперативному струмі і діють на відключення вимикача 6 кВ і автомата 0,4 кВ.

3. Якщо ємкісний струм замикання на землю в мережі 6 кВ більше 5 А і якщо струмопровід 6 кВ до трансформатора кабельний, то на кабелі встановлюють захист нульової послідовності з дією на сигнал без витримки часу. Цей захист виконується за допомогою чутливого реле струму 5 типа РТЗ-50, що підключається до ТС нульової послідовності, встановленому на кабелі.

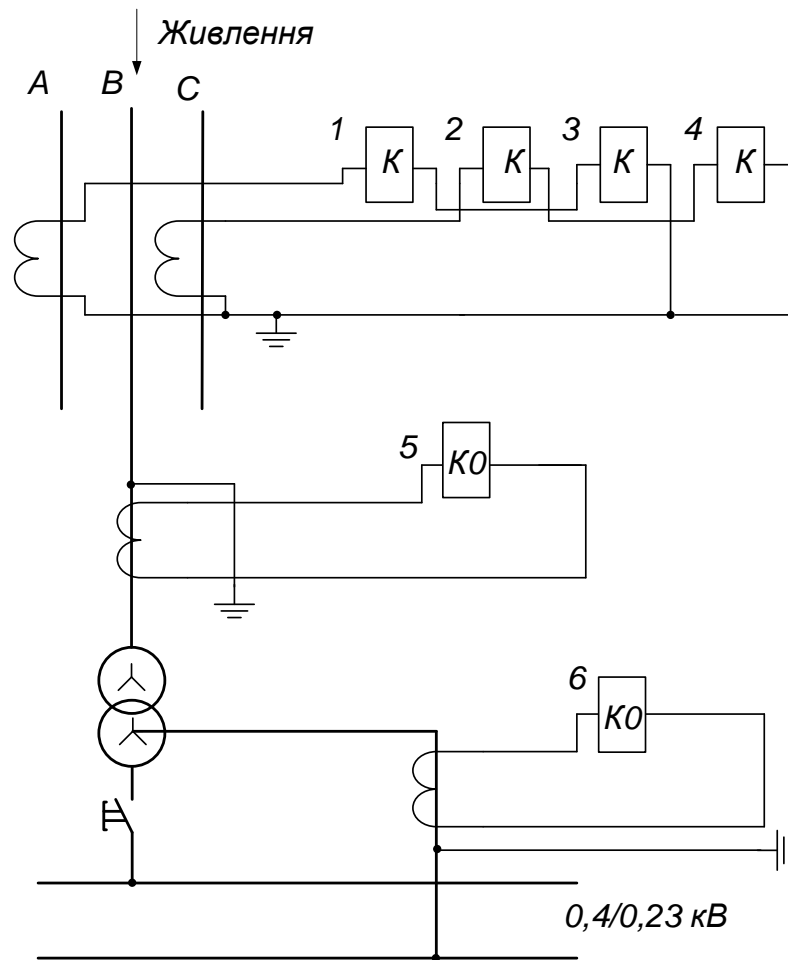


Рисунок 7.1 – Схема включення ТС і реле захисту знижуючого трансформатора власних потреб теплової електростанції:

Реле струму 1, 2 (струмова відсічка), 3, 4 (максимальний захист з витримкою часу) включені по двофазній двохранейній схемі. Реле 5 і 6 — струмові захисти нульової послідовності.

За наявності компенсації ємкісних струмів мережі 6 кВ замість реле РТЗ-50 встановлюють пристрій типу УСЗ-2/2, реагуючий на спектр вищих гармонік, що містяться в струмі нульової послідовності.

На стороні НН — струмовий захист нульової послідовності, реле струму 6, з витримкою часу від к. з. на землю в обмотках НН трансформатора, на шинах і в мережі 0,4 кВ, діє на відключення вимикача 6 кВ і автомата 0,4 кВ трансформатора.

Окрім вказаного захисту, передбачається струмовий захист від перевантаження, що встановлюється в одній фазі і діє на сигнал (на рис. 7.1 це реле не показано).

Для вибору уставок захисту необхідно обчислити струми при трифазному і

однофазному к. з. на шинах 0,4 кВ, при цьому опором живлячих елементів можна нехтувати, оскільки він вельми малий в порівнянні з опором трансформатора.

При трифазному к. з. на шинах 0,4 кВ

$$I_K^{(3)} = U_{\phi.ном} / z_{1T} = 400 / (\sqrt{3} \cdot 28,8 \cdot 10^{-3}) = 8020 \text{ А}.$$

Струми на стороні 6 кВ

$$I_{K6}^{(3)} = I_K^{(3)} / k_T = 8020 / (6 / 0,4) = 534 \text{ А}.$$

Струми при однофазному к. з. на шинах 0,4 кВ обчислені в завдання 9, тому тут наводимо результати цього розрахунку.

$$\text{Струм на стороні 0,4 кВ } I_K^{(1)} = 3I_0^{(1)} = 2229 \text{ А}.$$

Первинний струм спрацювання відсічення, тобто захисту без витримки часу, для забезпечення селективної дії повинен бути відбудований від максимального струму при зовнішньому трифазному к. з. і визначається за формулою:

$$I_{C.з.отс} = k_H I_{K6}^{(3)} = 1,4 \cdot 534 = 748 \text{ А}, \quad (7.1)$$

де $k_H = 1,4$ — коефіцієнт надійності.

Коефіцієнт чутливості відсічення визначається при двофазному к. з. у місці її установки в мінімальному режимі джерел живлення. Обчислюємо початкове значення надперехідного струму за даними потужності к. з. на шинах 6 кВ:

$$I_K^{(2)} = (\sqrt{3} S_K / 2) / (\sqrt{3} U_{cp}) = (\sqrt{3} \cdot 150 / 2) / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 11,92 \text{ кА};$$

$$k_{ч.отс} = I_{K6}^{(2)} / I_{C.з.отс} = 11,92 / 0,748 = 15,9.$$

За ПУЕ $k_{ч.отс} \geq 2$.

При коефіцієнті ТС 6 кВ $n_T = 80/5$ струм спрацювання реле визначається за формулою

$$I_{C.р.отс} = k_{CX}^{(3)} I_{C.з.отс} / n_{T6} \quad (7.2)$$

де k_{CX} — коефіцієнт схеми в симетричному трифазному режимі, рівний відношенню струму в реле до вторинного струму ТС в цьому режимі; $k_{CX} = 1$ при з'єднанні ТС в повну або неповну зірку $k_{CX} = \sqrt{3}$ при з'єднанні ТС в трикутник або

на різницю струмів двох фаз.

У нашому випадку $I_{C.P.OTC} = 748 / 16 = 46,7 \text{ A}$.

Приймаємо реле з межами струму спрацювання 25—100 А типа РТ-40/100 [8].

Первинний струм спрацювання максимального струмового захисту з витримкою часу визначається за формулою [7]:

$$I_{C.3} = k_H k_3 I_{\text{раб.макс}} / k_B \quad (7.3)$$

де $I_{\text{раб.макс}} = I_{T.HOM}$ — максимальний робочий струм ланцюга, в якому встановлений захист,

$k_H = 1,2$, $k_B = 0,8$ — коефіцієнти надійності і повернення реле,

k_C — коефіцієнт, що враховує самозапуск загальмованих електродвигунів.

Для забезпечення надійності потрібний

$$I_{C.3} \geq 4 I_{T.HOM} \quad (7.4)$$

Обчислимо спочатку $I_{C.3}$ за (7.3):

$$I_{C.3} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 24 / 0,8 = 54 \text{ A}.$$

Коефіцієнт чутливості визначається за мінімальним струмом, що протікає в реле, який є при двофазному к. з. на шинах 0,4 кВ в мінімальному режимі джерел живлення:

$$k_q^{(2)} = I_K^{(2)} / I_{C.3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 534 / 54 = 8,56.$$

Враховуючи значну величину k_q , для підвищення надійності цього захисту приймаємо $I_{C.3} = 4 I_{T.HOM} = 4 \cdot 24 = 96 \text{ A}$ і $k_q^{(2)} = 0,867 \cdot 534 / 96 = 4,82 > 1,5$.

Струм спрацювання реле обчислюваний по (7.2) $I_{C.P} = 96 \cdot 1 / 16 = 6 \text{ A}$.
Приймаємо реле типу РТ-40 з межами струму спрацювання 2,5—10 А.

Слід відзначити, що в (7.1), по якій обчислюється струм спрацювання відсічки на відміну від максимального струмового захисту коефіцієнт повернення реле k_B не враховується, оскільки цей захист при зовнішніх к. з. не спрацює.

Перевіримо, чи діятиме як резервний максимальний струмовий захист при однофазному к. з. на шинах 0,4 кВ. На рис. 7.2, за даними завдання 3.2 приведений

струморозподіл при замиканні фази В на землю на стороні 0,4 кВ для випадку $k_T = 1$. При $k_T \neq 1$ вказане струморозподілення вірне для величин струмів у відносних одиницях при $n_T = 1$. З рис. 7.2 витікає, що в двофазній двохрелейній схемі реле 1,2 (точки М і N закорочені, реле 3 виведено з дії) обтікаються струмом $I_K^{(3)} / 3$ і

$$k_q^{(1)} = I_K^{(1)} / (3k_T I_{C.3}) = 2229 / [3(6/0,4)96] = 0,517,$$

тобто захист не діє. Якщо ж підключити реле 3, яке включене на суму струмів фаз А і С, тобто перетворити схему на двофазну трьохрелейну, то для даного випадку збільшиться в два рази і складе $k_q^{(1)} = 2 \cdot 0,517 = 1,034 < 1,5$.

Первинний струм спрацювання реле перевантаження обчислюється за формулою:

$$I_{C.3.ПЕР} = k_H I_{T.НОМ} / k_B = 1,05 \cdot 24 / 0,8 = 31,5 \text{ А} \quad (7.5)$$

де $k_H = 1,05$ — коефіцієнт надійності. Струм спрацювання реле

$$I_{C.Р.ПЕР} = I_{C.3.ПЕР} / n_T = 31,5 / 16 = 1,97 \text{ А}.$$

Приймаємо реле типу РТ-40/6 з межами струму спрацювання 1,5—6 А.

Первинний струм спрацювання захисту струму нульової послідовності (реле 6), що діє з витримкою часу на відключення трансформатора, визначається за двома умовами:

1. Настроєння від допустимої асиметрії фазних струмів, рівній по ГОСТ для даного трансформатора струму в нейтралі $I_N = 0,25 I_{T.НОМ}$

$$I_{C.3.N} = k_H I_N = 0,25 k_H I_{T.НОМ} = 2 \cdot 0,25 \cdot 361 = 180,5 \text{ А}, \quad (7.6)$$

де $k_B = 2$ — коефіцієнт надійності.

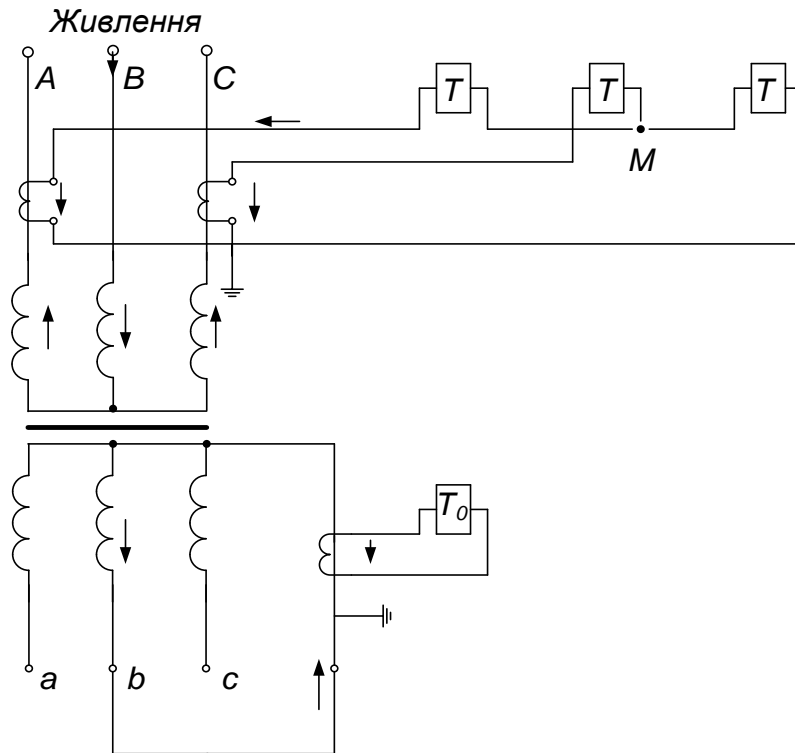


Рисунок – 7.2. Струморозподілення в двофазній трьохрелейній схемі максимального струмового захисту (реле струму 1, 2, 3) на стороні ВН і в схемі захисту струму нульової послідовності (реле струму 4) на стороні НН при однофазному к. з. на стороні НН трансформатора $\text{Y}/\text{Y}-0$

2. Узгодження по чутливості з максимальним струмом спрацювання відсічення на двигунах 0,38 кВ або з запобіжниками в розподільних мережах

$$I_{C.3.N} = k_{H.COGL} I_{Д.ОТС}$$

де $k_{H.COGL} = 1,1-1,25$ — коефіцієнт надійності узгодження.

Ця умова, як правило, є визначальною $I_{C.3.N} = 1,15 \cdot 346 = 398 \text{ А}$.

Коефіцієнт чутливості цього захисту

$$k_q = I_K^{(1)} / I_{C.3.N} = 2229 / 398 = 5,6.$$

При коефіцієнті трансформації ТС в нейтралі $n_{TN} = 200/5$ струм спрацювання реле

$$I_{C.P6} = I_{C.3.N} / n_{TN} = 398 / 40 \approx 10 \text{ А}.$$

Приймаємо реле з межами струму спрацювання 5—20 А.

Максимальні захисту (реле 3, 4, 6 рис. 7.1) мають бути погоджені за часом із

захистами, автоматами і запобіжниками елементів 0,38 кВ, про що детально сказано в [8].

Захист струму нульової послідовності (реле 5), встановлено на кабелі на стороні 6 кВ, діє на сигнал, розрахунку не підлягає. Уставки чутливого реле струму типу РТЗ-50 встановлюються за даними каталогу, залежно від того, який використовується ТС нульової послідовності — нероз'ємний або роз'ємний.

Слід підкреслити, що в даному завданні розглянуті завдання розглянутий захист трансформатора встановленого на теплових електростанціях. У розподільних мережах захист таких трансформаторів на стороні ВН здійснюється за допомогою запобіжників або вторинними реле прямої дії, а на стороні НН — на змінному оперативному струмі [8].

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 7.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$S_{ном}, кВА$	220	210	230	235	245	240	215	225	255	260	265	240
$I_{ВН} /$ $I_{НН}, А$	25/ 350	22/ 320	24/ 325	21/ 321	22/ 356	21/ 364	22/ 358	25/ 354	26/ 358	24/ 321	24/ 367	25/ 347
$z_{1T} = z_{2T}, \cdot 10^{-3} Ом$	24, 2	25, 4	26, 1	26, 2	25, 5	21, 3	25, 6	27, 1	26, 1	26, 4	25, 8	24, 9
$z_{0T}, \cdot 10^{-3} Ом$	245	268	257	245	265	259	215	245	213	232	216	249

7.2. Визначити в загальному вигляді повні струми в лінійних дротах при двофазному і однофазному к. з. на стороні зірки на трансформаторах з групою з'єднання обмоток Δ/Y – 11, джерела живлення яке знаходиться на стороні трикутника.

Рішення. Вказані трансформатори можуть бути підвищуючими для електростанцій з генераторами, що працюють на спільних шинах і в блоці з генераторами, або що знижують, вживаними для власних потреб електростанцій.

Для більшої наочності на рис. 7.3 і 7.4 приведені струморозподіли відповідно при двофазному і однофазному к. з. для трансформатора з коефіцієнтом трансформації рівним одиниці, тобто

$$k = \sqrt{3}\omega_I / \omega_{II} = U_{BH.мф} = I_{л.НН} / I_{л.ВН} = 1, \quad (7.7)$$

де $I_{л.НН}$, $I_{л.ВН}$ — лінійні струми на сторонах НН і ВН трансформатора.

Вказане не знижує спільності даного струморозподілення, оскільки при $k \neq 1$ приведені значення струмів розраховані у відносних одиницях.

Якщо обчислені дійсні величини струмів для місця к. з., то вказані на рис. 7.3 і 7.4 значення струмів на іншій стороні трансформатора мають бути приведені (перераховані) до напруги цієї сторони.

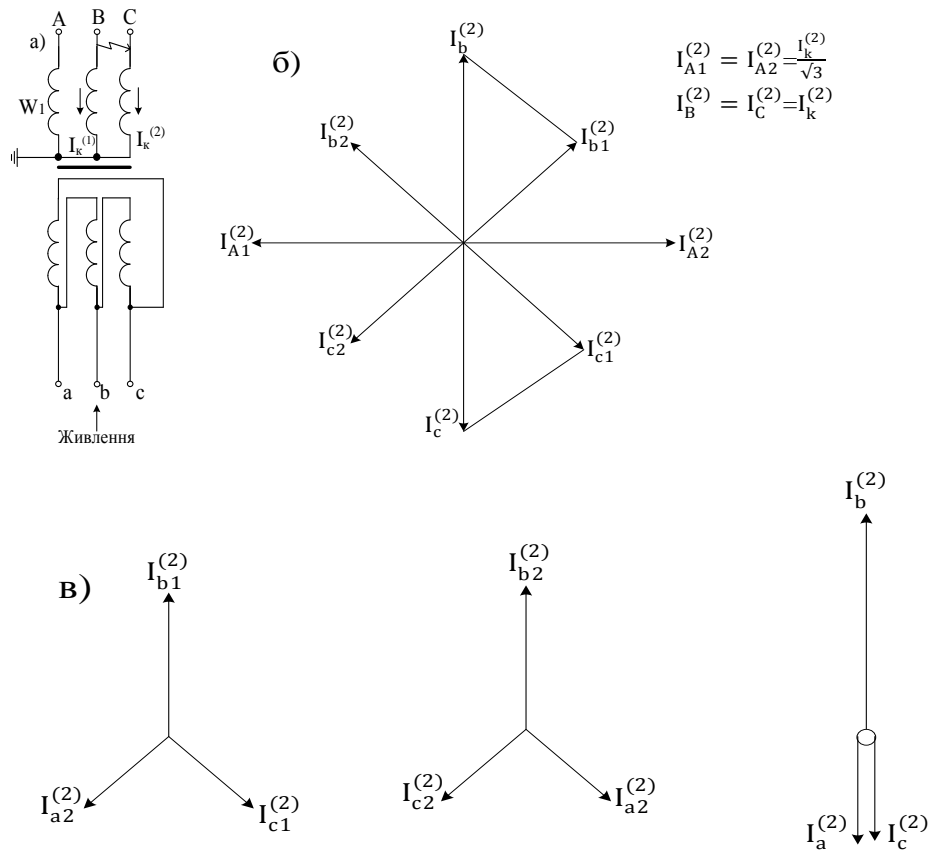


Рисунок 7.3 – Двофазне к.з. на стороні обмотці трансформатора Δ/\star -11 при джерелі живлення на стороні трикутника: а – розподілення повних струмів к.з. ; б – векторні діаграми лінійних складових повних струмів к.з. на стороні зірки; в – те ж саме на стороні трикутника

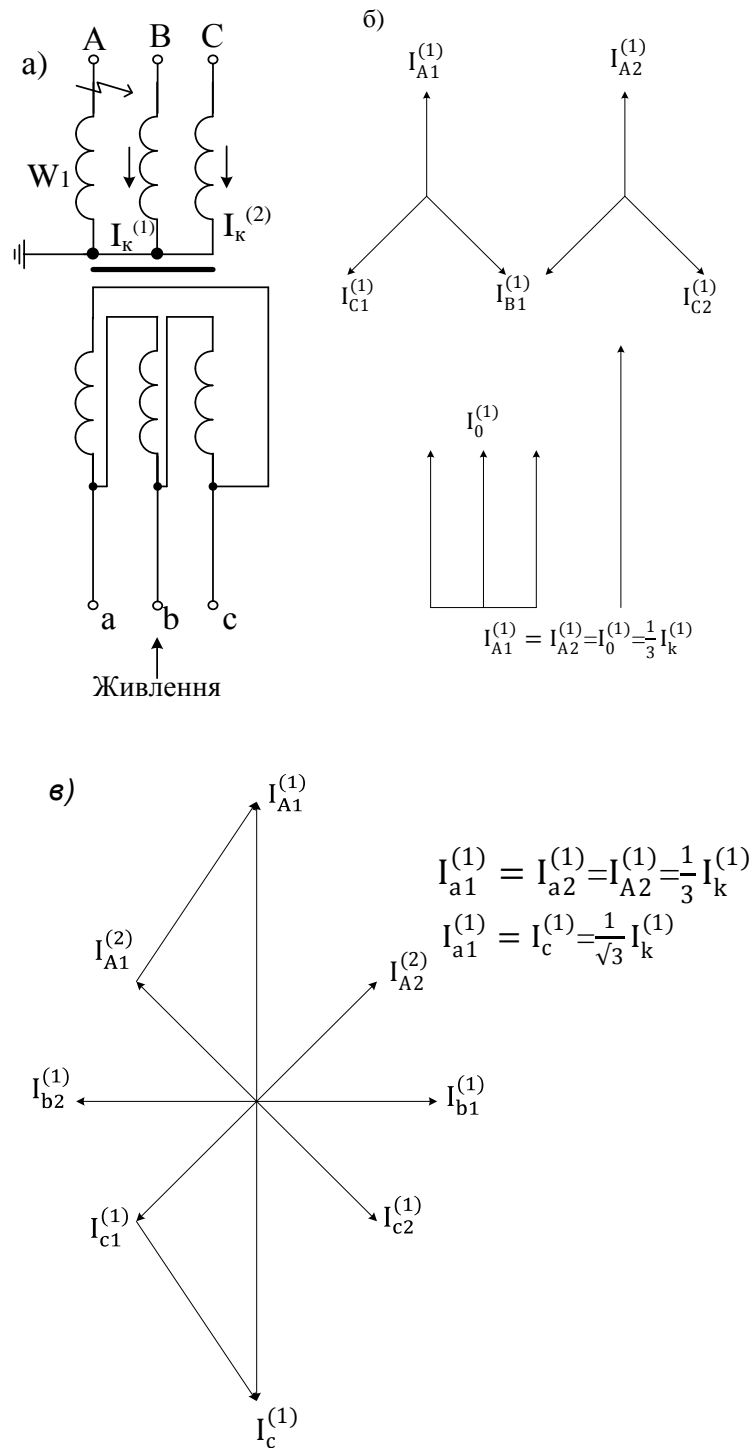


Рисунок 7.4 – Однофазне к.з. на стороні зірці трансформатора \star/\triangle - 11 при джерелі живлення на стороні трикутника:

а – розподілення повних струмів к.з. ; б – векторні діаграми лінійних симетричних складових і повних струмів к.з. на стороні зірці

При відомих струмах к. з. $I_I = I_K^{(2)}$ і $I_I = I_K^{(1)}$, що протікають в обмотках трансформатора на стороні зірки (рис. 7.3, з і 7.4, а), струми в обмотках, сполучених

в трикутник на іншій стороні трансформатора, визначаються з умови рівності м. д. с. обмоток ВН і НН кожної фази, нехтуючи струмом намагнічування, тобто $I_I \omega_I = I_{II} \omega_{II}$ звідки при $k = 3\omega_I / \omega_{II} = 1$

$$I_{II} = I_I / \sqrt{3}. \quad (7.8)$$

Виходячи з цього співвідношення, приведені струми в обмотках, сполучених в трикутник.

На цих же рисунках приведені векторні діаграми лінійних симетричних складових і повних струмів к. з. за умови, що повні струми в місці к. з. $I_K^{(2)}$ і $I_K^{(1)}$ відомі, тобто обчислені.

Співвідношення струмів прямої, зворотної і нульової послідовності на стороні к. з. , приведені на рис. 7.3,б і 7.4,б, витікають з методу симетричних складових.

При $k = 1$ лінійні симетричні складові струми на стороні трикутника по абсолютній величині рівні цим струмам на стороні зірки, але струми прямої послідовності, повертаються на $+30^\circ$, а струми зворотної послідовності на -30° .

Струми нульової послідовності не мають місця в лінійних дротах трикутника трансформатора, оскільки трансформуючись на цю сторону, вони циркулюють в обмотках, з'єднаних в трикутник.

На підставі приведених пояснень, на рис. 7.3,в і 7.4,б дані векторні діаграми лінійних симетричних складових і повних струмів к.з. на стороні трикутника трансформатора.

Оскільки при двофазному к. з. на стороні зірки струм в одному з лінійних виводів на стороні трикутника трансформатора в два рази більш, ніж в двох інших (рис. 7.3), то встановлюють диференціальний захист підвищуючих трансформаторів, з метою підвищення чутливості виконують в трьохрелейному виконанні.

Питання для самоперевірки

1. Який з видів захисту найбільше використовується для трансформаторів?
2. Який захист встановлюють на трансформатори від ємнісних струмів на землю в мережі 6 кВ більше 5А?

3. Яка відмінність між струмами прямої та зворотної послідовностей в трансформаторах при з'єднанні трикутник/зірка.
4. Чи присутні струми зворотної послідовності в лінійних дротах на стороні трикутника?
5. В скільки разів більший струм к.з. на стороні зірки по відношенню до сторони трикутника і чому?

Література [1 с. 113-120; 4 с. 55-78; 7 с. 97-109]

Тема 8: Розрахунок диференційного захисту трансформаторів**Практичне заняття за темою № 8. Розрахунок диференційного захисту трансформаторів**

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок диференційного захисту трансформаторів

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які принципи дії лежать в основі диференційного захисту трансформаторів, і як він реалізується у вигляді схеми захисту?
2. Які основні параметри та характеристики трансформатора враховуються при розрахунку та налаштуванні диференційного захисту?
3. Які методи використовуються для визначення порогового значення захисного струму та налаштування чутливості диференційного захисту залежно від конкретних умов та вимог безпеки електромережі?

Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок диференційного захисту трансформаторів в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку диференційного захисту трансформаторів

Хід проведення практичного заняття**Практичне заняття № 8**

8.1. Виконати розрахунок диференціального струмового захисту для знижуючого трансформатора з РПН і визначити коефіцієнти трансформації ТС за даними: $S_{T.НОМ} = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $k = 35 \pm 6 \times 1,5\% / 11 \text{ кВ}$; $u_K = 7,5\%$;

\triangle/\triangle -11 трифазної потужності системи на стороні ВН трансформатора при $U_{CP} = 37 \text{ кВ}$ в максимальному і мінімальному режимі відповідно рівна $S_{K.\text{макс}} = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $S_{K.\text{мин}} = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Відповідно ГОСТ 11920-93 $u_{K.\text{макс}} = 8,6\%$ і $u_{K.\text{мин}} = 7\%$ відповідно на крайньому позитивному і негативному рівні регулювання.

Рішення. Приймаємо двохрелейну схему диференціального захисту по рис. 7.5, на якому в реле 5 і в ТС фази b точки М, N закорочені, а перемички PQ зняті. У завданні 7.3 показано, що при двофазному к. з. на стороні трикутника трансформатора двохрелейна схема має такий же коефіцієнт чутливості, як і трьохрелейна. Обчислювані номінальні струми:

$$I_{35\text{НОМ}} = 6300 / (\sqrt{3} \cdot 35) = 104 \text{ А}, \quad I_{10\text{НОМ}} = 6300 / (\sqrt{3} \cdot 11) = 331 \text{ А}.$$

Для компенсації кутового зрушення ТС на стороні 35 кВ з'єднанням в трикутник, а на стороні 11 кВ — в неповну зірку

Тоді

$$n_{T35\text{расч}} = I_{35\text{НОМ}} k_{CX35}^{(3)} / 5 = 104 \cdot \sqrt{3} / 5 = 180 / 5; \quad (8.1)$$

$$n_{T10\text{расч}} = I_{10\text{НОМ}} k_{CX10}^{(3)} / 5 = 331 \cdot 1 / 5 = 331 / 5.$$

З метою підвищення надійності захисту для зменшення повних погрішностей ТС приймають декілька завищені n проти розрахункових, тим самим знижуючи кратність струмів к. з. і одночасно не обмежуючи можливе тривале перевантаження силового трансформатора.

$$\text{Приймаємо } n_{T35} = 300 / 5, \quad n_{T10} = 500 / 5.$$

Для визначення струмів небалансу в диференціальному захисті в сталому режимі необхідно обчислити максимальний струм, що протікає через силовий трансформатор $I_{K.\text{ВН.макс}}$ при зовнішньому к. з. Цей струм матиме місце в максимальному режимі системи і мінімальному опорі трансформатора $x_{T.\text{мин}}$ при крайньому негативному положенні ($-6 \times 1,5\%$) пристрою РПН. При визначенні коефіцієнта чутливості захисту необхідно обчислити мінімальний струм к. з. на стороні 10 кВ $I_{K.\text{мин}}$, що має місце в мінімальному режимі системи і

максимальному опорі трансформатора $x_{T.мин}$.

Вказані опори трансформатора, приведені до напруги 35 кВ, обчислюємо:

$$\alpha = 1 \pm \Delta U_{*PEГ} = 1 \pm 0,09; \alpha_{макс} = 1,09, \alpha_{мин} = 0,91,$$

де $\Delta U_{*PEГ}$ — відносне максимальне відхилення напруги від номінального при установці пристрою РПН в одному з крайніх положень

$$x_{T.макс} = \frac{u_{\%K.макс} U_{T.НОМ}^2 \alpha_{макс}^2}{100 S_{T.НОМ}} = \frac{8,6 \cdot 35^2 \cdot 1,09^2}{100 \cdot 5,3} = 20,00 \text{ Ом};$$

$$x_{T.мин} = \frac{7,0 \cdot 35^2 \cdot 0,91^2}{100 \cdot 6,3} = 11,30 \text{ Ом}$$

Опорів системи

$$x_{C.макс} = \frac{U_{CP}^2}{S_{K.макс}} = \frac{37^2}{300} = 4,56 \text{ Ом}; \quad x_{C.мин} = \frac{37^2}{200} = 6,83 \text{ Ом}.$$

Струми при к. з. на стороні 10 кВ:

$$I_{T.макс}^{(3)} = \frac{U_{НН.НОМ} k_{T.мин.рег}}{\sqrt{3}(x_{C.макс} + x_{T.мин})} = \frac{11000 \cdot (35/11) \cdot 0,91}{\sqrt{3}(4,56 + 11,3)} = 1160 \text{ А};$$

$$I_{T.мин.рег}^{(3)} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 0,91} = 116 \text{ А};$$

$$I_{T.макс}^{(3)} \approx I_{T.ав.макс}^{(3)} + 0,6 I_{T.мин.рег}^{(3)} = 1160 + 0,6 \cdot 116 = 1230 \text{ А};$$

$$I_{T.мин}^{(3)} \approx I_{T.ав.мин}^{(3)} = \frac{U_{НН.НОМ} k_{T.макс.рег}}{\sqrt{3}(x_{C.мин} + x_{T.макс})} = \frac{11000 \cdot (35/11) \cdot 1,09}{\sqrt{3}(6,83 + 20,0)} = 820 \text{ А}.$$

Спочатку перевіряється можливість використання більш простого диференціального захисту без гальмування з реле серії РНТ-560, і, якщо її мінімальний коефіцієнт чутливості менше двох, то застосовують диференціальний захист з гальмуванням з реле серії ДЗТ.

Первинний струм спрацювання диференціального захисту вибирається за двома умовами [7, 9]:

1. За умовою налаштування від кидка струму намагнічування при включенні ненавантаженого трансформатора (автотрансформатора) під напругу при крайньому негативному положенні пристрою РПН

$$I_{с.з} \geq k_H I_{T.мин.рег} \quad (8.2)$$

де $I_{T.мин.рег}$ — найбільший струм, відповідний номінальній потужності найбільш потужної обмотки трансформатора (для трьохобмоточних і з розщепленими обмотками трансформаторів) і типової (розрахунковою) потужності автотрансформатора;

$k_H = 1,3$ для реле серії РНТ-560 і $1,5$ — для серії ДЗТ:

$$I_{с.з} = 1,3 \cdot 116 = 151 A.$$

2. За умовою налаштування від розрахункового максимального струму небалансу $I_{нб.расч}$ при перехідних режимах зовнішніх к. з. з урахуванням впливу НТС, наявного в реле.

Струм небалансу обумовлений повною погрішністю ТС $\varepsilon - I_{нб.в}$, погрішністю регулювання напруги $\Delta U_{РЕГ} - I_{нб.рег}$ і погрішністю від неточного вирівнювання м. д. с. в реле $\Delta f_{ВИР} - I_{нб.вир}$

Таким чином

$$I_{нб.расч} = I_{нб\varepsilon} + I_{нб.рег} + I_{нб.вир} \quad (8.3)$$

В даному випадку:

$$I_{с.з} = k_H I_{нб.расч} = k_H (k_{анер} k_{ОДН} \varepsilon + \Delta U_{РЕГ} + \Delta f_{ВИР}) I_{К.ВН.макс} \quad (8.4)$$

де $k_H = 1,3$ для РНТ-560 і $1,5$ для ДЗТ;

$k_{анер}$ — коефіцієнт, що враховує перехідний режим струмів к. з. (наявність аперіодичної що складає струм), за наявності в реле НТС $k_{анер} = 1$;

$k_{ОДН}$ — коефіцієнт однотипності ТС, при різних типах ТС $k_{ОДН} = 1$;

$\varepsilon = 0,1$ — допускається відносна повна погрішність ТС (відносне значення струму намагнічення в встановленому режимі);

$\Delta U_{РЕГ}$ — відносна погрішність, обумовлена регулюванням напруги, що приймається рівній половині сумарного діапазону регулювання; при цьому вибір числа витків НТС реле виконується за номінальною напругою;

Δf_{BIP} — відносна погрішність від неточного вирівнювання значень струмів плечей захисту (неточного вирівнювання м. д. с. в реле з НТС унаслідок неможливості точної установки на реле розрахункового числа витків $\omega_{расч}$):

$$\Delta f_{BIP} = (\omega_{расч} - \omega_{УСТ}) / \omega_{расч} \quad (8.5)$$

де $\omega_{УСТ}$ — прийняте (встановлене) замість розрахункового числа витків.

Як видно з (8.4), ці погрішності створюють струми небалансу, пропорційні струму, що протікає через трансформатор при зовнішньому к. з.

Спочатку обчислюють $I_{с.з}$ без врахування складової струму небалансу від неточного вирівнювання, і більше із значень, отриманих по (8.2) і (8.4), приймають за розрахункове.

Обчислюємо к.з по (8.4):

$$I_{с.з} = 1,3 \cdot 1 \cdot 1(0,1 + 0,09) \cdot 1230 = 304 \text{ A}.$$

Обчислюємо вторинні номінальні циркулюючі струми, при цьому враховуємо, що ТС на стороні 35 кВ сполучені в трикутник, а ТС 10 кВ — в неповну зірку:

$$I_{35B} = \frac{I_{35НОМ} k_{CX}^{(3)}}{n_{T35}} = \frac{104 \cdot \sqrt{3}}{300/5} = 3 \text{ A}; \quad I_{10B} = \frac{331 \cdot 1}{500/5} = 3,31 \text{ A}.$$

Заздалегідь перевіримо можливість використання реле РНТ-565 без гальмування, для чого розрахуємо (7.2)

$$I_{с.р35} = I_{с.з} k_{CX}^{(3)} / n_{T35} = \frac{304 / \sqrt{3}}{(300/5)} = 8,77 \text{ A}.$$

Коефіцієнт чутливості обчислюваний:

$$k_{ч.мин} = 1,5 I_{K.мин}^{(3)} / (n_{T35} I_{с.р35}) = \frac{1,5 \cdot 820}{(300/5) \cdot 8,77} = 2,69$$

Оскільки $k_{ч.мин}$ більше 2, розрахунок продовжуємо з використанням реле РНТ-565.

Плече з великим вторинним струмом 10 кВ приймаємо за основну сторону й підключаємо до робочої (диференціальною) обмотки реле (рис. 8.1, а).

Струм спрацювання реле основної сторони

$$I_{c.p.OCH} = I_{c.p10} = \frac{I_{c.з} k k_{CX}^{(3)}}{n_{T10}} = \frac{304(35/11)1}{500/5} = 9,68A$$

Розрахункове число витків основної сторони визначаємо за формулою

$$\omega_{OCH.pacч} = \omega_{pab.pacч} = F_{c.p} / I_{c.p.OCH} \quad (8.6)$$

де $F_{c.p} = 100A$ – м.д.с. спрацювання реле серії РНТ-560 і ДЗТ (за відсутності гальмування):

$$\omega_{OCH.pab} = 100 / 9,68 = 10,3 вит.$$

Приймаємо $\omega_{OCH} = \omega_{pab10} = 10 вит.$

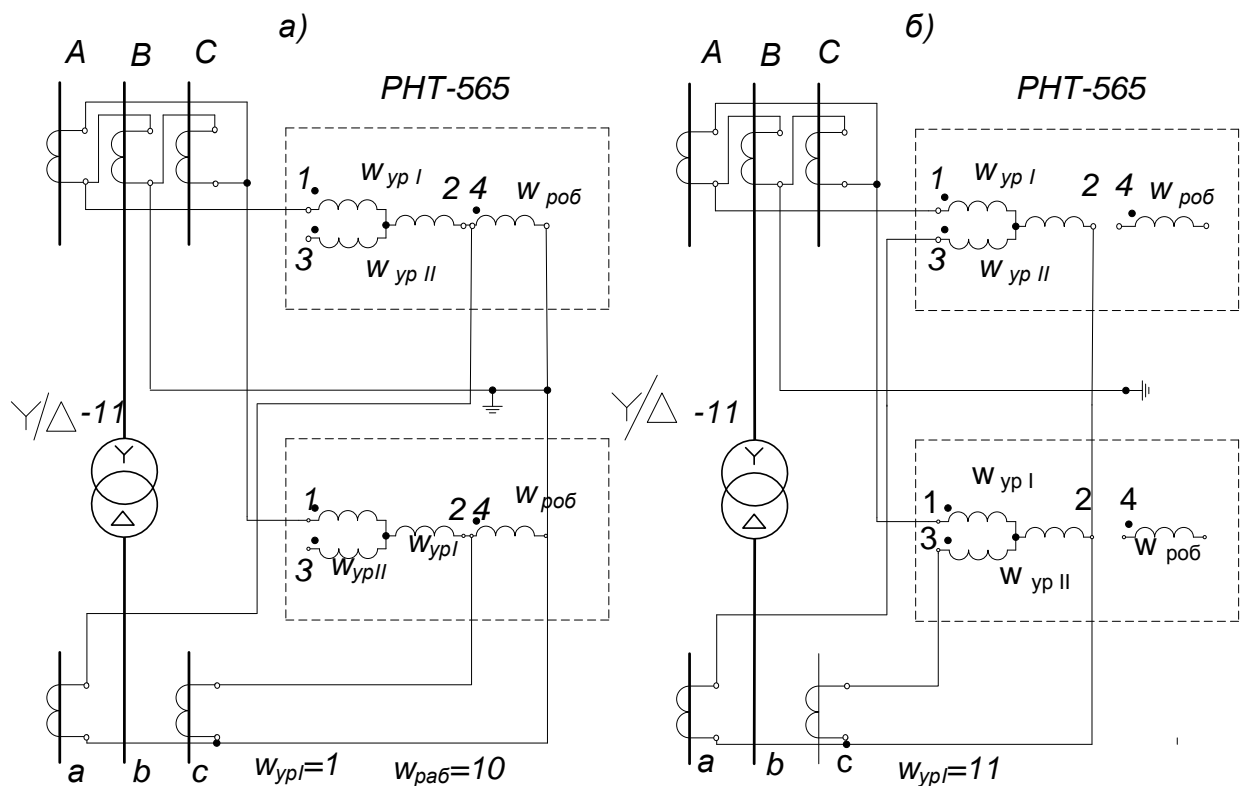


Рисунок 8.1 – З'єднання реле в двохрелейній схемі диференціального захисту трансформатора: а — включення робочою і однієї зрівняльної обмотки; б — включення обох зрівняльних обмоток. Схема реле РНТ-565 показана спрощено.

Трансформатори струму 35 кВ неосновної сторони підключаємо до першої зрівняльної і до робочої обмотки реле.

Загальне число витків неосновної сторони визначають з рівності м. д. с. в реле в нормальному режимі навантаження і при зовнішньому к. з. за формулою:

$$\omega_{\text{НЕОСН.расч}} = \omega_{\text{ОСН}} + \omega_{\text{Ур.расч}} = \omega_{\text{раб}} + \omega_{\text{Ур.расч}} = \omega_{\text{ОСН}} I_{\text{ОСН.В}} / I_{\text{НЕОСН.В}}. \quad (8.7)$$

У даному завданні

$$\omega_{35\text{расч}} = \omega_{\text{раб10}} + \omega_{\text{Ур1расч}} = \omega_{\text{ОСН}} I_{10\text{В}} / I_{35\text{В}} = 10 \cdot 3,31 / 3 = 11 \text{ вит.}$$

Приймаємо $\omega_{35} = \omega_{\text{раб10}} + \omega_{\text{Ур1}} = 11 \text{ вит.}$, тоді $\omega_{\text{Ур1}} = \omega_{35} - \omega_{\text{раб10}} = 11 - 10 = 1 \text{ вит}$

Ми отримали точне вирівнювання м. д. с. в реле унаслідок можливості установки на реле розрахункового числа витків.

В цьому випадку відсутня складова струму небалансу від неточного вирівнювання. По (8.5)

$$\Delta f_{\text{ВІР}} = (\omega_{35\text{расч}} - \omega_{35}) / \omega_{35\text{расч}} = (11 - 11) / 11 = 0.$$

Для двообмоточних трансформаторів можна використовувати обидві обмотки зрівняльні, як це показано на рис. 7.6, б.

В цьому випадку $\omega_{\text{Ур1}} = \omega_{\text{НЕОСН}} = \omega_{35} = 11 \text{ вит.}$, $\omega_{\text{УрII}} = \omega_{\text{ОСН}} = \omega_{\text{раб10}}$, тобто обчислення витків зрівняльних обмоток виконується по (8.6) і (8.7).

Уточнюємо мінімальний коефіцієнт чутливості за формулою

$$k_{\text{ч.мин}} = F_{\text{р.мин}} / F_{\text{с.р}} \quad (8.8)$$

де $F_{\text{р.мин}}$ — мінімальна м. р. с. в реле при к. з. у зоні захисту. При двофазному к. з. на стороні трикутника трансформатора набирає розрахункового вигляду:

$$k_{\text{ч.мин}}^{(2)} = \frac{1,5 I_{\text{К.мин}}^{(3)} \omega_{\text{р}}}{n_{\text{Т1}} F_{\text{с.р}}} = \frac{1,5 \cdot 820 \cdot 11}{300 / 5 \cdot 100} = 2,26 > 2.$$

Повна схема реле типу РНТ-565 приведена в [8] і в технічній інформації заводу.

Таблиця 8.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 8.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$S_{\text{Т.НОМ}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	6,2	6,1	6,4	6,5	6,6	6,3	6,5	6,4	6,1	6,2	6,3	6,5
$u_{\text{К}}, \%$	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,5	6,7	6,9	6,8	6,9	6,7

8.2. Обчислити коефіцієнт чутливості захисту за даними: струм спрацювання реле $I_{\text{с.р}} = 7,13 \text{ А}$, коефіцієнт трансформації ТС 110 кВ $n_{\text{Т110}} = 200 / 5$.

При однофазному к. з. на стороні 110 кВ в зоні диференціального струмового захисту знижуючого трансформатора 115/6,6 кВ Δ/Δ - 11, в якого нейтраль заземлена наглухо повний струм в пошкодженій фазі $I_K^{(1)} = 1485 \text{ A}$, при цьому струм нульової послідовності, що протікає через нейтраль трансформатора до місця к. з., $I_{0T}^{(1)} = 143 \text{ A}$.

Рішення. Симетричні складові струмів при однофазному к. з. обчислюємо:

$$I_{KA1}^{(1)} = I_{KA2}^{(1)} = I_{K0}^{(1)} = I_K^{(1)} / 3 = 1485 / 3 = 495 \text{ A}.$$

Струм нульової послідовності, що притікає від системи до місця к. з.,

$$I_{0C}^{(1)} = I_{0K}^{(1)} - I_{0T}^{(1)} = 495 - 143 = 352 \text{ A}.$$

Як показано нижче, цей струм можна не обчислювати.

При групі з'єднань силового трансформатора Δ/Δ - 11 ТС на стороні зірки з'єднуються в трикутник, тому вторинні струми нульової послідовності, маючи однаковий напрям у всіх трьох фазах ТС, циркулюють в цьому трикутнику і не протікають в реле.

Незалежно від співвідношення струмів нульової послідовності, що протікають до місця к. з. від системи і через заземлену нейтраль трансформатора, вони в реле дорівнюють нулю.

В реле протікають струми прямої і зворотної послідовності, при цьому їх сума по абсолютній, величині $I_p^{(1)} = I_K^{(1)} / n_{T110}$. Доведемо цю рівність.

$$\text{При к. з. на фазі А : } I_{KA1}^{(1)} = I_{KA2}^{(1)}.$$

Оскільки ТС 110 кВ сполучені в трикутник, то з рис. 7.4, б витікає:

$$I_{KAB1}^{(1)} = \sqrt{3} I_{KA1}^{(1)} e^{j120^\circ} \text{ і } I_{KAB2}^{(1)} = \sqrt{3} I_{KA2}^{(1)} e^{j60^\circ}, \text{ тоді}$$

$$n_{T110} I_p^{(1)} = \sqrt{3} I_{KA1}^{(1)} (e^{j120^\circ} + e^{j60^\circ}) = \sqrt{3} I_{KA1}^{(1)} (-0,5 + j\sqrt{3}/2 + 0,5 + j\sqrt{3}/2) = j3 I_{KA1}^{(1)} = j I_{KA}^{(1)}$$

За абсолютною величиною

$$I_p^{(1)} = I_{KA}^{(1)} / n_{T110} = 1485 / 40 = 37,2 \text{ A}. \quad k_q^{(1)} = I_p^{(1)} / I_{c.p} = 37,2 / 7,13 = 5,21$$

З цього завдання витікає, що при заданому первинному струмі спрацювання

$$I_{c.з}^{(3)} = I_{c.p} n_{T110} / k_{CX}^{(3)} = \frac{7,13 \cdot 40}{\sqrt{3}} = 165 \text{ A}.$$

$k_q^{(1)}$ простіше обчислювати:

$$k_q^{(1)} = I_K^{(1)} / \sqrt{3} I_{c.з}^{(3)} = \frac{1485}{\sqrt{3} \cdot 165} = 5,21.$$

Таблиця 8.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 8.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{c.p}, A$	7,10	7,11	7,12	7,14	7,15	7,16	7,17	7,18	7,19	7,2	7,3	7,4

Питання для самоперевірки

1. Розкрийте особливості роботи диференційного захисту знижуючих силових трансформаторі?
2. Який принцип роботи диференційного струмово силового захисту трансформатора з РНП?
3. Які умови первинного струму спрацювання диференційного захисту ви знаєте?
4. Яка відмінність роботи диференційного захисту на РНТ від ДЗТ?
5. Навіщо необхідні зрівняльні обмотки в реле РНТ та ДЗТ?

Література [1 с. 137-154; 4 с. 112-148; 6 с. 97-109]

Практичне заняття № 9

Тема 9: Розрахунок захисту двигунів

Практичне заняття за темою № 9. Розрахунок захисту двигунів

Навчальна мета заняття : Відпрацювання практичних навиків, розрахунок захисту двигунів

Кількість годин - 1 (заочна форма).

Місце проведення : аудиторія коледжу

Навчальні питання:

1. Які типи захисту використовуються для захисту електричних двигунів, і як вони працюють?
2. Які параметри двигуна потрібно враховувати при розрахунку та налаштуванні захисту?
3. Як визначити оптимальні параметри захисту для конкретного типу та режиму роботи двигуна?

Література: 1-5.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Розрахунок захисту двигунів в схемах релейного захисту які відрізняються за характером електроспоживання і, відповідно, способом розрахунку.

Мета: Ознайомити студентів з методом розрахунку захисту двигунів

Хід проведення практичного заняття

Практичне заняття № 9

Тема: Розрахунок захисту двигунів

9.1. Вибрати типи захисту і визначити їх уставки для електродвигунів насоса багера гідрозоловидалення за даними: $U_{д.ном} = 6кВ$; $P_{д.ном} = 400кВт$; $I_{д.ном} = 48,4А$; $k_{п} = 1,5$; ТС з $n_T = 150/5$ встановлені на фазах А і С; струм трифазного к. з. на шинах розподільного пристрою власних потреб (РУСН)

$I_K^{(3)} = 13000\text{A}$; струм замикання на землю в РУСН $I_3 < 10\text{A}$.

Рішення. Вказаний двигун схильний до перевантаження і є невідповідальним. Відповідно до ПУЕ на таких електродвигунах потужністю менше 2000 кВт застосовують однорелейний двофазний струмовий захист без витримки часу (відсічення), відбудований за струмом від струмів самозапуска, і захист від перевантаження, відбудований від струмів самозапуска за часом (рис. 9.1, а). Крім того, при $I_3 > 10\text{A}$ застосовують струмовий захист нульової послідовності без витримки часу, що складається з кабельного ТС типа ТЗЛ і реле типа РТ-40/0,2, РТ-40/2 або ЕТД-551/60 і РТ-40/2 (реле 1, 2 рис. 9.1). Однорелейна схема включається на різницю вторинних струмів (зазвичай фаз А в С).

Якщо однорелейна схема відсічення двигунів потужністю менше 2000 кВт не забезпечує потрібний по ПУЕ коефіцієнт чутливості $k_q = 2$, то застосовують двофазну дворелейну схему (яка чутливіше в $\sqrt{3}$ раз, як це нижче буде показано (рис. 9.1,б)).

Первинний струм спрацювання відсічення відбудовується від пускового струму електродвигуна по вираженню

$$I_{с.з.ОТС} = k_H k_{\Pi} I_{д.НОМ} \quad (9.1)$$

де $k_H = 1,8$ для реле серії РТ-80 і $k_{CX}^{(3)} = 1$ для реле серії РТ-40.

Струм спрацювання реле визначається по вираженню

$$I_{с.р.ОТС} = k_{CX}^{(3)} I_{с.з.ОТС} / n_T \quad (9.2)$$

де $k_{CX}^{(3)} = \sqrt{3}$ - при включенні реле на різницю струмів двох фаз ТС (рис. 9.1,а) і

$k_{CX}^{(3)} = 1$ при включенні реле на струми фаз ТС (рис. 9.1,б).

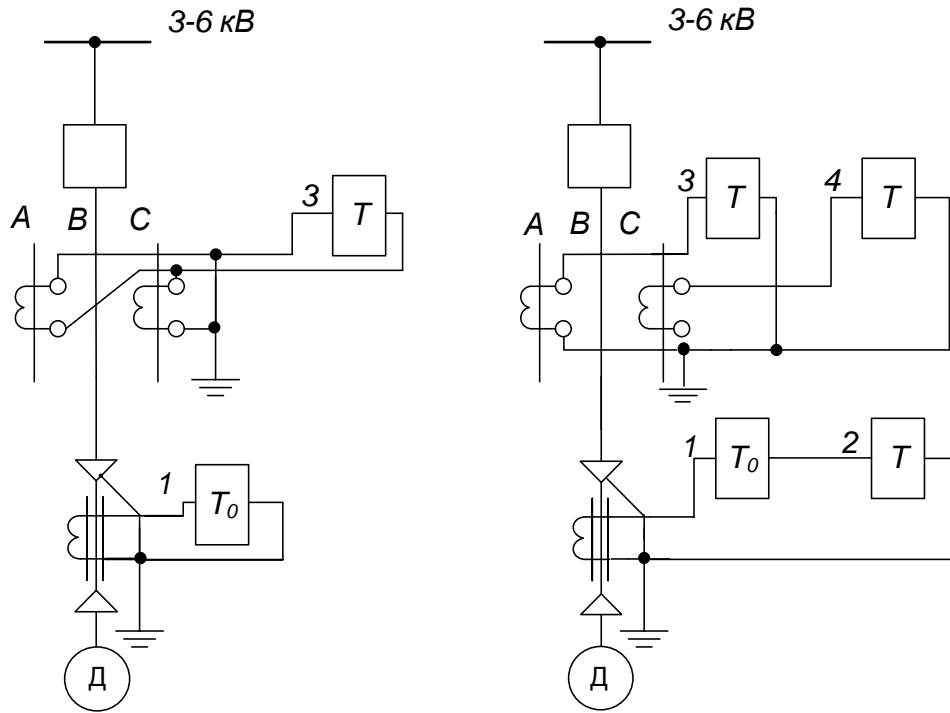


Рисунок 9.1 – Схеми з'єднань ТС і реле захисту електродвигунів:

а — однорелейна двофазна; б — двохрелейна двофазна

1 — реле РТ-40/0,2 або ЕТД-551/60 (РТ350)

2 — реле РТ-40/2; 3, 4 — реле РТ-80 або РТ-40

Коефіцієнт чутливості захисту для однорелейної схеми визначається при двофазному к. з. на виводах електродвигуна між фазами А і В або В і С, при яких струм в реле в 2 рази менше, ніж при к. з. між фазами А і С, за виразом

$$k_q^{(2)} = I_p^{(2)} / I_{c.p.OTC} = I_K^{(2)} / (I_{c.p.OTC} n_T) \quad (9.3)$$

Для двохрелейної схеми струми в обоє реле при к. з. між будь-якими двома фазами однакові.

З (9.2) -и (9.3) слідує, що при двофазній дворелейної схемі захисту в $\sqrt{3}$ разів чутливіше, тому за ПУЕ її потрібно застосовувати на електродвигунах потужністю 2000 кВт і більше.

Струм спрацювання захисту від перевантаження визначається по умові налаштування від $I_{Д.НОМ}$ по виразу:

$$I_{c.з} = k_H I_{Д.НОМ} / k_B \quad (9.4)$$

де $k_H = 1,2$ і $k_B = 0,8$ — коефіцієнти надійності і повернення реле відповідно.

3 (9.2) і (9.4) визначаємо вираз для обчислення струму спрацювання реле перевантаження:

$$I_{c.p} = k_H k_{CX}^{(3)} I_{Д.НОМ} / k_B n_T. \quad (9.5)$$

Витримка часу захисту від перевантаження при схемі з реле серії РТ-84 приймається 16 с в незалежній частині, і якщо його недостатньо, то встановлюють ще додаткове реле часу типа ЕВ-144 з шкалою 0-20 с.

При схемі з незалежною характеристикою витримки часу застосовують реле типа ЕВ-144 або типа Е-513 з шкалою 6-60 с, залежно від часу пуску або самозапуску двигуна [5].

Для заданого електродвигуна перевіримо можливість застосування однорелейної схеми з реле типа РТ-84

Первинний струм спрацювання відсічення визначуваний за (9.1):

$$I_{c.з.ОТС} = k_H k_{II} I_{Д.НОМ} = 1,8 \cdot 5,1 \cdot 48,4 = 445 A.$$

Струм спрацювання елемента відсічення в реле визначуваний за (9.2):

$$I_{c.p.ОТС} = k_{CX}^{(3)} I_{c.з.ОТС} / n_T = \sqrt{3} \cdot 445 / 30 = 25,6 A.$$

Коефіцієнт чутливості обчислюваний за (9.3):

$$k_q^{(2)} = I_K^{(2)} / (I_{c.p.ОТС} n_T) = 0,867 \cdot 13000 / (25,6 \cdot 30) = 14,65.$$

Струм спрацювання індукційного елемента реле РТ-84 з витримкою часу від перевантаження визначуваний за (9.5):

$$I_{c.p} = k_H k_{CX}^{(3)} I_{Д.НОМ} / (k_B n_T) = (1,2 \cdot \sqrt{3} \cdot 48,4) / (0,8 \cdot 30) = 4,18 A.$$

Приймаємо реле типа РТ-84/2 з уставками $I_{c.p} = 4,5 A$ і витримкою часу в незалежній частині характеристики 16 с.

Кратність відсічення до уставки індукційного елемента

$$k = I_{c.p.ОТС} / I_{c.p} = 25,6 / 4,5 = 5,7.$$

По каталогу розкид в струмі спрацювання відсічення приблизно 30%.

Коефіцієнт чутливості захисту від перевантаження не визначається, оскільки він не призначений для дії при к. з.

Досвід експлуатації показав неправильне (зайве) спрацювання відсічення в реле

серії РТ-80, встановлених в шафах КРУ, від струсів при операціях з вимикачами сусідніх шаф. Тому останнім часом захист від перевантаження електродвигунів власних потреб виконується з незалежною витримкою часу за допомогою реле струму РТ-40 і реле часу ЕВ-144 для двигунів з часом пуску 10-15 с і з реле Е-513 для двигунів з часом пуску або самозапуску більше 20 с [5].

Оскільки даний двигун невідповідальний, то передбачаємо його відключення від першого рівня захисту мінімальної напруги: $U_{с.з} = (0,65 - 0,7)U_{НОМ}$ і $t = 0,5с$.

Захист від замикань на землю не передбачаємо, виходячи з того, що для двигунів 6 кВ менше 2000 кВт при струмі I_3 менше 10 А по ПУЕ вона не встановлюється.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані для розрахунку завдання 9.1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{д.НОМ}, кВт$	300	350	370	380	360	320	330	340	310	320	390	385
$I_{д.НОМ}, А$	36,3	42,4	44,8	45,9	43,5	38,7	39,9	41,1	37,5	38,7	47,2	46,6

9.2. Вибрати тип захисту і обчислити його уставки для електродвигуна конденсаторного насоса турбіни за даними: $U_{д.НОМ} = 6кВ$; $P_{д.НОМ} = 250кВт$; $I_{д.НОМ} = 29А$; $k_{П} = 5,8$; $n_T = 150 / 5$; на шинах РУСН $I_K^{(3)} = 13000А$; струм замикання на землю $I_3 = 5А$.

Рішення. Електродвигун конденсаторного насоса є відповідальним і не схильний до перевантаження, тому передбачаємо струмовий захист від міжфазних к. з. без витримки часу — відсічення, відбудований від пускових струмів і струмів самозапуску за однорелейною схемою з реле 3 серії РТ-40 (рис. 9.1, а).

Первинний струм спрацювання відсічення обчислюваний за (9.1):

$$I_{с.з.ОТС} = k_{П} k_{Н} I_{д.НОМ} = 1,4 \cdot 5,6 \cdot 29,4 = 239 А.$$

Струм спрацювання реле обчислюємо за (9.2):

$$I_{с.р.ОТС} = k_{СХ}^{(3)} I_{с.з.ОТС} / n_T = \sqrt{3} \cdot 239 / 30 = 13,8 А.$$

Приймаємо реле струму типа РТ-40/20 з межами 5-20 А і проміжне реле типа РП-23.

Коефіцієнт чутливості обчислюваний за (9.3) при к. з. між двома фазами, на одній з яких відсутній ТС, оскільки в цьому випадку цей коефіцієнт менше в 2 рази, чим при к. з. між двома фазами (див. завдання 9.1), мають

$$k_q^{(2)} = I_K^{(2)} / (I_{c.p.OTC} n_T) = (0,867 \cdot 13000) / (13,8 \cdot 30) = 27,3 > 2.$$

Оскільки двигун є відповідальним, то він має бути відключений лише при тривалій відсутності напруги на шинах РУСН від другого рівня захисту мінімальної напруги: $U_{c,z} = (0,4 - 0,5) U_{НОМ} t = 9с$, для можливості дії АВР двигуна.

При виводі з дії АВР цей захист також виводиться [3].

Захист від замикань на землю не передбачається, оскільки I_3 менше 10 А [7].

Таблиця 9.2 – Вихідні дані для розрахунку завдання 9.2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{д.НОМ}, кВт$	300	350	370	380	360	320	330	340	310	320	390	385
$I_{д.НОМ}, А$	36,3	42,4	44,8	45,9	43,5	38,7	39,9	41,1	37,5	38,7	47,2	46,6

9.3. Визначити типи захисту двошвидкісного електродвигуна димососа напругою 6 кВ потужністю 1500/850 кВт; $I_{НОМ} = 204/118А$; $k_H = 6,1/5,5$; струм замикання на землю менш 10А.

Рішення. Двошвидкісні асинхронні електродвигуни використовуються на потужних теплових електростанціях як приводи для димососів, циркуляційних насосів і дуттєвих вентиляторів.

Ці електродвигуни виконуються з двома незалежними статорними обмотками, кожна з яких підключається до шин РУСН 6 кВ через окремий вимикач. Спеціальне блокування в схемах управління цими вимикачами виключає одночасне включення обох статорів обмоток.

Вказані електродвигуни застосовуються в цілях економії електроенергії на власні потреби за допомогою їх переходу на меншу швидкість обертання залежно від навантаження на котел і турбіну (зниження навантаження в нічний час, при пуску і зупинці роботи котлу).

На кожній обмотці статора передбачаються необхідні захисти, що діють на її

вимикач. Уставки захисту вибираються відповідно до номінальних параметрів кожної обмотки статора.

Електродвигун димососа є відповідальним і схильний до технологічного перевантаження, тому на кожному з його статорів передбачаємо струмове відсічення і захист від перевантаження. Двигун не відключається від захисту мінімальної напруги у зв'язку з можливістю його самозапуску [3]. Захист від замикання на землю не передбачається [7]. Уставки захисту для кожної обмотки статора обчислюються по (9.1) — (9.5), як це виконано в завданні 9.2.

Таблиця 9.3 – Вихідні дані для розрахунку завдання 9.3.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{д.ном},$ $кВт$	3000 / 1500	3500 / 1750	3700 / 1850	3800 / 1900	3600 / 1800	3200 / 1600	3300 / 1650	3400 / 1700	3100 / 1550	3200 / 1600	3900 / 1950	3850 / 1850
$I_{д.ном}, A$	363/ 181	424/ 212	448/ 224	459/ 226	435/ 218	387/ 193	399/ 200	411/ 206	375/ 182	387/ 194	472/ 236	466/ 233

9.4. Визначити типи захисту і їх уставки асинхронного електродвигуна живильного насоса за даними: $U_{д.ном} = 6кВ$; $P_{д.ном} = 4000кВт$; $I_{д.ном} = 440А$; $k_{II} = 6,3$; є АВР двигунів; $n_T = 600/5$; струм трифазного к. з. на затисках електродвигунів $I_K^{(3)} = 13000А$; двигун підключається до шин двома кабелями 6 кВ; струм замикання на землю $I_3 = 11А$.

Рішення. Відповідно до ПУЕ на двигунах від 2000 і до 5000 кВт струмовий захист від міжфазних к. з. виконують без витримки часу в двохрелейного двофазного виконання (рис, 9.1,б). Приймаємо цей захист, а також захист від перевантаження на випадок тривалого самозапуску і захист від замикання на землю. При цьому вторинні обмотки, ТС нульової послідовності, встановлені на кожному кабелі, з'єднуються послідовно і до них підключається реле 1, а на потужних двигунах і, реле 2 типу РТ-40/2 для захисту від подвійних замикань на землю, з яких одне замикання знаходиться на фазі В статора.

Первинний струм спрацювання відсічення з реле РТ-40 обчислюємо за (9.1):

$$I_{\text{н.з.д.}} = k_H k_I I_{\text{д.н.ом}} = 1,4 \cdot 6,3 \cdot 440 = 3880 \text{ А};$$

струм спрацювання реле за (9.2):

$$I_{\text{с.р.отс}} = k_{\text{CX}}^{(3)} I_{\text{с.з.отс}} / n_T = 1 \cdot 3880 / 120 = 32,3 \text{ А};$$

коефіцієнт чутливості за (9.3):

$$k_q^{(2)} = I_K^{(2)} / (I_{\text{с.р.отс}} n_T) = (0,867 \cdot 13000) / (32,3 \cdot 120) = 2,9 > 2.$$

Приймаємо реле 3 і 4 типи РТ-40/50.

Струм спрацювання захисту від перевантаження, встановлюваній в одній фазі (на рис. 9.1,б це реле не показане) знаходимо за (9.4):

$$I_{\text{с.з}} = k_H I_{\text{д.ном}} / k_B = 1,2 \cdot 440 / 0,8 = 660 \text{ А};$$

струм спрацювання реле перевантаження за (9.2):

$$I_{\text{с.р}} = k_{\text{CX}}^{(3)} I_{\text{с.з}} / n_T = 1 \cdot 660 / 120 = 5,5 \text{ А}.$$

Приймаємо реле струму типа РТ-40/10 і, враховуючи можливість великого часу розгону двигуна при самозапуску, встановлюємо реле часу типа Е-513 (6-60 с).

Враховуючи значну потужність двигуна, для підвищення чутливості і надійності відсічення прийнято реле РТ-40, для яких в (13-1) $k_H = 1,4$, тоді як для РТ-80 $k_B = 1,8$, а в захисті від замикань на землю реле 1 ЕТД-551/60 або РТЗ-50, при якому чутливість по первинному струму приблизно 5 А, і реле 2 типи РТ-40/2 для захисту від подвійних замикань на землю, чутливість якого по первинному струму порядку 100-200 А.

Як реле для захисту від перевантаження можна також використовувати реле типа РТ-84 (з виводом з дії відсічення), якщо час 16 с в незалежній частині забезпечує настроєння від часу самозапуска двигуна.

Для дії АВР двигун відключається від другого рівня захисту мінімальної напруги (див. введення до даної глави), проте цей захист виводиться з дії при виключенні АВР.

За наявності шести виводів в двигуна потужністю 4000 кВт «Теплоэлектропроект» замість струмового відсічення передбачає двохранейний

диференціальний захист з реле з НТС типа РНТ-565, а при потужності 8000 кВт трьохрелейну схему. При цьому чутливість захисту від міжфазних к. з. значно підвищується. Покажемо це, виконавши розрахунок диференціального захисту для двигуна 4000 кВт, який аналогічний розрахунку такого ж захисту на генераторі.

Первинний струм спрацювання диференціального захисту визначається за виразом

$$I_{c.з} = \varepsilon k_H k_{анер} k_{ОДН} k_{ПД} I_{Д.НОМ} = 0,1 \cdot 1,3 \cdot 0,5 \cdot 6,3 \cdot 440 = 180 A (0,41 I_{Д.НОМ}).$$

Зазвичай, враховуючи відповідальність потужних електродвигунів (за ПУЕ диференціальний захист вважається для двигунів 5000 кВт і більш), для підвищення надійності приймають [5]

$$I_{c.з} = (0,6 \div 0,7) I_{Д.НОМ}. \quad (9.6)$$

Підставляючи в (9.6), отримуємо

$$I_{c.з} = 0,7 \cdot 440 = 308 A.$$

$$\text{За (9.2) } I_{c.p} = 308 / 120 = 2,57 A.$$

Число витків в реле РНТ-565 $\omega_{расч} = F_{c.p} / I_{c.p} = 100 / 2,57 = 39 \text{ вит.}$. Дане число витків можна встановити на реле за допомогою з'єднання однієї із зрівняльних і робочої (диференціальної) обмотки реле.

Коефіцієнт чутливості обчислюється за виразом

$$k_q^{(2)} = I_K^{(2)} / I_{c.з} = 0,867 \cdot 13000 / 308 = 36,5 > 2.$$

Для двигуна 8000 кВт при цьому струми к. з. k_q будуть приблизно в два рази менше.

Первинний струм спрацювання захисту від замикань на землю електродвигунів визначається так само, як і для генераторів:

$$I_{c.з0} = k_H k_{\phi} I_C, \quad (9.7)$$

$$\text{де } k_H = 1,2 \div 1,3;$$

k_{ϕ} — коефіцієнт, що враховує кидок ємкісного струму електродвигуна I_C при зовнішніх переміжних замиканнях на землю; $k_{\phi} = 4 \div 5$ — для захисту без

витримки часу і $k_{\epsilon} = 1 \div 2$ — для захисту з часом дії 1—2 с [4]. $I_{c.30}$ не повинен перевищувати 10 А для електродвигунів потужністю до 2000 кВт і 5 А - для електродвигунів потужністю 2000 кВт і більш. Умова вибору $I_{c.30}$ за (9.7) завжди задовольняється, оскільки для електродвигунів потужністю 10000 кВт $I_C \approx 0,3 \div 0,4$ А.

Для потужних двигунів, що живляться по трьом і більш кабелям, застосовують один загальний ТС нульової послідовності типа ТИП з підмагнічуванням, аналогічно захисту генераторів.

Таблиця 9.4 – Вихідні дані для розрахунку завдання 9.4.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$P_{д.ном}, кВт$	3000	3500	3700	3800	3600	3200	3300	3400	3100	3200	3900	3
$I_{д.ном}, А$	363	424	448	459	435	387	399/	411/	375	387	472	

Питання для самоперевірки

1. Які типи захисту використовуються для електродвигунів?
2. Відповідно до ПУЕ, на яких двигунах використовують однорелейний двофазний струмовий захист?
3. В якому випадку коефіцієнт чутливості однорелейної схеми відсічення двигунів в $\sqrt{3}$ більше?
4. Наведіть формулу для визначення первинного струму спрацювання відсічення?
5. При спрацюванні АВР, що відбувається з елементами захисту електричних двигунів?

Література [2 с. 123-137; 7 с. 112-148; 5 с. 97-109]

3. Рекомендована література

Основна література:

1. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. –533 с.
2. Правила улаштування електроустановок. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
3. Букович Н.В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем / Під ред. Денисенко Г.І. – Львів, Вища шк. Вид-во при Львів. ун-ті, 1988 – 248 с.
4. Л Шелепетень Т.М. Захисна автоматика електричних мереж.: Навч. посібник для студентів спеціальностей 7.090602 та 1.090602 "Електричні системи та мережі" всіх форм навчання. – Львів, 2002, 157 с.
5. Релейний захист і автоматика в системах електропостачання/ П.П.Говоров, Г.А. Сендерович, В.Ф. Соколов та ін. Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1996. 288 с.
6. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 102 с.
7. Релейний захист та кібербезпека енергетичних систем. / Є.І. Сокол, О.Г. Гриб, В.М. Баженов, В.П. Старенький, О.Ю. Заковоротний, М.М. Одегов та ін. (Підручник / Під загальною редакцією членкореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є.І.) – Харків: ФОП Панов А.М. 2015. – 390 с

Допоміжна література:

1. Кідиба В. П., Шелепетень Т. М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів. Львів: Вид. нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. 180 с.
2. Баженов В. М., Одегов М. М. Сучасні технології та методи побудови систем релейного захисту і автоматики в електроенергетиці. URL: web.kpi.kharkov.ua/avkib/uk/metodichnezabezpechennya/ Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем
3. Hewitson Leslie, Brown Mark, Balakrishnan Ramesh. Practical Power Systems Protection. Oxford; Burlington, MA: Newnes, 2005. 289 p.
4. Кідиба В. П., Шелепетень Т. М. Захист ліній електропередавання. Львів: Вид. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. 185 с.
5. Баженов В.М. Основи релейного захисту та автоматики енергосистем. Тести для виконання контрольної роботи. Електронне видання: <https://studfiles.net/preview/1955843>. Харків: НТУ «ХПІ», 2014.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

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