

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О. Ю. КІМСТАЧ, С. М. НОВОГРЕЦЬКИЙ

**РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ
ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни "Основи релейного захисту"**

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2020

УДК 621.316.925.43

К 40

Автори: О. Ю. Кімстач, канд. техн. наук, доц. кафедри СЕЕС;
С. М. Новогрецький, канд. техн. наук, доц. кафедри СЕЕС

Рецензенти: Д. Л. Кошкін, канд. техн. наук, доц., директор Інституту
післядипломної освіти Миколаївського національного
аграрного університету;
І. С. Білюк, канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри
автоматики Національного університету кораблебудування
ім. адм. Макарова

Рекомендовано Методичною радою НУК

Кімстач О. Ю.

К 40 Розрахунок релейного захисту лінії електропостачання : методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни "Основи релейного захисту" / О. Ю. Кімстач, С. М. Новогрецький. – Миколаїв : НУК, 2020. – 52 с.

Розглянуто розрахунок максимально-струмового захисту кабельної лінії електропостачання.

Призначено для виконання практичних робіт з дисципліни "Основи релейного захисту" здобувачами вищої освіти за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

УДК 621.316.925.43

© Кімстач О. Ю., Новогрецький С. М., 2020
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2020

ВСТУП

В електроенергетичних системах експлуатуються пристрої захисту, елементна база яких використовує: електро-механічні реле, блоки-реле, мікропроцесорні пристрої. Останнім часом більший акцент робиться на застосування мікропроцесорних систем захисту, які спроможні забезпечити комплексний захист [6], але у магістральних та радіальних мережах, які використовуються для живлення невідповідальних споживачів, традиційно та безальтернативно застосовуються звичайні релейні пристрої захисту – максимально-струмовий захист та струмова відсічка [7]. Вони характеризуються простотою конструкції, відносно невеликою вартістю, довговічністю, надійністю роботи та високою стійкістю до надвеликих струмів та напруг [4].

При функціонуванні систем електропостачання можливі різні їх стани: нормальний режим роботи, ненормальний, аварійний і післяаварійний режими [1].

Найбільш небезпечним є аварійний режим, котрий настає при виникненні короткого замикання. Для ліквідації ушкодження необхідно, щоб релейний захист відключив пошкоджену ділянку системи електропостачання [3].

Основне призначення релейного захисту – виявлення ушкодження та дія на відключення вимикачів для відокремлення ушкодженої ділянки системи електропостачання [6].

Додаткове призначення релейного захисту – виявлення ненормального режиму (наприклад, перевантаження) і видача інформації про нього або відключення проблемної частини системи електропостачання із заданою витримкою часу [6].

РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1. Завдання

Виконати розрахунок струмового релейного захисту 31 та 32 кабельних ліній електропостачання (ЛЕП) загальнопромислової частоти 50 Гц між трансформаторними підстанціями ТП1 та ТП2 і трансформаторною підстанцією ТП2 та споживачем С (рис. 1).

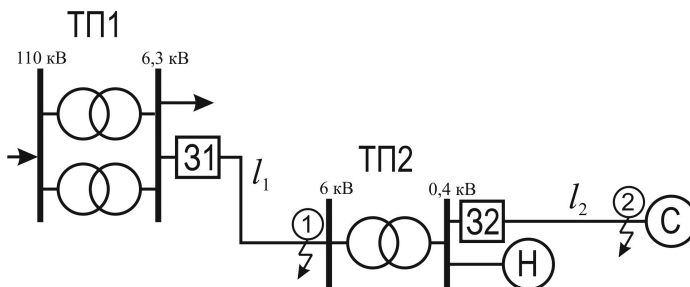


Рис. 1. Схема електропостачання

Схема електропостачання складається з головної двотрансформаторної підстанції ТП1, кабельної лінії довжиною l_1 , розподільчої одностанційної підстанції ТП2, кабельної лінії довжиною l_2 , споживача С у вигляді електродвигуна та групового навантаження Н. Напруги на ділянках

системи електропостачання відповідають значенням вказаним на рис. 1.

ККД споживача дорівнює 0,88, а коефіцієнт потужності $\cos \varphi_c = 0,85$. Коефіцієнт пускового струму споживача $C k_{\text{пуск}} = 3$. Коефіцієнт потужності навантаження $\text{H} \cos \varphi_n = 0,9$.

Кожен студент отримує наступні індивідуальні значення:

- довжина ЛЕП l_1 , км;
- довжина ЛЕП l_2 , км;
- потужність навантаження ТП1 $S_{\text{тп1}}$, кВА;
- потужність навантаження ТП2 $S_{\text{тп2}}$, кВА;
- потужність споживача P_c , кВт.

2. Вказівки до виконання розрахунків

2.1. Вибір трансформаторів

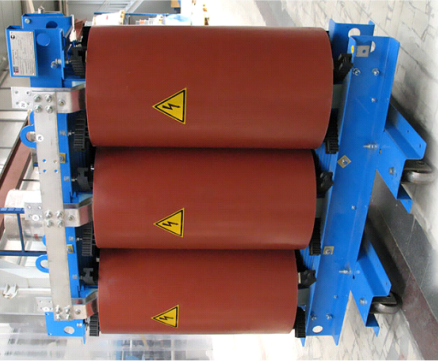
Трансформатори обираються за первинними та вторинними напругами з урахуванням потужності з табл. 1–3.

Загальна потужність трансформаторів на підстанції повинна бути не менше потужності навантаження:

- для першої підстанції $2S_{\text{т1}} \geq S_{\text{тп1}}$;
- для другої підстанції $S_{\text{т2}} \geq S_{\text{тп2}}$.

За табл. 1–3 визначаються основні параметри трансформаторів для кожної підстанції: $U_{\text{вi}}$ – номінальна напруга обмотки високої напруги, кВ; $U_{\text{нi}}$ – номінальна напруга обмотки низької напруги, кВ; S_{Ti} – номінальна повна потужність, кВА; i_{xi} – струм холостого ходу, %; P_{xi} – втрати холостого ходу, кВт; u_{ki} – напруга короткого замикання, %; P_{ki} – втрати короткого замикання, кВт; n_{Ti} – кількість паралельно підключених трансформаторів, де індекс "i" відповідає номеру трансформаторної підстанції.

Таблиця 1. Трансформатори силові сухі ТСЛ, ТСЗЛ

Потужність, $S_{ном}$ кВА	Втрати, Вт		Струм х.х. $I_{хх}$, %	Напруга $u_{хх}$, %	Вага, кг	Зовнішній вигляд
	P_x	P_k				
25	180	450	3	4,5	250	
40	230	780	3	4,5	330	
63	350	1150	3	4	450	
100	420	2100	3	6	620	
160	600	2700	1,5	6	770	
250	750	3650	1	6	930	
400	1150	5600	1	6	1300	
630	1400	6700	0,8	6	1750	
1000	2200	8700	0,8	6	2500	
1250	2600	11200	0,8	6	2850	
1600	3300	11500	0,6	6	3800	
2000	3300	15000	0,6	6	4050	
2500	4100	19500	0,6	6	4900	

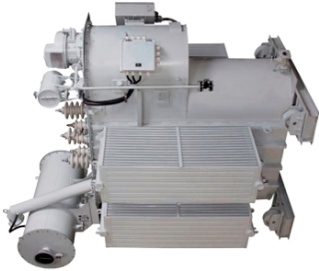
Трансформатори ТСЛ (ТСЗЛ) потужністю 63-2500 кВа, класом напруги 6/0,4 кВ призначені для установки у вбудовані підстанції. Характеризуються зменшеними габаритами та зниженим рівнем шуму. Трансформатори, що поставляються в кожусі, маркуються як ТСЗЛ. Кожух необхідний у випадку, коли трансформатор ТСЛ установлюється на відкритому майданчику, у приміщенні з підвищеною вологістю або в місці можливо-го влучення води на трансформатор. Трансформатори мають регулювання напруги зі сторони високої напру-ги у межах $\pm 2 \times 2,5\%$ від номінальної.

∞ Таблиця 2. Трансформатори силові ТМ

Тип транс- форматора	Потужність, $S_{ном}$ кВА	Втрати, Вт		Напруга $u_{k\%}$ %	Струм х.х. $i_{х\%}$ %	Зовнішній вигляд
		P_x	P_k			
ТМ-25	25	120	600	4,5	3,0	
ТМ-40	40	160	880		2,8	
ТМ-63	63	230	1280		2,6	
ТМ-100	100	305	2000		2,2	
ТМ-160	160	450	2600		1,9	
ТМ-250	250	610	3700		1,9	
ТМ-400	400	900	5500		1,8	
ТМ-630	630	1250	7600	5,5	1,7	
ТМ-1000	1000	1900	12200	5,5	1,7	
ТМ-1600	1600	2350	18000	6,5	1,3	
ТМ-2500	2500	3750	24000	6,0	0,8	
ТМ-4000	4000	5200	33500	7,5	0,9	

Трансформатори загального призначення на напругу 6/0,4 кВ із природним масляним охолодженням призначені для перетворення електроенергії в мережах енергосистем і споживачів змінного струму частотою 50 Гц. Трансформатори передбачають регулювання напруги зі сторони високої напруги у межах $\pm 2 \times 2,5\%$ від номінальної.

Таблиця 3. Двохобмоткові трансформатори для зниження напруги

Тип трансформатора	Напруга $U_{\text{кв}}$, %	Втрати, кВт		Струм х.х. $i_{\text{хх}}$, %	Повна вага, т	Зовнішній вигляд
		$P_{\text{х}}$	$P_{\text{к}}$			
ТМН-2500/110	10,5	6,5	22,0	1,50	10,40	
ТМН-6300/110	10,5	11,5	48,0	0,80	14,50	
ТДН-10000/110	10,5	15,5	60,0	0,70	15,10	
ТДН-16000/110	10,5	24,0	85,0	0,70	13,25	
ТРДН-25000/110	10,5	30,0	120,0	0,70	20,00	
ТРДН-32000/110	10,5	40,0	145,0	0,70	24,51	
ТРДН-40000/110	10,5	50,0	160,0	0,65	28,20	
ТРДЦН-63000/110	10,5	70,0	245,0	0,60	29,00	
ТРДЦН-80000/110	10,5	85,0	310,0	0,60	36,30	

Трансформатори загального призначення на напругу 115/6,3 кВ із природним масляним охолодженням призначені для перетворення електроенергії в мережах енергосистем і споживачів змінного струму частотою 50 Гц.

2.2. Вибір кабелів

Вибір кабелів виконується за значенням тривалого робочого струму (А), який дорівнює для

– першого кабелю

$$I_{к1} = \frac{S_{т2}}{\sqrt{3}U_{в2}};$$

– другого кабелю

$$I_{к2} = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_{н2} \cos \varphi_c \eta_c}.$$

За отриманим значенням $I_{к1}$ обирається перший трифазний кабель з табл. 4, а за $I_{к2}$ – другий трифазний кабель з табл. 5.

Таблиця 4. Електричні алюмінієві кабелі АПвЕгП на напругу 6 кВ

Перетин жили, q , мм ²	Тривалий максимальноприпустимий струм, А	Активний опір, r_0 , Ом/км	Індуктивність, l_0 , мГн/км	Зовнішній вигляд
35	103	1,113	0,382	
50	122	0,822	0,352	
70	150	0,568	0,331	
95	179	0,411	0,312	
120	205	0,325	0,287	
150	231	0,264	0,276	
185	262	0,211	0,261	
240	305	0,161	0,249	

Кабель АПвЕгП призначений для передачі і розподілу електричної енергії в стаціонарних установках для мереж на номінальну змінну напругу 3,6 / 6, 6/10, 10 і 8,7 / 15 кВ частотою 50 Гц. Кабелі призначені для прокладання в приміщеннях, тунелях, каналах, шахтах, землі (траншеях) з високою корозійною активністю ґрунту.

Таблиця 5. Електричні алюмінієві кабелі АНРБ на напругу 0,66 кВ

Перетин жили, q , мм ²	Тривалий максимально припустимий струм, А	Активний опір, r_0 , Ом/км	Індуктивний опір, x_0 , Ом/км	Зовнішній вигляд
2,5	27	15,9	0,108	
4	34	9,5	0,101	
6	40	6,55	0,095	
10	63	3,95	0,092	
16	82	2,45	0,087	
25	104	1,54	0,085	
35	126	1,11	0,082	
50	160	0,822	0,078	
70	190	0,568	0,076	
95	225	0,411	0,075	
120	260	0,325	0,073	
150	300	0,264	0,073	

Кабель АНРБ прокладається в земляних траншеях за умови, якщо в процесі роботи він не буде схильний до зусиль розтягування, інше – рівень корозійної активності, наявність або відсутність блукаючих струмів і різниця рівнів – не має значення.

Активні опори кабелів, Ом:

– першого

$$R_{к1} = l_1 r_{01};$$

– другого

$$R_{к2} = l_2 r_{02}.$$

Індуктивні опори кабелів, Ом:

– першого

$$X_{к1} = 2\pi f l_1 l_{01} \cdot 10^{-3};$$

– другого

$$X_{к2} = l_2 x_{02}.$$

Реактивна потужність споживача C , кВАР:

$$Q_c = \frac{P_c}{\cos \varphi_c \eta_c} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_c}.$$

Активна потужність навантаження ТП2, кВт:

$$P_{\text{ТП2}} = P_c + \left(S_{\text{ТП2}} - \frac{P_c}{\cos \varphi_c \eta_c} \right) \cos \varphi_H.$$

Потужність навантаження першої кабельної лінії:

– активна, кВт,

$$P_{\text{к1}} = P_{\text{ТП2}} + P_{\text{х2}} + P_{\text{к2}};$$

– реактивна, кВАР,

$$Q_{\text{к1}} = \sqrt{S_{\text{ТП2}}^2 - P_{\text{к1}}^2}.$$

Подовжня складова втрати напруги у ЛЕП, кВ:

– першого кабелю

$$\Delta u_{\text{к1}} = \frac{P_{\text{к1}} R_{\text{к1}} + Q_{\text{к1}} X_{\text{к1}}}{U_{\text{в2}} \cdot 10^3};$$

– другого кабелю

$$\Delta u_{\text{к2}} = \frac{\frac{P_c}{\eta_c} R_{\text{к2}} + Q_c X_{\text{к2}}}{U_{\text{н2}} \cdot 10^3}.$$

Поперечна складова втрати напруги у ЛЕП, кВ:

– першого кабелю

$$\delta u_{\text{к1}} = \frac{P_{\text{к1}} X_{\text{к1}} - Q_{\text{к1}} R_{\text{к1}}}{U_{\text{в2}} \cdot 10^3};$$

– другого кабелю

$$\delta u_{k2} = \frac{\frac{P_c}{\eta_c} X_{k2} - Q_c R_{k2}}{U_{H2} \cdot 10^3}.$$

Втрата напруги у ЛЕП, %:

– першого кабелю

$$\Delta U_{k1\%} = \frac{100}{U_{B2}} \sqrt{\Delta u_{k1}^2 + \delta u_{k1}^2};$$

– другого кабелю

$$\Delta U_{k2\%} = \frac{100}{U_{H2}} \sqrt{\Delta u_{k2}^2 + \delta u_{k2}^2}.$$

Втрати напруги першого кабелю не повинні перевищувати максимальну величину регулювання напруги трансформатора, який встановлено на ТП2. Значення $\Delta U_{k2\%}$ повинно бути менше 5 % [2]. Якщо вимоги не виконуються, тоді слід збільшити перетин відповідного кабелю.

2.3. Розрахунок параметрів заступної схеми

Розрахунок виконується у наступному порядку:

- складається заступна схема;
- розраховуються параметри елементів заступної схеми.

Схема електропостачання (рис. 1) має у своєму складі трансформатори та кабельні лінії, заступні схеми яких наведені на рис. 2. Трансформатор відображається за допомогою Г-подібної заступної схеми [3]. Кабельна лінія замінюється спрощеною схемою, яка враховує лише подовжні активний та індуктивний опори. Для коротких кабелів великого перетину припустиме знехтування індуктивним опором.

Наведені на рис. 2 схеми з'єднуються послідовно відповідно до схеми системи електропостачання (рис. 1), у результаті отримується загальна заступна схема (рис. 3).

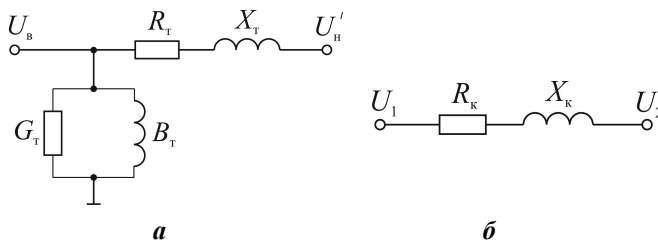


Рис. 2. Схеми заміщення трансформатора (а) і кабельної лінії (б)

Всі параметри заступної схеми (рис. 3) необхідно звести до одного рівня напруги, звичайно за базову напругу приймається найбільша напруга у системі електропостачання. У даному випадку це напруга 110 кВ.

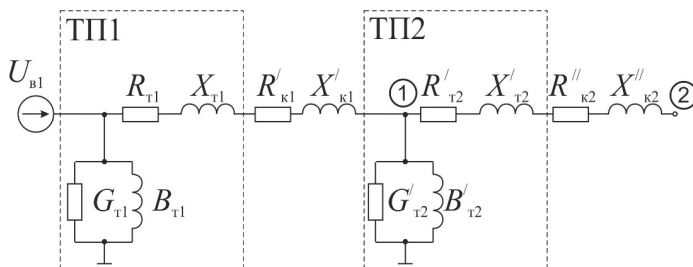


Рис. 3. Загальна заступна схема системи електропостачання

Параметри схеми заміщення двохобмоткового трансформатора, які зведені до обмотки високої напруги:

– активний опір подовжньої гілки, Ом:

$$R_{Ti} = \frac{P_{Ki} U_{Bi}^2}{S_{Ti}^2 n_{Ti}} \cdot 10^3;$$

– повний опір подовжньої гілки, Ом:

$$Z_{Ti} = \frac{u_{Ki}}{100} \cdot \frac{U_{Bi}^2}{S_{Ti} n_{Ti}} \cdot 10^3;$$

– реактивний опір подовжньої гілки, Ом:

$$X_{Ti} = \sqrt{Z_{Ti}^2 - R_{Ti}^2};$$

– активна провідність поперечної гілки, См:

$$G_{Ti} = \frac{n_{Ti} P_{Xi}}{U_{Bi}^2} \cdot 10^{-3};$$

– реактивна провідність поперечної гілки, См:

$$B_{Ti} = \frac{i_{Xi}}{100} \cdot \frac{n_{Ti} S_{Ti}}{U_{Bi}^2} \cdot 10^{-3}.$$

Коефіцієнт трансформації

$$k_{Ti} = \frac{U_{Bi}}{U_{Hi}}.$$

Зведені опори та провідності розраховуються з урахуванням коефіцієнтів трансформації:

– для першого кабелю, Ом: $Z'_{k1} = Z_{k1} \cdot k_{T1}^2$;

– для другої підстанції:

– повний, Ом: $Z'_{T2} = Z_{T2} \cdot k_{T1}^2$;

– активна, См: $G'_{T2} = G_{T2} / k_{T1}^2$;

– реактивна, См: $B'_{T2} = B_{T2} / k_{T1}^2$;

– для другого кабелю, Ом: $Z''_{k2} = Z_{k2} \cdot (k_{T1} \cdot k_{T2})^2$.

2.4. Розрахунок струмів короткого замикання

Для вибору елементів захисту необхідно розрахувати параметри режиму короткого замикання [5]. Основними величинами цього режиму являються значення сталого та ударного струму короткого замикання.

Визначення струмів короткого замикання потребує складання схеми заміщення та зведення всіх її елементів до одного рівня напруги. Заступна схема для режиму короткого замикання (рис. 4) відрізняється від повної (рис. 3) відсутністю поперечних гілок.

Для визначення необхідних параметрів, які застосовуються при виборі пристроїв захисту, необхідно розрахувати струми при коротких замиканнях наприкінці кожної кабельної ділянки.

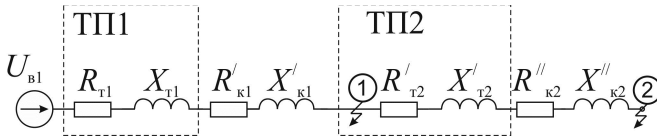


Рис. 4. Заступна схема системи електропостачання для режиму короткого замикання

Згідно з рис. 4, еквівалентні активні опори короткого замикання, Ом:

– для першої точки

$$R_{\text{екв1}} = R_{T1} + R'_{K1};$$

– для другої точки

$$R_{\text{екв2}} = R_{\text{екв1}} + R'_{T2} + R''_{K2}.$$

Згідно з рис. 4, еквівалентні реактивні опори короткого замикання, Ом:

– для першої точки

$$X_{\text{екв1}} = X_{\text{т1}} + X'_{\text{к1}};$$

– для другої точки

$$X_{\text{екв2}} = X_{\text{екв1}} + X'_{\text{т2}} + X''_{\text{к2}}.$$

Повні опори короткого замикання, Ом:

– для першої точки

$$Z_{\text{екв1}} = \sqrt{R_{\text{екв1}}^2 + X_{\text{екв1}}^2};$$

– для другої точки

$$Z_{\text{екв2}} = \sqrt{R_{\text{екв2}}^2 + X_{\text{екв2}}^2}.$$

Зведена періодична складова струму короткого замикання, А:

– для першої точки

$$I'_{\text{п1}} = \frac{U_{\text{в1}} \cdot 10^3}{Z_{\text{екв1}}};$$

– для другої точки

$$I''_{\text{п2}} = \frac{U_{\text{в1}} \cdot 10^3}{Z_{\text{екв2}}}.$$

Періодична складова струму короткого замикання, А:

– для першої точки

$$I_{\text{п1}} = I'_{\text{п1}} k_{\text{т1}};$$

– для другої точки

$$I_{\text{п2}} = I''_{\text{п2}} k_{\text{т1}} k_{\text{т2}}.$$

Стала часу аперіодичної складової для i -тої точки короткого замикання, с:

$$T_{ai} = \frac{X_{\text{екв.}i}}{2\pi f R_{\text{екв}i}}.$$

Зведений ударний струм короткого замикання, А:
– для першої точки

$$i'_{\text{уд1}} = \sqrt{2} I'_{\text{п1}} \left(1 + e^{-0.01/T_{a1}} \right);$$

– для другої точки

$$i''_{\text{уд2}} = \sqrt{2} I''_{\text{п2}} \left(1 + e^{-0.01/T_{a2}} \right).$$

Ударний струм короткого замикання, А:
– для першої точки

$$i_{\text{уд1}} = i'_{\text{уд1}} k_{\text{т1}};$$

– для другої точки

$$i_{\text{уд2}} = i''_{\text{уд2}} k_{\text{т1}} k_{\text{т2}}.$$

Всі результати розрахунку режиму короткого замикання зводяться у вигляді таблиці (табл. 6).

Таблиця 6. Результати розрахунку режиму короткого замикання

Точка короткого замикання	Періодична складова $I_{\text{п}},$ А	Ударний струм $i_{\text{уд}},$ А	Стала часу $T_{\text{а}},$ с
1			
2			

2.5. Побудова схеми захисту

Схеми максимально-струмового захисту (МСЗ) можна поділити на схеми з незалежною (рис. 5) та залежною (рис. 6) характеристиками [8].

У перших (рис. 5) застосовуються окремо струмові *РС* та часові *РЧ* реле, які працюють незалежно одне від другого. Схеми таких МСЗ, наприклад, будуються на основі реле типу РТ-40 або РТ-140 та РВ-100 або РВ-200. Розчіплювач *Р* завжди встановлюється до трансформаторів струму *ТС*. Коло котушки розчіплювача *КР* може комутуватися безпосередньо реле часу *РЧ* або через додаткові проміжні реле. У схемі можуть застосовуватися сигнальні реле *СР* для інформування щодо спрацювання захисту. Таки схеми можна побудувати на постійному або змінному оперативному струмі, джерело якого показане на схемі у вигляді *ДОС*.

У других (рис. 6) застосовуються реле, які поєднують функції струмових та часових реле. Схеми МСЗ з залежною характеристикою реалізуються, наприклад, на базі реле типу РТ-80 або РТ-90.

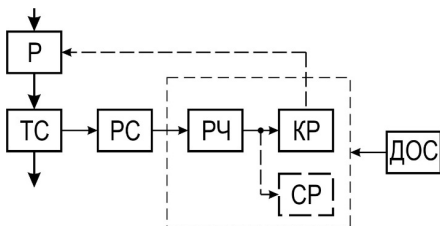


Рис. 5. Функціональна схема МСЗ з незалежною характеристикою

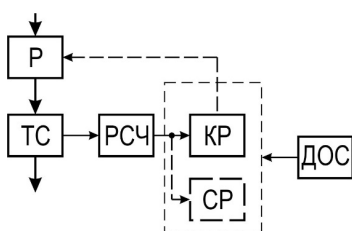


Рис. 6. Функціональна схема МСЗ з залежною характеристикою

Схема МСЗ з залежною характеристикою дещо простіша завдяки застосуванню реле *РСЧ*, що поєднує *РС* та *РЧ*.

Приклад принципової схеми МСЗ наведено на рис. 7, захист має незалежну характеристику, спрацьовує при всіх видах міжфазного короткого замикання та при одно- або двофазних пробоях на землю. В якості реле струму використовуються три реле $KA1 \dots KA3$, які реалізують у роботі захисту логічний принцип "АБО", тобто для отримання живлення реле часу KT достатньо, щоб замкнувся лише один із контактів $KA1.1$, $KA2.1$ або $KA3.1$. Для підсилення комутуючої здатності застосовується проміжне реле KL . Кінцевий вимикач SQ встановлено для попередження перегріву котушки розчіплювача YAT . Вказівне реле KH забезпечує сигналізацію спрацювання захисту.

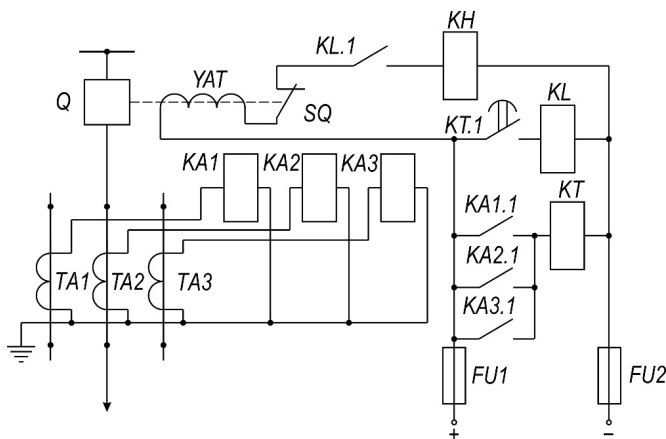


Рис. 7. Принципова схема трифазного трирелейного МСЗ з незалежною характеристикою

Взагалі вибір схеми МСЗ визначається областю застосування захисту, наявними джерелами оперативного струму, елементною базою та вимогами щодо його параметрів і спектру аварійних ситуацій, на які повинен реагувати захист.

2.6. Вибір апаратів захисту

Максимальні струмові захисти – це струмові захисти максимального типу, селективність дії яких забезпечується вибором різних уставок часу та струму спрацьовування відповідних реле.

Як правило, МСЗ використовуються в електричних мережах з однобічним живленням. Вони встановлюються на початку кожного контрольованого об'єкта з боку джерела живлення.

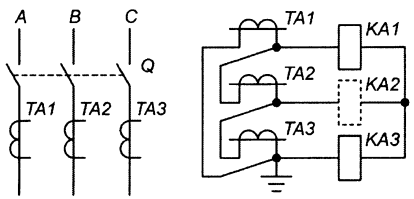
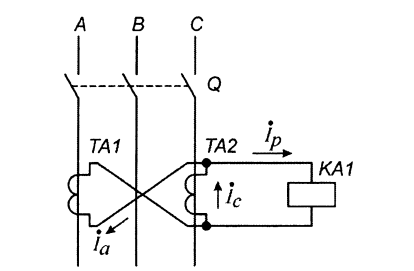
У даній ЛЕП розглядаються захисти, що встановлюються зі сторони нижчої напруги на трансформаторних підстанціях.

Спочатку слід за необхідності за схемою трансформаторів струму визначити коефіцієнт схеми (табл. 7).

Таблиця 7. Схеми включення трансформаторів струму

№	Схема включення трансформаторів струму	Коефіцієнт схеми при трифазному к.з., $k_{сх}$
1	Повна зірка	1
2	Неповна зірка	1

Продовж. табл. 7

№	Схема включення трансформаторів струму	Коефіцієнт схеми при трифазному к.з., $k_{сх}$
3	 Трикутник-зірка	$\sqrt{3}$
4	 Однорелейна схема у неповний трикутник	$\sqrt{3}$

В основному схемі МСЗ реалізуються за допомогою струмових реле та реле часу, основні типи з яких наведено нижче.

Реле струму типу **РТ-40** або реле **РТ-140** (більш сучасний варіант). Вторинне реле електромагнітного принципу непрямої дії без витримки часу, яке застосовується у схемах з незалежною характеристикою.

Реле РТ-40 (рис. 8,а) і РТ-140 (рис. 8,б) мають один нормально замкнений контакт та один розімкнений контакт (рис. 8,в).

Коефіцієнт повернення не менше 0,8. Час спрацьовування не більш 0,1 с при струмі, рівному 1,2 струму спрацьовування, і не більш 0,03 с при струмі, рівному трикратному стру-

му спрацьовування. Інші параметри реле РТ-40 та РТ-140 наведені у табл. 8.

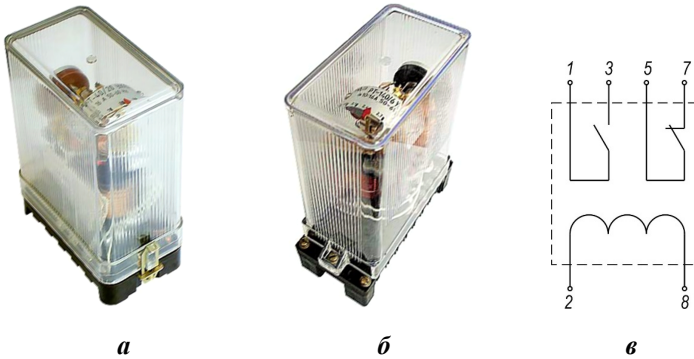


Рис. 8. Реле струму РТ-40 (а), РТ-140 (б) та схема контактів (в)

Таблиця 8. Параметри реле струму РТ-40 та РТ-140

Тип реле	Струм спрацьовування при з'єднанні котушок $I_{уст}, A$		Номінальний струм при з'єднанні котушок, А		Потужність споживання при струмі мінімальної уставки, не більше, ВА
	послідовно	паралельно	послідовно	паралельно	
РТ-40/0,2	0,05...0,1	0,1...0,2	0,4	1,0	0,2
РТ-40/0,6	0,15...0,3	0,3...0,6	1,6	2,5	0,2
РТ-40/2	0,5...1,0	1,0...2,0	2,5	6,3	0,2
РТ-40/6	1,5...3,0	3,0...6,0	10	16	0,5
РТ-40/10	2,5 ...5,0	5,0...10,0	16	16	0,5
РТ-40/20	5,0...10,0	10,0...20,0	16	16	0,5
РТ-40/50	12,5...25,0	25,0...50,0	16	16	0,8
РТ-40/100	25,0...50,0	50,0...100,0	16	16	1,8
РТ-40/200	50,0...100,0	100,0...200,0	16	16	8
РТ-140/0,2	0,05...0,1	0,1...0,2	0,4	1,0	0,2
РТ-140/0,6	0,15...0,3	0,3...0,6	1,6	2,5	0,2
РТ-140/2	0,5...1,0	1,0...2,0	2,5	6,3	0,2

Продовж. табл. 8

Тип реле	Струм спрацьовування при з'єднанні котушок $I_{уст}, A$		Номінальний струм при з'єднанні котушок, A		Потужність споживання при струмі мінімальної уставки, не більше, BA
	послі-довно	пара-лельно	послі-довно	пара-лельно	
РТ-140/6	1,5...3,0	3,0...6,0	10	16	0,5
РТ-140/10	2,5...5,0	5,0...10,0	16	16	0,5
РТ-140/20	5,0...10,0	10,0...20,0	16	16	0,5
РТ-14050	12,5...25,0	25,0...50,0	16	16	0,8
РТ-140100	25,0...50,0	50,0...100,0	16	16	1,8
РТ-140/200	50,0...100,0	100,0...200,0	16	16	8

Реле струму типу **РТ-80** (рис. 9,*а*) складається з двох елементів: індукційного елемента, що спрацьовує з витримкою часу, яка залежить від струму уставки, та електромагнітного розчіплювача миттєвої дії, що спрацьовує при струмах короткого замикання.

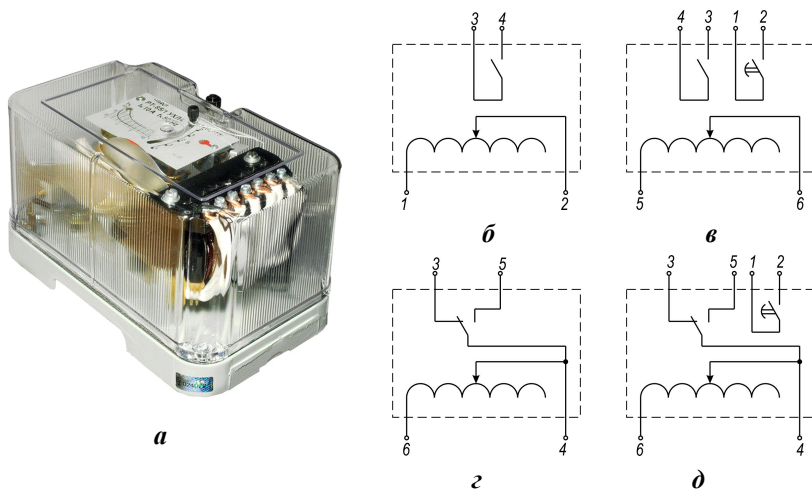


Рис. 9. Реле типу РТ-85 (*а*) і схеми з'єднань: РТ-81, РТ-82, РТ-91 (*б*); РТ-83, РТ-84 (*в*); РТ-85, РТ-95 (*з*) та РТ-86 (*д*)

Реле максимального струму серії **РТ-90** виконані на базі реле типу РТ-80 і застосовуються для захисту електричних установок при перевантаженні та короткому замиканні. Реле серії РТ-90 відрізняються характеристикою залежності витримки часу від струму.

Нормована характеристика залежності витримки часу від струму для, с:

– РТ-80

$$t = \frac{1}{20 \cdot \left(\frac{I/I_{уст} - 1}{6} \right)^{1,8}} + t_{уст};$$

– РТ-90

$$t = \frac{1}{30 \cdot (I/I_{уст} - 1)^3} + t_{уст}.$$

Схеми контактів наведено на рис. 9. Реле у відповідності до типу можуть мати нормально розімкнений, посилений шунтовий та сигнальний контакти.

Параметри реле струму серій РТ-80 та РТ-90 наведені у табл. 9. Коефіцієнт повернення реле не менше 0,8.

Таблиця 9. Параметри реле струму РТ-80 та РТ-90

Тип реле	Номінальний струм, А	Уставки		
		на струм спрацювання індукційного елемента $I_{уст}$, А	на час спрацювання $t_{уст}$, с*	на кратність струму спрацювання елемента відсічки k_v^{**}
РТ 81/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	0,5...4	2...8
РТ 81/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8
РТ 82/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	2...16	2...8

Продовж. табл. 9

Тип реле	Номинальний струм, А	Уставки		
		на струм спрацьовування індукційного елемента $I_{уст}$, А	на час спрацьовування $t_{уст}$, с*	на кратність струму спрацьовування елемента відсічки k_v **
РТ 82/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	2...16	2...8
РТ 83/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	1...4	2...8
РТ 83/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	1...4	2...8
РТ 84/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	4...16	2...8
РТ 84/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	4...16	2...8
РТ 85/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	0,5...4	2...8
РТ 85/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8
РТ 86/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	4...16	2...8
РТ 86/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	4...16	2...8
РТ 91/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	0,5...4	2...8
РТ 91/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8
РТ 95/1	10	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	0,5...4	2...8
РТ 95/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8

* При десятикратному струмі спрацьовування індукційного елемента.

** Тобто відношення струму спрацьовування відсічки до струму спрацьовування індукційного елемента.

Реле типу РТ-81 призначені для захисту у розподільчих мережах напругою 6...35 кВ. Реле типів РТ-82, РТ-84 і РТ-86 використовуються для захисту електродвигунів від міжфазних та міжвиткових коротких замикань та перевантажень. Реле типу РТ-83 застосовуються для захисту ліній електропостачання та трансформаторів. Реле типів РТ-85 і РТ-86 призначені для побудови схем захисту на оперативному змінному струмі. Реле типів РТ-91 і РТ-95 застосовуються у схемах захисту електродвигунів великої потужності зі складними умовами пуску.

Реле часу типів **РВ-100** та **РВ-200** застосовуються для отримання витримки часу у МСЗ з незалежною характеристикою.

Реле типу РВ-100 (рис. 10,*а*) призначені для роботи на постійному оперативному струмі, РВ-200 – на змінному оперативному струмі.

Паспортні дані реле часу наведені у табл. 10, а схеми з'єднань контактів – на рис. 7.

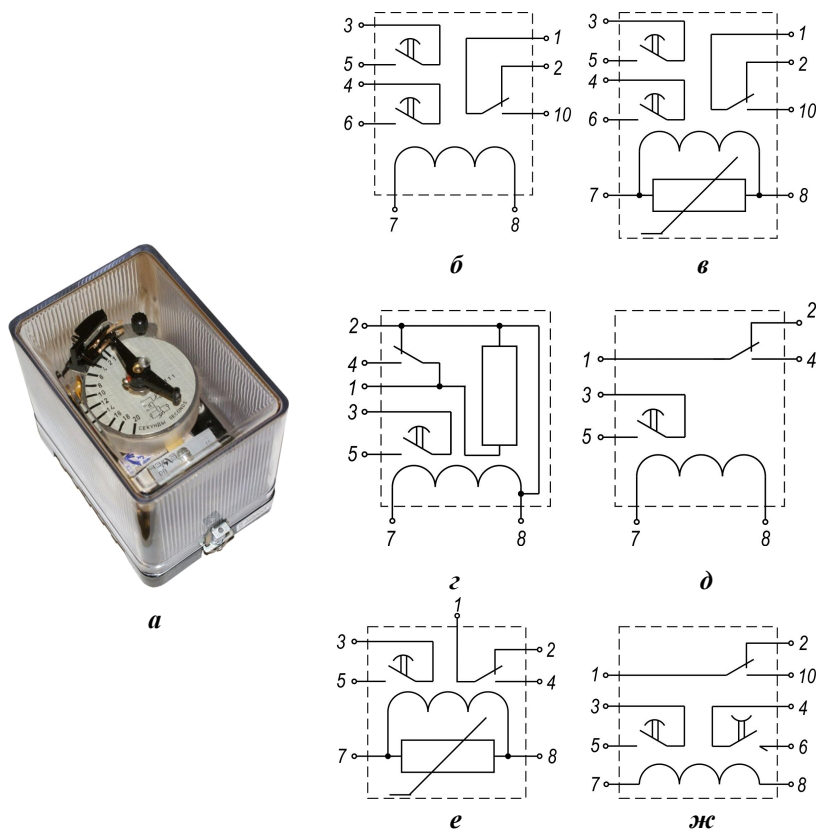


Рис. 10. Реле РВ-144 (*а*) і схеми з'єднань:
РВ-112, РВ-128, РВ-132, РВ-142 на 24 В або 48 В (*б*); РВ-112, РВ-128, РВ-132, РВ-142 на 110 В або 220 В (*в*); РВ-113, РВ-127, РВ-133, РВ-143 (*з*); РВ-114, РВ-124, РВ-134, РВ-144 на 24 В або 48 В (*д*); РВ-114, РВ-124, РВ-134, РВ-144 на 110 В або 220 В (*е*); РВ-215, РВ-225, РВ-235, РВ-245 (*жс*)

28 Таблиця 10. Параметри реле часу типів РВ-100 та РВ-200

Тип реле	Межі уставок часу, с	Термічна стійкість	Кількість контактів	Потужність споживання при номінальній напрузі, не більше	Номінальна напруга, В
РВ-112	0,1...1,3	110 % номінальної напруги 2 хв	Два контакти (на замикання та ковзний), які спрацьовують з витримкою часу, і один перемикаючий контакт миттєвої дії	30 Вт	24, 48, 110 або 220
РВ-128	0,25...3,5				
РВ-132	0,5...9				
РВ-142	1...20				
РВ-113	0,1...1,3	110 % номінальної напруги тривало	Один контакт (на замикання), який спрацьовує з витримкою часу, і один перемикаючий контакт миттєвої дії, контакт розмикання котрого використовується у колі живлення реле	30 Вт при зашунтованому и 15 Вт при дешунтованому датковому опорі	24, 48, 110 або 220
РВ-127	0,25...3,5				
РВ-133	0,5...9				
РВ-143	1...20				
РВ-114	0,1...1,3	110 % номінальної напруги 2 хв	Один контакт (на замикання), який спрацьовує з витримкою часу, і один перемикаючий контакт миттєвої дії	30 Вт	24, 48, 110 або 220
РВ-124	0,25...3,5				
РВ-134	0,5...9				
РВ-144	1...20				
РВ-215	0,1...1,3	110 % номінальної напруги тривало	Два контакти (на замикання та ковзний), які спрацьовують з витримкою часу при відпаданні якорю, і один перемикаючий контакт миттєвої дії	20 ВА при утягненому якорі	100, 127, 220, 380 або 110
РВ-225	0,25...3,5				
РВ-235	0,5...9				
РВ-245	1...20				

За принципом дії реле часу це електромагнітні реле миттєвої дії з часовим механізмом. Ковзні контакти спроможні комутувати задану потужність тільки на замикання. Для розмикання під навантаженням ковзних контактів потрібно застосовувати додаткові проміжні реле.

Існують електронні реле часу РВ-01, які являються аналогами реле РВ-100 та РВ-200 і реалізуються за рахунок витримки часу заряду конденсатора. Також існують електронні реле часу, які реалізують принцип підрахунку імпульсів – ВЛ-23, і електромеханічні реле часу типу РВМ-12 або РВМ-13, в основі яких використовується синхронний мікродвигун.

Також існують інші види реле, які застосовуються у МСЗ, їх параметри можна знайти у відповідних довідниках, але наведених типів найбільш застосовуваних реле достатньо для побудови МСЗ кабельних ліній.

При обранні апаратів захисту необхідно знати пускові струми навантажень. Робочий струм споживача, А,

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_{H2}\cos\varphi_c\eta_c}.$$

Робочий струм споживача у пусковому режимі, А:

$$I_{c, \text{пуск}} = I_c \cdot k_{\text{пуск}}.$$

Первинний струм трансформатора струму, А:

– для першої точки

$$I_{1\text{тс1}} = \frac{S_{\text{т2}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н1}}};$$

– для другої точки

$$I_{1\text{тс2}} = \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н2}}}.$$

Трансформатори струму обираються у відповідності з напругою та первинним струмом, щоб виконувалася умова

$$I_{1\text{тсi}} \leq I_{1\text{тсiн}}.$$

Для ланки з напругою 6 кВ обирається трансформатор струму ТВЛМ-6 (рис. 11,*а*) з номінальними значеннями первинного струму $I_{1\text{тсiн}}$: 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 А.

Для ланки з напругою 0,4 кВ обирається трансформатор струму ТНШЛ-0,66 (рис. 11,*б*) з номінальними значеннями первинного струму $I_{1\text{тсiн}}$: 150, 200, 300, 400, 600, 500, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 8000, 10000 А або ТНШ-0,66 (рис. 11,*в*) з номінальними значеннями первинного струму $I_{1\text{тсiн}}$: 15000, 25000 А.

Для всіх трансформаторів струму вторинний номінальний струм $I_{2\text{тсiн}}$ приймається 5 А.

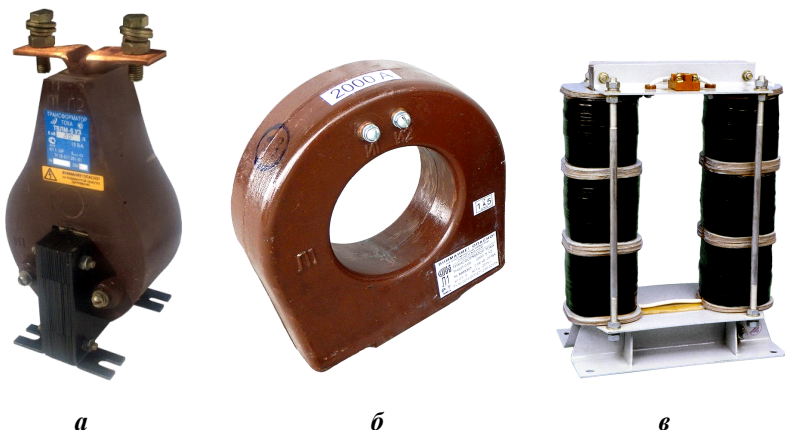


Рис. 11. Трансформатори струму ТВЛМ-6 50/5 (*а*), ТНШЛ-0,66 2000/5 (*б*) та ТНШ-0,66 15000/5 (*в*)

Коефіцієнт трансформації трансформатора струму:

– для першої точки

$$k_{\text{т.тс1}} = I_{1\text{тс1н}} / I_{2\text{тс1н}};$$

– для другої точки

$$k_{\text{т.тс2}} = I_{1\text{тс2н}} / I_{2\text{тс2н}}.$$

Вторинний струм трансформатора струму, А:

– для першої точки

$$I_{2\text{тс1}} = \frac{I_{1\text{тс1}} k_{\text{сх1}}}{k_{\text{т.тс1}}};$$

– для другої точки

$$I_{2\text{тс2}} = \frac{I_{1\text{тс2}} k_{\text{сх2}}}{k_{\text{т.тс2}}}.$$

Максимальний нормальний вторинний струм трансформатора струму, А:

– для першої точки

$$I_{2\text{тс1max}} = 1,4 I_{2\text{тс1}};$$

– для другої точки

$$I_{2\text{тс2max}} = \frac{I_{\text{с.пуск}} k_{\text{сх2}}}{k_{\text{т.тс2}}}.$$

Вторинний струм спрацьовування МСЗ, А:

– для першої точки

$$I_{2\text{сп1}} = \frac{k_{\text{н1}} \cdot k_{\text{с1}}}{k_{\text{п1}}} I_{2\text{тс1max}};$$

– для другої точки

$$I_{2сп2} = \frac{k_{н2} \cdot k_{с2}}{k_{п2}} I_{2тс2\max},$$

де k_{hi} – коефіцієнт надійності (запасу), приймається 1,2... 1,4;
 k_{ci} – коефіцієнт самозапуску, приймається 1,5...2; k_{pi} – коефіцієнт повернення, приймається за каталожними даними для прийнятого типу реле.

Отримане значення $I_{2спi}$ повинне бути узгоджене зі струмом уставки першого ступеня релейного захисту $I_{устi}$, за умови, що $I_{2спi} \leq I_{устi}$.

Первинний струм спрацьовування МСЗ, А:

– для першої точки

$$I_{1сп1} = \frac{k_{т.тс1}}{k_{сх1}} I_{уст1};$$

– для другої точки

$$I_{1сп2} = \frac{k_{т.тс2}}{k_{сх2}} I_{уст2}.$$

Чутливість захисту:

– першого:

– для першої точки

$$k_{ч1.1} = \frac{I_{п1}}{I_{1сп1}} \geq 1,5;$$

– для другої точки

$$k_{ч1.2} = \frac{I_{п2}}{k_{т2} I_{1сп1}} \geq 1,2;$$

– другого

$$k_{\text{ч2}} = \frac{I_{\text{п2}}}{I_{\text{лп2}}} \geq 1,5.$$

Якщо вимога за чутливістю не дотримується, необхідно збільшити напругу лінії або перетин кабелів.

Вибір уставок часу виконується на підставі забезпечення селективності захисту та максимальної швидкості. Для досягнення виконання другої умови уставку часу захисту для споживача С необхідно прийняти мінімальною, а для отримання селективності першого захисту його уставка, с,

$$t_{\text{уст1}} = t_{\text{уст2}} + \Delta t_{\text{min}},$$

де Δt_{min} – мінімальний крок уставок за часом для релейного захисту.

Для реле типів РВ-100 і РВ-200 Δt_{min} дорівнює 0,5 с, для реле типів РТ-80 та РТ-90 – 0,6 с.

2.7. Перевірка селективності захисту

Селективність – одна з чотирьох основних вимог до релейного захисту. Вона полягає в тому, що при виникненні короткого замикання повинна відключатися тільки пошкоджена ділянка, а інша частина схеми – продовжувати працювати.

Селективність реалізується за рахунок уставок реле та характеристик залежності часу від струму спрацьовування.

Будується залежність часу спрацьовування захисту від струму спрацьовування для всіх захистів у одних координатних осях (рис. 12). Отримані залежності не повинні перетинатися.

Уставки спрацьовування струмової відсічки для реле, А:
– першої точки

$$I_{1\text{сп.В1}} = I_{\text{уст1}} k_{\text{В1}} k_{\text{Т.Тс1}} / k_{\text{сх1}} ;$$

– другої точки

$$I_{1\text{сп.В2}} = I_{\text{уст2}} k_{\text{В2}} k_{\text{Т.Тс2}} / k_{\text{сх2}} ,$$

де $k_{\text{В1}}$ і $k_{\text{В2}}$ – коефіцієнти кратності струму спрацьовування елемента відсічки відповідно для першої та другої точок короткого замикання.

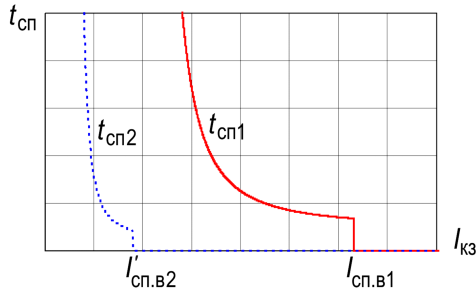


Рис. 12. Карта селективності

Якщо отримані характеристики (рис. 12) не перетинаються, тоді захист побудовано правильно, інакше необхідно змінити тип реле (залежну характеристику) або уставки.

3. Приклад розрахунку

3.1. Вихідні дані

Виконати розрахунок захисту кабельних ліній у відповідності до завдання (див. 1) за індивідуальними значеннями:

- довжина ЛЕП $l_1 = 6$ км;
- довжина ЛЕП $l_2 = 0,2$ км;
- потужність навантаження ТП1 $S_{\text{ТП1}} = 4500$ кВА;
- потужність навантаження ТП2 $S_{\text{ТП2}} = 500$ кВА;
- потужність споживача $P_{\text{с}} = 90$ кВт.

3.2. Вибір трансформаторів

Для першої трансформаторної підстанції обираються два трансформатори типу ТМН-2500/110 з параметрами:

Тип трансформатора	Напруга u_k , %	Втрати, кВт		Струм х.х. i_x , %
		P_x	P_k	
ТМН-2500/110	11,5	3,9	22,0	0,6

Для другої трансформаторної підстанції обирається один трансформатор типу ТСЗЛ-630 з параметрами:

Потужність, $S_{ном}$ кВА	Втрати, кВт		Струм х.х. i_x , %	Напруга u_k , %
	P_x	P_k		
630	1,4	6,7	0,8	6

3.3. Вибір кабелів

Тривалий робочий струм:

– першого кабелю

$$I_{k1} = \frac{S_{T2}}{\sqrt{3}U_{H2}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6} = 60,6 \text{ А};$$

– другого кабелю

$$I_{k2} = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_{H2} \cos \varphi_c \eta_c} = \frac{90}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,88} = 174 \text{ А}.$$

За отриманим значенням I_{k1} обирається перший трифазний кабель АПВБГП з перетином 70 мм², активним опором 0,568 Ом/км та індуктивністю 0,331 мГн/км; другий трифазний кабель – АНРБ перетином 150 мм², активним опором 0,264 Ом/км та індуктивним опором 0,073 Ом/км.

Активні опори кабелів:

– першого

$$R_{к1} = l_1 r_{01} = 6 \cdot 0,568 = 3,41 \text{ Ом};$$

– другого

$$R_{к2} = l_2 r_{02} = 0,2 \cdot 0,264 = 0,053 \text{ Ом}.$$

Індуктивні опори кабелів:

– першого

$$X_{к1} = 2\pi f l_1 l_{01} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 0,331 \cdot 10^{-3} = 0,624 \text{ Ом};$$

– другого

$$X_{к2} = l_2 x_{02} = 0,2 \cdot 0,073 = 0,013 \text{ Ом}.$$

Реактивна потужність споживача С

$$Q_c = \frac{P_c}{\cos \varphi_c \eta_c} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_c} = \frac{90}{0,88 \cdot 0,85} \sqrt{1 - 0,85^2} = 63,4 \text{ кВАР}.$$

Активна потужність навантаження ТП2

$$\begin{aligned} P_{\text{ТП2}} &= P_c + \left(S_{\text{ТП2}} - \frac{P_c}{\cos \varphi_c \eta_c} \right) \cos \varphi_H = \\ &= 90 + \left(500 - \frac{90}{0,88 \cdot 0,85} \right) \cdot 0,9 = 432 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Потужність навантаження першої кабельної лінії:

– активна

$$P_{к1} = P_{\text{ТП2}} + P_{x2} + P_{к2} = 432 + 1,4 + 6,7 = 440 \text{ кВт};$$

– реактивна

$$Q_{к1} = \sqrt{S_{\text{ТП2}}^2 - P_{к1}^2} = \sqrt{500^2 - 440^2} = 237 \text{ кВАР}.$$

Подовжня складова втрати напруги у ЛЕП:

– першого кабелю

$$\Delta u_{\kappa 1} = \frac{P_{\kappa 1} R_{\kappa 1} + Q_{\kappa 1} X_{\kappa 1}}{U_{\text{в2}} \cdot 10^3} = \frac{440 \cdot 3,41 + 237 \cdot 0,624}{6 \cdot 10^3} = 0,275 \text{ кВ};$$

– другого кабелю

$$\Delta u_{\kappa 2} = \frac{\frac{P_c}{\eta_c} R_{\kappa 2} + Q_c X_{\kappa 2}}{U_{\text{н2}} \cdot 10^3} = \frac{\frac{90}{0,88} \cdot 0,053 + 63,4 \cdot 0,015}{0,4 \cdot 10^3} = 0,016 \text{ кВ}.$$

Поперечна складова втрати напруги у ЛЕП:

– першого кабелю

$$\delta u_{\kappa 1} = \frac{P_{\kappa 1} X_{\kappa 1} - Q_{\kappa 1} R_{\kappa 1}}{U_{\text{в2}} \cdot 10^3} = \frac{440 \cdot 0,624 - 237 \cdot 3,41}{6 \cdot 10^3} = -0,089 \text{ кВ};$$

– другого кабелю

$$\delta u_{\kappa 2} = \frac{\frac{P_c}{\eta_c} X_{\kappa 2} - Q_c R_{\kappa 2}}{U_{\text{н2}} \cdot 10^3} =$$

$$\frac{\frac{90}{0,88} \cdot 0,015 - 63,4 \cdot 0,053}{0,4 \cdot 10^3} = -4,64 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}.$$

Втрата напруги у ЛЕП:

– першого кабелю

$$\Delta U_{\kappa 1\%} = \frac{100}{U_{\text{в2}}} \sqrt{\Delta u_{\kappa 1}^2 + \delta u_{\kappa 1}^2} = \frac{100}{6} \sqrt{0,275^2 + 0,089^2} = 4,82 \text{ \%}.$$

– другого кабелю

$$\Delta U_{\text{к2}\%} = \frac{100}{U_{\text{н2}}} \sqrt{\Delta u_{\text{к2}}^2 + \delta u_{\text{к2}}^2} = \frac{100}{0,4} \sqrt{0,016^2 + 0,00464^2} = 4,12\%.$$

Втрати напруги у першому та другому кабелях не перевищують 5 %, відповідно вимоги виконуються.

3.4. Розрахунок параметрів заступної схеми

Загальна заступна схема відповідає наведеній на рис. 3.

За базову напругу приймається 110 кВ.

Параметри схеми заміщення двообмоткового трансформатора ТП1, які зведені до обмотки високої напруги:

– активний опір подовжньої гілки

$$R_{\text{т1}} = \frac{P_{\text{к1}} U_{\text{в1}}^2}{S_{\text{т1}}^2 n_{\text{т1}}} \cdot 10^3 = \frac{22 \cdot 115^2 \cdot 10^3}{(2,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 2} = 23,3 \text{ Ом};$$

– повний опір подовжньої гілки

$$Z_{\text{т1}} = \frac{u_{\text{к1}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{в1}}^2}{S_{\text{т1}} n_{\text{т1}}} \cdot 10^3 = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{115^2}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 2} \cdot 10^3 = 304 \text{ Ом};$$

– реактивний опір подовжньої гілки

$$X_{\text{т1}} = \sqrt{Z_{\text{т1}}^2 - R_{\text{т1}}^2} = \sqrt{304^2 - 23,3^2} = 303 \text{ Ом};$$

– активна провідність поперечної гілки

$$G_{\text{т1}} = \frac{n_{\text{т1}} P_{\text{х1}}}{U_{\text{в1}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{2 \cdot 3,9}{115^2} \cdot 10^{-3} = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ См};$$

– реактивна провідність поперечної гілки

$$B_{\text{т1}} = \frac{i_{\text{х1}}}{100} \cdot \frac{n_{\text{т1}} S_{\text{т1}}}{U_{\text{в1}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{115^2} \cdot 10^{-3} = 2,27 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Коефіцієнт трансформації ТП1

$$k_{T1} = \frac{U_{B1}}{U_{H1}} = \frac{115}{6,6} = 17,4.$$

Параметри схеми заміщення двообмоткового трансформатора ТП2, які зведені до обмотки високої напруги:

– активний опір подовжньої гілки

$$R_{T2} = \frac{P_{K2} U_{B2}^2}{S_{T2}^2 n_{T2}} \cdot 10^3 = \frac{6,7 \cdot 6^2 \cdot 10^3}{630^2 \cdot 1} = 0,608 \text{ Ом};$$

– повний опір подовжньої гілки

$$Z_{T2} = \frac{u_{K2}}{100} \cdot \frac{U_{B2}^2}{S_{T2}^2 n_{T2}} \cdot 10^3 = \frac{6}{100} \cdot \frac{6^2}{630^2 \cdot 1} \cdot 10^3 = 3,43 \text{ Ом};$$

– реактивний опір подовжньої гілки

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = \sqrt{3,43^2 - 0,608^2} = 3,38 \text{ Ом};$$

– активна провідність поперечної гілки

$$G_{T2} = \frac{n_{T2} P_{K2}}{U_{B2}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{1 \cdot 1,4}{6^2} \cdot 10^{-3} = 3,89 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

– реактивна провідність поперечної гілки

$$B_{T2} = \frac{i_{x2}}{100} \cdot \frac{n_{T2} S_{T2}}{U_{B2}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{0,8}{100} \cdot \frac{1 \cdot 630}{6^2} \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Коефіцієнт трансформації ТП2

$$k_{T2} = \frac{U_{B2}}{U_{H2}} = \frac{6}{0,4} = 15.$$

Зведені опори та провідності розраховуються з урахуванням коефіцієнтів трансформації:

– для першого кабелю:

– активний

$$R'_{к1} = R_{к1} \cdot k_{т1}^2 = 3,41 \cdot 17,4^2 = 1,03 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

– індуктивний

$$X'_{к1} = X_{к1} \cdot k_{т1}^2 = 0,624 \cdot 17,4^2 = 189 \text{ Ом};$$

– для другої підстанції:

– активний

$$R'_{т2} = R_{т2} \cdot k_{т1}^2 = 0,608 \cdot 17,4^2 = 184 \text{ Ом};$$

– індуктивний

$$X'_{т2} = X_{т2} \cdot k_{т1}^2 = 3,38 \cdot 17,4^2 = 1,023 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

– активна

$$G'_{т2} = G_{т2} / k_{т1}^2 = 3,89 \cdot 10^{-5} / 17,4^2 = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ См};$$

– реактивна

$$B'_{т2} = B_{т2} / k_{т1}^2 = 1,4 \cdot 10^{-4} / 17,4^2 = 4,62 \cdot 10^{-7} \text{ См};$$

– для другого кабелю:

– активний

$$R''_{к2} = R_{к2} \cdot k_{т1}^2 \cdot k_{т2}^2 = 0,053 \cdot 17,4^2 \cdot 15^2 = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

– індуктивний

$$X''_{к2} = X_{к2} \cdot k_{т1}^2 \cdot k_{т2}^2 = 0,015 \cdot 17,4^2 \cdot 15^2 = 995 \text{ Ом}.$$

3.5. Розрахунок струмів короткого замикання

Згідно з рис. 4, еквівалентні активні опори короткого замикання:

– для першої точки

$$R_{екв1} = R_{т1} + R'_{к1} = 23,3 + 1,03 \cdot 10^3 = 1,055 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

– для другої точки

$$\begin{aligned} R_{\text{екв2}} &= R_{\text{екв1}} + R'_{\text{т2}} + R''_{\text{к2}} = \\ &= 1,055 \cdot 10^3 + 184 + 3,6 \cdot 10^3 = 4,835 \cdot 10^3 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Згідно з рис. 4, еквівалентні реактивні опори короткого замикання:

– для першої точки

$$X_{\text{екв1}} = X_{\text{т1}} + X'_{\text{к1}} = 303 + 189 = 492 \text{ Ом;}$$

– для другої точки

$$\begin{aligned} X_{\text{екв2}} &= X_{\text{екв1}} + X'_{\text{т2}} + X''_{\text{к2}} = \\ &= 492 + 1,02 \cdot 10^3 + 995 = 2,51 \cdot 10^3 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Повні опори короткого замикання:

– для першої точки

$$Z_{\text{екв1}} = \sqrt{R_{\text{екв1}}^2 + X_{\text{екв1}}^2} = \sqrt{(1,055 \cdot 10^3)^2 + 492^2} = 1,16 \cdot 10^3 \text{ Ом;}$$

– для другої точки

$$\begin{aligned} Z_{\text{екв2}} &= \sqrt{R_{\text{екв2}}^2 + X_{\text{екв2}}^2} = \\ &= \sqrt{(4,835 \cdot 10^3)^2 + (2,51 \cdot 10^3)^2} = 5,45 \cdot 10^3 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Зведена періодична складова струму короткого замикання:

– для першої точки

$$I'_{\text{п1}} = \frac{U_{\text{в1}} \cdot 10^3}{Z_{\text{екв1}}} = \frac{110 \cdot 10^3}{1,16 \cdot 10^3} = 94,5 \text{ А;}$$

– для другої точки

$$I''_{\text{п2}} = \frac{U_{\text{в1}} \cdot 10^3}{Z_{\text{екв2}}} = \frac{110 \cdot 10^3}{5,45 \cdot 10^3} = 20,2 \text{ А.}$$

Періодична складова струму короткого замикання:

– для першої точки

$$I_{п1} = I'_{п1} k_{т1} = 94,5 \cdot 17,4 = 1,65 \cdot 10^3 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{п2} = I''_{п2} k_{т1} k_{т2} = 20,2 \cdot 17,4 \cdot 15 = 5,27 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Стала часу аперіодичної складової струму короткого замикання:

– для першої точки

$$T_{a1} = \frac{X_{екв1}}{2\pi f R_{екв1}} = \frac{492}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,055 \cdot 10^3} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

– для другої точки

$$T_{a2} = \frac{X_{екв2}}{2\pi f R_{екв2}} = \frac{2,51 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,835 \cdot 10^3} = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Зведений ударний струм короткого замикання:

– для першої точки

$$i'_{уд1} = \sqrt{2} I'_{п1} (1 + e^{-0,01/T_{a1}}) = \sqrt{2} \cdot 94,5 \cdot (1 + e^{-0,01/(1,48 \cdot 10^{-3})}) = 134 \text{ А};$$

– для другої точки

$$\begin{aligned} i''_{уд2} &= \sqrt{2} I''_{п2} (1 + e^{-0,01/T_{a2}}) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 20,2 \cdot (1 + e^{-0,01/(1,65 \cdot 10^{-3})}) = 28,6 \text{ А}. \end{aligned}$$

Ударний струм короткого замикання:

– для першої точки

$$i_{уд1} = i'_{уд1} k_{т1} = 134 \cdot 17,4 = 2,33 \cdot 10^3 \text{ А};$$

– для другої точки

$$i_{уд2} = i''_{уд2} k_{т1} k_{т2} = 28,6 \cdot 17,4 \cdot 15 = 7,46 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Всі результати розрахунку режиму короткого замикання зводяться у вигляді таблиці (табл. 11).

Таблиця 11. Результати розрахунку режиму короткого замикання

Точка короткого замикання	Періодична складова I_n , кА	Ударний струм $i_{уд}$, кА	Стала часу T_a , мс
1	1,64	2,33	1,48
2	5,27	7,46	1,65

3.6. Побудова схеми захисту

Обирається трифазна симетрична схема максимально-струмового захисту на базі реле типу РТ-80 з залежною характеристикою (рис. 13).

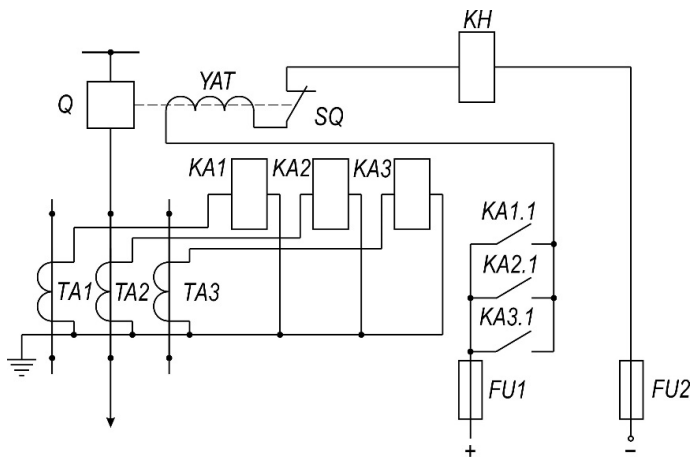


Рис. 13. Принципова схема трифазного МСЗ з залежною характеристикою

У першому захисті в якості $KA1...KA3$ застосовуються реле типу РТ-80, а у другому – РТ-90.

3.7. Вибір апаратів захисту

Відповідно до схеми МСЗ (рис.13) та табл. 7 коефіцієнт схеми $k_{сх}$ дорівнює 1 для обох захистів.

Для першого захисту обирається реле струму типу **РТ-81/2** з параметрами:

Тип реле	Номинальний струм, А	Уставки		
		на струм спрацьовування індукційного елемента $I_{уст}, А$	на час спрацьовування $t_{уст}, с$	на кратність струму спрацьовування елемента відсічки k_v
РТ 81/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8

Для другого захисту обирається реле струму типу **РТ-91/2** з параметрами:

Тип реле	Номинальний струм, А	Уставки		
		на струм спрацьовування індукційного елемента $I_{уст}, А$	на час спрацьовування $t_{уст}, с$	на кратність струму спрацьовування елемента відсічки k_v
РТ 91/2	5	2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5	0,5...4	2...8

Робочий струм споживача

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_{н2}\cos\varphi_c\eta_c} = \frac{90}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,88} = 174 \text{ А.}$$

Робочий струм споживача у пусковому режимі

$$I_{с.пуск} = I_c \cdot k_{пуск} = 174 \cdot 3 = 522 \text{ А.}$$

Первинний струм трансформатора струму
– для першої точки

$$I_{1\text{тс1}} = \frac{S_{\text{т2}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н1}}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 55,1 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{1\text{тс2}} = \frac{\sqrt{P_{\text{с}}^2 + Q_{\text{с}}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н2}}} = \frac{\sqrt{90^2 + 63,4^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 159 \text{ А}.$$

Для ланки з напругою 6 кВ обирається трансформатор струму ТВЛМ-6 з номінальним значенням первинного струму $I_{1\text{тс1н}}$ 200 А.

Для ланки з напругою 0,4 кВ обирається трансформатор струму ТНШЛ-0,66 з номінальним значенням первинного струму $I_{1\text{тс2н}}$ 1500 А.

Для всіх трансформаторів струму вторинний номінальний струм $I_{2\text{тсін}}$ приймається 5 А.

Коефіцієнт трансформації трансформатора струму:

– для першої точки

$$k_{\text{т.тс1}} = I_{1\text{тс1н}} / I_{2\text{тс1н}} = 200 / 5 = 40;$$

– для другої точки

$$k_{\text{т.тс2}} = I_{1\text{тс2н}} / I_{2\text{тс2н}} = 1500 / 5 = 300.$$

Вторинний струм трансформатора струму:

– для першої точки

$$I_{2\text{тс1}} = \frac{I_{1\text{тс1}} k_{\text{сх1}}}{k_{\text{т.тс1}}} = \frac{55,1 \cdot 1}{40} = 1,38 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{2\text{тс2}} = \frac{I_{1\text{тс2}} k_{\text{сх2}}}{k_{\text{т.тс2}}} = \frac{159 \cdot 1}{300} = 0,53 \text{ А}.$$

Максимальний нормальний вторинний струм трансформатора струму:

– для першої точки

$$I_{2тс1\max} = 1,4I_{2тс1} = 1,4 \cdot 1,38 = 1,93 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{2тс2\max} = \frac{I_{с.пуск} k_{сх2}}{k_{т.тс2}} = \frac{522 \cdot 1}{300} = 1,74 \text{ А}.$$

Коефіцієнт надійності (запасу) $k_{ні}$ для обох захистів приймається 1,2. Коефіцієнт самозапуску $k_{сі}$ для обох захистів приймається 1,5, а коефіцієнт повернення $k_{пі}$ – 0,8.

Вторинний струм спрацьовування МСЗ:

– для першої точки

$$I_{2сп1} = \frac{k_{н1} \cdot k_{с1}}{k_{п1}} I_{2тс1\max} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot 1,93 = 4,34 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{2сп2} = \frac{k_{н2} \cdot k_{с2}}{k_{п2}} I_{2тс2\max} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot 1,74 = 3,91 \text{ А}.$$

За значеннями $I_{2спi}$ приймаються відповідні уставки першого ступеня релейного захисту $I_{уст1} = 4,5 \text{ А}$ і $I_{уст2} = 4 \text{ А}$.

Первинний струм спрацьовування МСЗ:

– для першої точки

$$I_{1сп1} = \frac{k_{т.тс1}}{k_{сх1}} I_{уст1} = \frac{40}{1} \cdot 4,5 = 180 \text{ А};$$

– для другої точки

$$I_{1сп2} = \frac{k_{т.тс2}}{k_{сх2}} I_{уст2} = \frac{300}{1} \cdot 4 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Чутливість захисту:

– першого:

– для першої точки

$$k_{ч1.1} = \frac{I_{п1}}{I_{1сп1}} = \frac{1,64 \cdot 10^3}{180} = 9,13 \geq 1,5 ;$$

– для другої точки

$$k_{ч1.2} = \frac{I_{п2}}{k_{т2} I_{1сп1}} = \frac{5,27 \cdot 10^3}{15 \cdot 180} = 1,95 \geq 1,2 ;$$

– другого

$$k_{ч2} = \frac{I_{п2}}{I_{1сп2}} = \frac{5,27 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3} = 4,39 \geq 1,5 .$$

Вимога за чутливістю виконується для обох захистів.

Уставка за часом для другого захисту $t_{уст2}$ приймається мінімальною – 0,5 с.

Уставка за часом для першого захисту

$$t_{уст1} = t_{уст2} + \Delta t_{\min} = 0,5 + 0,6 = 1,1 \text{ с},$$

де $\Delta t_{\min} = 0,6$ с – мінімальний крок уставок за часом для реле типів РТ-80 та РТ-90.

3.8. Перевірка селективності захисту

Уставки спрацьовування струмової відсічки для реле:

– першої точки

$$I_{1сп.В1} = I_{уст1} k_{В1} k_{т.тс1} / k_{сх1} = 4,5 \cdot 3 \cdot 40 / 1 = 540 \text{ А};$$

– другої точки

$$I_{1сп.В2} = I_{уст2} k_{В2} k_{т.тс2} / k_{сх2} = 4 \cdot 3 \cdot 300 / 1 = 3600 \text{ А},$$

де $k_{в1}$ і $k_{в2}$ – коефіцієнти кратності струму спрацьовування елемента відсічки відповідно для першої та другої точок короткого замикання приймається 3.

У залежній частині характеристики захисту розраховуються за нормованими для:

– першого захисту

$$t_1(I_{кз}) = \frac{1}{20 \cdot \left(\frac{I_{кз}/I_{1сп1} - 1}{6} \right)^{1,8}} + t_{уст1} ;$$

– другого захисту

$$t_2(I_{кз}) = \frac{1}{30 \cdot (k_{т2} I_{кз} / I_{1сп2} - 1)^3} + t_{уст2} .$$

Будується залежність часу спрацьовування захисту від струму спрацьовування для всіх захистів у одних координатних осях (рис. 14), для цього уставки другого захисту по струму зведені до високої напруги ТП2.

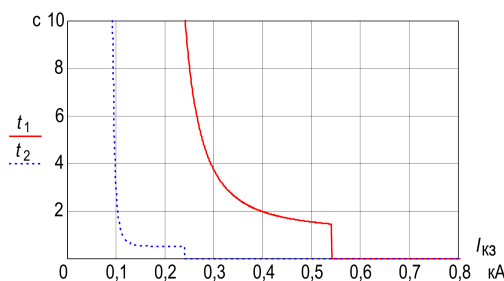


Рис. 14. Карта селективності

Отримані характеристики (рис. 14) не перетинаються, відповідно уставки захисту розраховано вірно.

Питання для самоконтролю

1. Для чого необхідно застосовувати максимально-струмовий захист?
 2. Що таке селективність?
 3. Які уставки необхідно розрахувати для налаштування максимально-струмового захисту?
 4. У чому різниця між максимально-струмовими захистами з незалежною та залежною характеристикою?
 5. Що показує карта селективності?
 6. Які типи реле взагалі застосовуються при побудові схем максимально-струмового захисту?
 7. Де застосовується максимально-струмовий захист?
 8. Для чого застосовується струмова відсічка?
 9. Яку функцію виконують трансформатори струму в схемах максимально-струмового захисту?
 10. Що таке чутливість захисту?
-

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Киреева Е. А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем / Е. А. Киреева, С. А. Цырук. – М. : Издательский центр "Академия", 2010. – 288 с.
 2. Кімстач О. Ю. Індивідуальний комплект навчально-методичних матеріалів до виконання контрольних робіт з курсу "Електрична частина ТЕС і АЕС" : методичні вказівки. – Миколаїв : ІЗДО НУК, 2007. – 45 с.
 3. Князевский Б. А., Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для студентов вузов. – М. : Высш. школа, 1986. – 400 с.
 4. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов. – М. : Мастерство, Высшая школа, 2001. – 320 с.
 5. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з курсу "Основи електроенергетики та електропостачання" / С. Ю. Александровський, С. І. Бандура, О. Ю. Кімстач, С. М. Новогорецький. – Миколаїв: НУК, 2015. – 56 с.
 6. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
 7. Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю., Яшков В. А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М. : Высш. школа, 2001. – 336 с.
 8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / Под ред. А. А. Федорова, Г. В. Сербиновского. – М. : Энергия, 1980. – 420 с.
 9. Шестеренко, В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник / В. Є. Шестеренко. – Вінниця : Нова Книга, 2004. – 656 с.
-

ЗМІСТ

Вступ	3
Розрахунок релейного захисту лінії електропостачання	5
1. Завдання	5
2. Вказівки до виконання розрахунків	6
2.1. Вибір трансформаторів	6
2.2. Вибір кабелів	10
2.3. Розрахунок параметрів заступної схеми	13
2.4. Розрахунок струмів короткого замикання	16
2.5. Побудова схеми захисту	19
2.6. Вибір апаратів захисту	21
2.7. Перевірка селективності захисту	33
3. Приклад розрахунку	34
3.1. Вихідні дані	34
3.2. Вибір трансформаторів	35
3.3. Вибір кабелів	35
3.4. Розрахунок параметрів заступної схеми	38
3.5. Розрахунок струмів короткого замикання	40
3.6. Побудова схеми захисту	43
3.7. Вибір апаратів захисту	44
3.8. Перевірка селективності захисту	47
Питання для самоконтролю	49
Рекомендована література	50

Навчальне видання

КІМСТАЧ Олег Юрійович
НОВОГРЕЦЬКИЙ Сергій Миколайович

**РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни "Основи релейного захисту"

Комп'ютерне складання та верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,2. Тираж 100 прим. Вид. № 42. Зам. № 1006-07.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.