



Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно –
інтегрованих технологій

04-03-188

Методичні вказівки

до курсової роботи з навчальної дисципліни
«Перехідні процеси в електроенергетиці»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за спеціальністю 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано методичною
комісією зі спеціальності
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
Протокол № 7 від 24.06.2019 р.

Рівне – 2019

Методичні вказівки до курсової роботи з навчальної дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання / Кінчур О. Ф. – Рівне : НУВГП, 2019. – 60 с.

Укладач: Кінчур О. Ф., старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно–інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно–інтегрованих технологій.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Кінчур О. Ф., 2019
© НУВГП, 2019



Вступ

Курсова робота є комплексним завданням, що включає питання розрахунку симетричних і несиметричних режимів КЗ. При виконанні повинні бути визначені такі розрахункові величини:

- участь кожної електричної станції і системи в загальному струмі трифазного КЗ в початковий момент часу при трифазному КЗ в заданій точці;
- початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ від кожного джерела і сумарний струм трифазного КЗ;
- значення струму КЗ для часу $t = 0,1$ с і $t = 3$ с;
- залишкова напруга в заданих точках системи;
- ударний струм КЗ;
- значення струму КЗ, що діє, за перший період його зміни і тепловий імпульс;
- потужність КЗ;
- початкове значення струмів окремих послідовностей і повного струму при заданому виді несиметричного КЗ;
- напруга окремих послідовностей в місці КЗ і в довільній точці системи при несиметричному КЗ, а також повна напруга.

Окрім цього, необхідно побудувати векторні діаграми струмів і напруги в місці КЗ і залишкової напруги в заданих точках системи при несиметричному КЗ. Текст завдання до курсової роботи приведений в додатку Б. Об'єм курсової роботи – 25–30 сторінок.

Курсова робота виконується відповідно до вимог до текстових документів [6] і захищається після усунення зауважень, зроблених викладачем при перевірці закінченої роботи. При захисті студент повинен уміти відповісти на питання, приведені в додатку В.

2. ВИХІДНІ ДАНІ

Курсова робота виконуються відповідно до індивідуального завдання, що видається кожному студентові. Бланки завдань приведені в додатку А і додатку Б. Вихідні дані беруться відповідно до шифру, що складається з комбінації буквених і цифрових позначень.

Для курсової роботи, наприклад:

1.3.2.5.K4 (1.1)

Перша цифра (1) означає номер схеми (у нашому випадку перша схема).

Друга цифра (3) позначає варіант в таблиці 2.1 і визначає характеристики ліній електропередачі.

Третя цифра (2) указує стан нейтралей трансформаторів, визначається варіантом таблиці 2.2.

Четверта цифра (5) визначає параметри генераторів, трансформаторів, автотрансформаторів, реакторів, навантажень і системи. Цифра вказує варіант в таблиці 2.3.

Поєднання букви і цифри (K4) вказує номер точки, в якій проводиться розрахунок короткого замикання.

Цифри в дужках вказують вид короткого замикання:

- (1) – однофазне КЗ;
- (2) – двофазне КЗ;
- (1.1) – двофазне КЗ на землю.

Завдання передбачає розрахунок симетричного і несиметричного КЗ в одній точці заданої схеми.

Початкові дані для розрахунків приведені нижче. При розрахунках вважати, що всі генератори забезпечені демпферними обмотками і пристроями АРЗ, схеми заземлення нейтралей в блокових схемах однакові для всіх блоків даної станції.

При визначенні ударного коефіцієнта активний опір системи приймати рівним нулю, а опір навантаження не враховувати. Точки короткого замикання K6, K7, K8, K9 знаходяться посередині відповідних ліній.

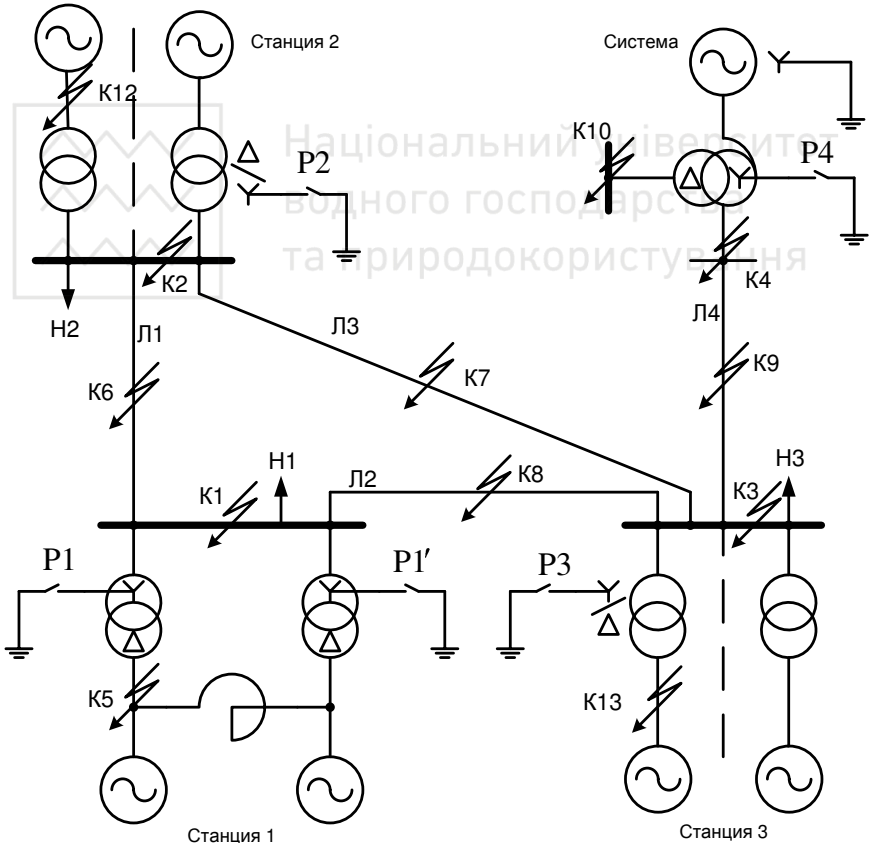


Рис. 2.1. Схема електричних з'єднань системи № 1



Характеристики ліній електропередачі

Варіант	Довжина ліній (км.)				Питомі параметри (Ом/км.)	
	Л1	Л2	Л3	Л4	$x_{уд1}$	$r_{уд}$
1	4	5	7	3	0,42	0,09
2	2	3	4	4	0,4	0,085
3	4	2	4,5	3	0,4	0,075
4	8	10	13	2	0,36	0,07
5	4	6	7	5	0,34	0,065
6	12	6	9	1	0,32	0,06
7	2	15	13	12	0,3	0,06
8	10	6	10	15	0,32	0,07
9	12	12	17	5	0,36	0,08
10	8	5	9	5	0,38	0,09

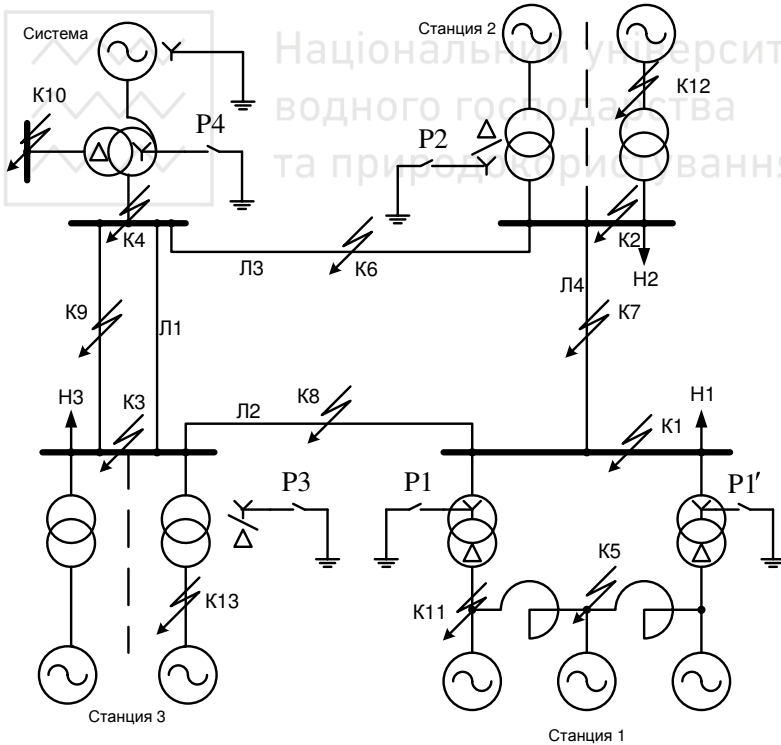


Рис. 2.2 Схема електричних з'єднань системи № 2



Стан нейтралей трансформаторів

Варіант	P1	P1'	P2	P3	P4
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	-	X
3	X	X	-	-	X
4	X	-	X	-	X
5	-	-	X	X	X
6	-	X	X	-	X
7	X	-	-	X	X
8	-	X	-	X	X
9	X	-	-	-	X
10	-	-	-	X	X

Примітка: X – нейтраль заземлена.

Технічні дані елементів електричної системи

Варіант	Станція 1														
	Турбогенератори з АРЗ						Трансформатори					Реактори			
	P_H МВт	$\cos \varphi_H$	U_H кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_H МВА	U_B кВ	U_I кВ	U_K %	$\frac{x}{r}$	U_H кВ	I_H кА	x_p Ом	$\frac{x_p}{r}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	30	0,8	6,3	0,143	0,174	20	40	115	6,3	10,5	20	10	2	0,14	40
2	60	0,8	10,5	0,146	0,18	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,2	40
3	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,25	50
4	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,35	50
5	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,7	10,5	30	10	2	0,4	40
6	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,14	50
7	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	242	10,5	11	30	10	4	0,2	80

8	60	0,8	6,3	0,14	0,18	40	80	242	6,3	11	20	10	4	0,2	5	80
9	30	0,8	10,5	0,14	0,17	20	32	330	10,5	11	20	10	2	0,3	5	40
10	63	0,8	10,5	0,2	0,25	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,4		40

Продовження табл. 2.3

Варіант	Станція 2											
	Турбогенератори з АРЗ							Трансформатори				
	n	P_H МВт	$\cos \varphi_H$	U_H кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_H МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_K %	$\frac{x}{r}$
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	6	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	121	10,5	10,5	30
2	4	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30
3	5	165	0,85	18	0,213	0,25	100	200	121	18	10,5	30
4	3	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,75	10,5	30
5	4	300	0,85	20	0,195	0,238	130	400	121	20	10,5	40
6	4	320	0,85	20	0,173	0,21	140	400	121	20	10,5	40
7	3	500	0,85	20	0,25	0,28	150	630	242	20	11	50
8	6	320	0,85	20	0,173	0,21	140	400	242	20	11	40
9	6	300	0,85	20	0,195	0,238	130	400	347	20	11	40
10	8	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,75	10,5	30

Продовження табл. 2.3

Варіант	Станція 3											
	Турбогенератори з АРЗ							Трансформатори				
	n	P_H МВт	$\cos \varphi_H$	U_H кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_H МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_K %	$\frac{x}{r}$
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	6	20	0,85	10,5	0,225	0,228	40	40	121	10,5	10,5	20
2	8	30	0,8	10,5	0,197	0,206	40	40	121	10,5	10,5	20
3	8	40	0,8	15,75	0,232	0,236	40	63	115	15,75	10,5	20
4	5	72	0,8	13,8	0,24	0,26	40	80	121	13,8	10,5	20
5	6	90	0,9	16,5	0,19	0,198	50	125	121	16,5	10,5	30
6	4	100	0,85	13,8	0,22	0,23	50	125	121	13,8	10,5	30
7	8	171	0,9	15,75	0,27	0,28	50	200	242	15,75	11	30
8	5	260	0,85	15,75	0,268	0,27	50	400	242	15,75	11	40
9	4	300	0,85	15,75	0,34	0,35	60	400	347	15,75	11	40
10	6	500	0,85	15,75	0,3	0,31	60	630	121	15,75	10,5	50

Варі-ант	Автотрансформатор								Система	Навантаження		
	S_H	U_B	U_C	U_H	$U_{кВH}$	$U_{кCH}$	$U_{кBC}$	$\frac{x}{r}$		H1	H2	H3
	МВ А	кВ	кВ	кВ	%	%	%		МВА	S_{H1} МВ А	S_{H2} МВ А	S_{H3} МВ А
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1	63	230	121	11	35	22	11	20	1500	20,0	40,0	160,0
2	125	230	121	11	31	19	11	30	2000	100	200	200
3	200	230	121	11	32	20	11	30	2500	200	400	1000
4	250	230	121	11	32	20	11	30	2300	200	200	400
5	125	330	115	11	35	22	10	30	3500	800	1000	1000
6	200	330	121	11	32	22	10	30	4000	400	600	800
7	500	500	230	11	35	22	11	50	4500	1000	200	800
8	800	500	230	11	23	13	9	60	5000	200	2000	2000
9	500	500	330	11	67	61	9,5	50	∞	100	1000	1500
10	200	230	121	11	32	20	11	30	∞	200	2000	250

Примітка: n – кількість блоків генератор-трансформатор;

∞ – система нескінченної потужності ($x_c = 0$).

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ, СКЛАДАННЯ І ПЕРЕТВОРЕННЯ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

3.1 Загальні положення

Для розрахунку струмів КЗ необхідно скласти схеми заміщення, в яких магнітозв'язані ланцюги замінюються електричним зв'язком шляхом приведення параметрів елементів різних ступенів напруги до одного ступеня напруги, прийнятого за основний. При використанні приведення у відносних одиницях рекомендується як основний вибирати базисний ступінь $U_{осн} = U_{\delta}$. При визначенні параметрів враховувати тільки індуктивні опори окремих елементів. Якщо через якому-небудь елемент струм при КЗ не протікає – він виключається зі схеми заміщення. Всі опори схем нумеруються порядковими номерами, які записують в чисельнику дроби. У знаменнику вказується величина опору у відносних одиницях за прийнятих базисних умов $S_{\delta} U_{\delta}$

Відповідно до точності практичних методів розрахунку рекомендується використовувати наближене приведення за середніми коефіцієнтами трансформації. При цьому для кожного ступеня трансформації встановлюють одну середню номінальну напругу, а саме: 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 16,5; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3 кВ [1].

3.2 ПРИВЕДЕННЯ У ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЯХ

Для розрахунку у відносних одиницях вводяться базисні величини S_{δ} (МВА), U_{δ} (кВ) на ступені, вибраному як основна. При цьому електрорушійна сила (ЕРС) E (при необхідності) і опори x (Ом), задані в іменованих одиницях, приводяться до основного ступеня напруги і виражаються у відносних одиницях за такими формулами (за умови $U_{осн} = U_{\delta}$):

точне приведення

наближене приведення

$$E_{*\delta} = \frac{E}{U_{\delta}} (k_1 k_2 \dots k_n); \quad E_{*\delta} = \frac{E}{U_H}; \quad (3.1)$$

$$x_{*\delta} = x \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} (k_1 k_2 \dots k_n)^2; \quad x_{*\delta} = x \frac{S_{\delta}}{U_{нсп}^2}. \quad (3.2)$$

Якщо ЕРС і опори даних елементів задані у відносних одиницях за номінальних умов, то їх приведені до базисних умов і основного ступеня напруги відносні величини рівні:

точне приведення

наближене приведення

$$E_{*\delta} = E_{*н} \frac{U_H}{U_{\delta}} (k_1 k_2 \dots k_n); \quad E_{*\delta} = E_{*н}; \quad (3.3)$$

$$x_{*\delta} = x_{*н} \left(\frac{U_H}{U_{\delta}} \right)^2 \frac{S_{\delta}}{S_H} (k_1 k_2 \dots k_n)^2; \quad x_{*\delta} = x_{*н} \frac{S_{\delta}}{S_H}. \quad (3.4)$$

У виразах (3.1–3.4) U_H визначається на тому ступені напруги, де знаходиться елемент, що підлягає приведенню; $k_1 \dots k_n$ визначається як відношення міжфазної напруги холостого ходу відповідних обмоток трансформаторів в напрямі від основного ступеня до того ступеня, елементи якого підлягають приведенню.

Зазвичай в іменованих одиницях заданий опір повітряних ліній, кабелів і реакторів, а у відносних одиницях за номінальних умов – опір генераторів

($x_{*н} = x_d''$, $x_{*н} = x_2$) і опір трансформаторів ($x_{*н} = \frac{U_{к\%}}{100}$)

3.3 ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ОКРЕМИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

Параметри елементів для схеми прямої послідовності визначаються завданням, в якому вони дані у відносних одиницях за номінальних умов для заданого елемента, або іменованих одиницях (повітряні лінії, реактори). Додатково розрахунок параметрів окремих послідовностей проводиться таким чином.



Генератори. Опори прямої послідовності генераторів в початковий момент часу визначається відповідно до формули

$$x_{\Gamma} = x_d'' \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}, \quad (3.5)$$

де x_d'' – надперехідний опір у відносних одиницях;

S_n – номінальна потужність генератора.

Опір зворотній послідовності генераторів визначається за формулою

$$x_{2\Gamma} = x_2 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}, \quad (3.6)$$

де x_2 – визначається за табл. 2.3.

Схема з'єднання обмоток трансформаторів виключає протікання через генератор струмів нульової послідовності.

Узагальнене навантаження. Її опір для прямої послідовності

$$x_n = 1,2 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}.$$

Для зворотної послідовності

$$x_{2n} = 0,35 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}.$$

Опір нульовій послідовності узагальненого навантаження визначається опорами і схемами з'єднання вхідних в неї елементів. Звичайно це тільки знижувальні трансформатори, підключені до мережі 110 кВ і вище, мають заземлену нейтраль. Рекомендується приймати

$$x_{0n} = 0,15 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}.$$

Тут S_n – номінальна потужність навантаження.

Трансформатори. Для трансформаторів опір розсіювання прямої і зворотної послідовностей

$$x_{1m} = x_{2m} = \frac{U_{\kappa\%}}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}, \quad (3.7)$$

де $U_{\kappa\%}$ – напруга короткого замикання трансформатора;

S_n – номінальна потужність трансформатора.

Опір нульової послідовності визначається схемою з'єднання обмоток [1]. При обліку трансформатора заданої схеми з'єднання обмоток в схемі заміщення нульової послідовності його опір можна прийняти рівним [2]

$$x_{0m} = 0,85x_{1m}.$$

Автотрансформатор. Опори автотрансформатора високої, середньої і низької напруги

$$x_B = \frac{0,5 U_{\kappa BC} + U_{\kappa BH} - U_{\kappa CH}}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}, \quad (3.8)$$

$$x_C = \frac{0,5 U_{\kappa BC} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BH}}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}, \quad (3.9)$$

$$x_H = \frac{0,5 U_{\kappa BH} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BC}}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n}. \quad (3.10)$$

Автотрансформатор вводиться в схему нульової послідовності своєю схемою заміщення без врахування опору вітки намагнічення.

Система. Для системи кінцевої і нескінченної потужності при заземленій нейтралі рекомендується приймати

$$x_{1c} = x_{2c}, \quad x_{0c} = 0.$$

Опір прямої послідовності системи при відомому значенні S''

$$x_{1c} = x_{2c} = 1,0 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S''} \text{ для системи нескінченної потужності } x_{1c} = x_{2c} = 0.$$

Струмообмежувальний реактор. Для реакторів

$$x_p = x_{p(Om)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{нуст}^2}, \quad (3.11)$$

де $x_{p(Om)}$ – опір реактора в іменованих одиницях;

$U_{нуст}$ – середня номінальна напруга ступеня, де встановлений реактор.

Повітряні лінії. Для повітряних ліній опору прямої (зворотної) послідовностей

$$x_{1л} = x_{2л} = x_{y\partial} \ell \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_n^2}, \quad (3.12)$$

де $x_{y\partial}$ – питомий опір лінії; ℓ – довжина лінії; U_n – середня номінальна напруга.

Опір нульової послідовності повітряних ліній значно більший, ніж прямої (зворотної) послідовності. Рекомендується приймати цей опір, як для повітряної лінії з тросами [1]:

$$- \text{для одноланцюгової лінії } x_{0л} = 3,0 \cdot x_{1л};$$

$$- \text{для двохланцюгової лінії } x_{0л} = 4,7 \cdot x_{1л}.$$

Формули (3.6) – (3.12) враховують, що параметри всіх елементів приблизно приведені на базисний ступінь напруги і переведені у відносні одиниці за базисних умов.

3.4 СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ОКРЕМИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

Схеми заміщення окремих послідовностей (прямої, зворотної і нульової) складаються відповідно до заданої схеми електричних з'єднань.

Схема прямої послідовності відповідає схемі, складеній для розрахунку симетричного трифазного КЗ. Залежно від вживаного методу розрахунку і моменту часу генератори і навантаження вводяться в неї відповідними реактивностями і ЕРС [1].

Використання методу розрахункових кривих не вимагає визначення ЕРС і врахування навантажень, оскільки вони враховуються самим методом. Генератори при цьому вводяться в схему заміщення прямої послідовності своїми надперехідними опорами x_d'' для будь-якого розрахункового моменту часу. У методі випрямлених характеристик для кожного моменту часу потрібна нова схема заміщення і обов'язковий облік навантажень. Аналітичний розрахунок у поєднанні з використанням типових кривих зміни струму дозволяє обійтися однією схемою заміщення, складеною для початкового моменту КЗ з урахуванням навантажень.

При аналітичному визначенні ЕРС E_0'' можна використовувати формулу

$$E_0'' = \sqrt{U_0 \cos \varphi_0 + U_0 \sin \varphi_0 + I_0 x_d''} \quad (3.13)$$

або

$$E_0'' = U_0 + I_0 x_d'' \sin \varphi_0 \quad (3.14)$$

де U_0 I_0 відповідають доаварійному (номінальному режиму)

Для введення ЕРС в схему важливо, щоб всі значення, що входять у вирази (3.13) і (3.14) були виражені у відносних одиницях за базисних або номінальних умов з урахуванням того, що при наближеному приведенні $E_{0\delta}'' = E_{0н}''$. Для системи значення ЕРС для будь-якого моменту часу слід приймати рівними 1,0 у.о. За умови, що при КЗ в мережах 110 кВ і вище навантаження електрично віддалене від місця КЗ, враховувати підживлення від узагальненого навантаження в початковий момент КЗ не потрібно [2].

Схема зворотної послідовності за структурою аналогічна схемі прямої послідовності, але не містить ЕРС, а опори елементів вважаються постійними

для будь-якого моменту часу. Генератори вводяться в схему своїми опорами зворотній послідовності x_2 .

Схема нульової послідовності визначається з'єднанням обмоток трансформаторів, що беруть участь в ній, і автотрансформаторів і способом заземлення нейтралей [1, 2, 3]. У загальному випадку ця схема відрізняється від схем прямої і зворотної послідовностей. При складанні схеми необхідно пам'ятати про те, що струм нульової послідовності є по суті однофазним струмом, що розгалужений між трьома фазами і повертається через землю. Струм нульової послідовності при поперечній несиметрії (КЗ) може протікати тільки у бік обмоток трансформаторів, сполучених в зірку із заземленою нейтраллю.

Початком схеми прямої, зворотної або нульової послідовностей рахують точку нульового потенціалу, а кінцем – крапку, де виникає несиметрія. До кінця схеми прикладена напруга відповідної послідовності $\dot{U}_{\kappa 1}, \dot{U}_{\kappa 2}, \dot{U}_{\kappa 0}$.

Кожна схема повинна бути перетворена до одного результуючого опору відповідній послідовності щодо точки КЗ $x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$ і ЕРС E_{Σ} . При перетвореннях слід використовувати основні прийоми еквівалентних перетворень, відомі з теорії лінійних ланцюгів [7]. Кінцевою метою перетворення є визначення взаємних опорів від кожної групи однотипних або рівновіддалених джерел до точки КЗ. Всі розрахунки ведуться для трьох значущих цифр.

3.5 ЗНАХОДЖЕННЯ ВЗАЄМНИХ ОПОРІВ

Для знаходження взаємного опору між джерелом і точкою КЗ можуть бути використані методи, відомі з теорії лінійних ланцюгів [7]: перетворення зірки в трикутник, трикутника в зірку, багатопроменевої зірки в повний багатокутник.

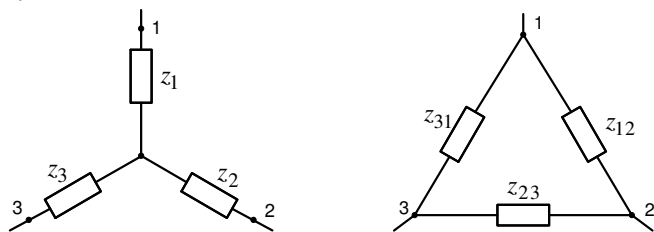


Рис. 3.1. Перетворення трьохпроменевої зірки в трикутник

$$z_{12} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3}; \quad z_{23} = z_2 + z_3 + \frac{z_2 z_3}{z_1}; \quad z_{31} = z_3 + z_1 + \frac{z_3 z_1}{z_2}.$$

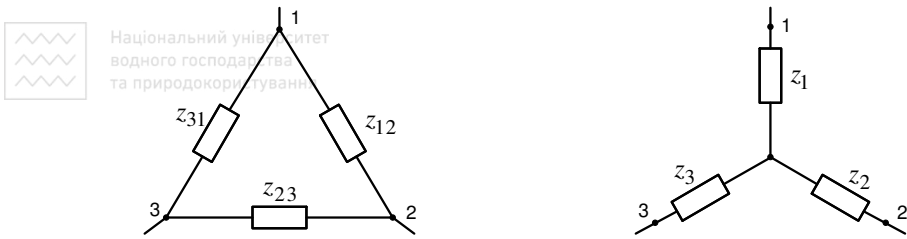


Рис. 3.2. Перетворення трикутника в зірку

$$z_1 = \frac{z_{12} z_{31}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}}; \quad z_2 = \frac{z_{12} z_{23}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}}; \quad z_3 = \frac{z_{23} z_{31}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}}.$$

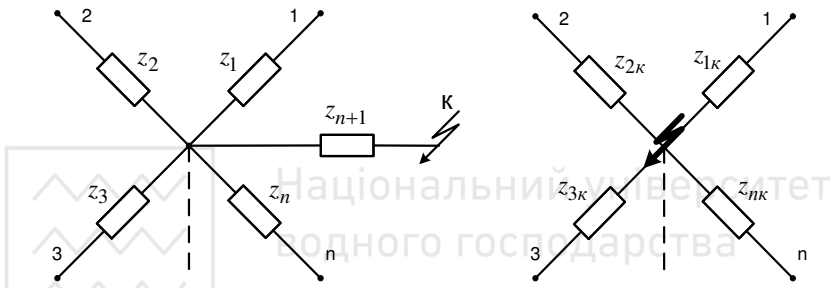


Рис. 3.3. Перетворення багатопроменевої зірки

$$z_{1k} = z_1 z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i} \quad z_{2k} = z_2 z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i} \quad \dots, \quad z_{nk} = z_n z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i}$$

де $z_i = z_1 + z_2 + \dots + z_n + z_{n+1}$.

Для знаходження розподілу струмів в схемі при використанні методу випрямлених характеристик і аналітичного методу можна обійтися без перетворення схеми, а безпосередньо використовувати відомі методи розрахунку: метод контурних струмів, метод вузлової напруги і так далі

У курсовій роботі потрібно провести перетворення схеми до простого вигляду за допомогою коефіцієнтів розподілу (струморозподілу). Коефіцієнти розподілу (долі від одиничного струму) знаходяться як відносні струми для початкового моменту КЗ, і знайдений струморозподіл розповсюджується на весь процес, аж до $t = \infty$. Це, природно, вносить певну погрішність, оскільки опори джерел при перехідному процесі змінюються в часі.

За відомим коефіцієнтом розподілу C_m будь-якого m -го джерела живлення і результуючому опору схеми X_Σ можна знайти взаємний опір між цим джерелом і точкою КЗ.



$$x_{km} = \frac{x_{\Sigma}}{C_m} .$$

(3.15)

Коефіцієнт розподілу знаходиться розгортанням схеми від результуючого опору до початкової схеми. Нижче показаний спосіб знаходження коефіцієнтів розподілу для випадків паралельного і послідовного складання опорів.

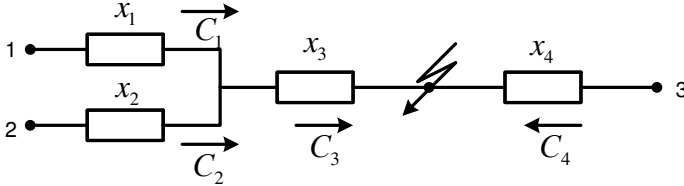


Рис. 3.4. Початкова схема

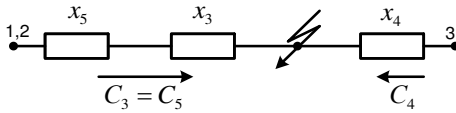


Рис. 3.5. Етапи перетворення початкової схеми

Розрахунок коефіцієнтів розподілу

$$C_{\Sigma} = 1, \quad C_4 = \frac{x_{\Sigma}}{x_4}, \quad C_6 = C_3 = C_5 = \frac{x_{\Sigma}}{x_6}, \quad C_1 = \frac{x_5}{x_1} C_3, \quad C_2 = \frac{x_5}{x_2} C_3,$$

$$C_1 + C_2 + C_4 = 1 .$$

Для схеми, перетвореної з трикутника в зірку або навпаки, розрахунок коефіцієнтів розподілу можна провести застосуванням 1-го або 2-го законів Кірхгофа, тобто:

$$\sum_i C_i = 0 \text{ – для вузла; } \sum_j C_j x_j = 0 \text{ – для контуру.}$$

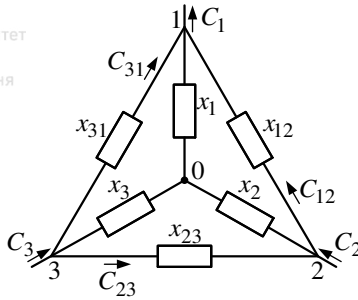


Рис. 3.6. Початкова схема

Для прийнятого на рис. 3.6 напрямів коефіцієнтів розподілу

вузол 1 $C_{31} + C_{12} - C_1 = 0$

вузол 2 $C_{23} - C_{12} + C_2 = 0$

вузол 3 $-C_{31} - C_{23} + C_3 = 0$;

контур 1201 $-C_{12}x_{12} + C_2x_2 + C_1x_1 = 0$

контур 2302 $-C_{23}x_{23} + C_3x_3 - C_2x_2 = 0$

контур 3103 $-C_{31}x_{31} - C_1x_1 - C_3x_3 = 0$.

З отриманих співвідношень можуть бути знайдені невідомі коефіцієнти розподілу. Сума коефіцієнтів розподілу всіх джерел живлення повинна дорівнювати одиниці.

4 РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

4.1 Загальні положення

Вказаний розрахунок має призначення, в першу чергу, визначити таке значення, що періодичною складає повний струм КЗ в перший період (початкове значення) як основної розрахункової величини. Періодична складова повного струму визначається як алгебраїчна сума періодичних складових струму окремих джерел живлення і в загальному випадку залежить від часу

$$I_{nkt\Sigma} = \sum_m I_{nktm} \quad (4.1)$$

Способи знаходження періодичної складової залежать від розрахункового методу і приведені нижче.

4.2. РОЗРАХУНОК ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Аналітичний метод. Метод застосовується при відомих значеннях ЕРС і опорів для моменту часу, що цікавить. Звичайно це перший період короткого замикання, або початковий момент часу. За наявності декількох джерел необхідно виділити струм від системи (незмінний в часі) і струм від решти

генераторів або струми окремих груп генераторів, для яких періодична складова струму в часі змінюється.

Початкове значення періодичного струму КЗ від джерела з номером m визначається аналітично за формулою:

$$I''_{нкm} = \frac{E''_{0m}}{x_{км}} I_{\delta}, \quad (4.2)$$

де $I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}}$ (кА) – базисний струм, приведений до номінальної напруги в точці КЗ;

$x_{км}$ – взаємний опір між точкою КЗ і ЕРС джерела.

Далі використовується формула (4.1). Результуючий початковий струм також може бути знайдений за виразом

$$I''_{нк\Sigma} = \frac{E''_{0\Sigma}}{x_{\Sigma}} I_{\delta}, \quad (4.3)$$

де $E''_{0\Sigma} = \frac{\sum E_i Y_i}{\sum Y_i}$ – еквівалентна ЕРС; $Y_i = \frac{1}{x_{ki}}$.

Метод типових кривих. Для знаходження струму для довільного моменту часу (у курсовій роботі для часу $t = 0,1$ с і $t = \infty$ (≈ 3 с)) спільно з аналітичним розрахунком початкового струму використовуються типові криві зміни струму (дод. Г). При цьому струм від системи не змінюється в часі, а струм від решти генераторів або струми окремих груп генераторів визначаються з використанням типових кривих.

Для цього заздалегідь аналітично визначається $I''_{нкГ}$ і номінальний

струм $I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H}$ для виділеної групи генераторів, і їх відношення

$\alpha = I''_{нкГ} / I_H$. При визначенні α обидва струми повинні бути визначені в одній системі одиниць і при одній напрузі. Для набутого значення α за типовими кривими визначають зміну початкового значення струму генератора до

заданого моменту часу $\gamma = \frac{I''_{нкt}}{I''_{нкГ}}$ і знаходять необхідну величину такою, що

періодичною складає струму КЗ генератора $I''_{нкt} = \gamma I''_{нкГ}$ і в місці КЗ

$$I''_{нкt} = \gamma I''_{нк}. \quad (4.4)$$

Струм від системи приймають незмінним в часі і підсумовують з набутих для заданого моменту часу значень струму для генераторів. Стале значення струму КЗ визначається для часу $t = 3$ с.

Метод розрахункових кривих. Цей метод, розроблений в 1940 р., дозволяє визначити відносне значення періодичної складової струму КЗ залежно від електричної віддаленості і часу [2]. Розрахунок необхідно проводити окремо від різних за типом і віддаленістю груп генераторів (розрахунок за індивідуальною зміною).

Знайдені в розділі 3.5 взаємних реактивності виражають у відносних одиницях, приведених до сумарної номінальної потужності генераторів, що входять до відповідної групи виділених джерел, тобто визначають розрахункові реактивності

$$x_{кт\ расч} = x_{кт} \frac{S_{н\Sigma t}}{S_{\sigma}} . \quad (4.5)$$

За відповідними розрахунковими кривими (додаток Д) визначається кратність періодичної складової струму КЗ для моменту часу, що цікавить I_{*nktm} і знаходиться значення періодичної складової струму, що діє, в місці КЗ в момент часу, що цікавить

$$I_{nktm} = I_{*nktm} I_{нт} , \quad (4.6)$$

де $I_{нт} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_n}$ – номінальний струм джерел.

Далі використовується формула (4.1).

Якщо розрахунковий опір гілці з виділеною групою джерел задовольняє нерівності

$$x_{кт\ расч} > 3 ,$$

то струм КЗ не залежить від часу і визначається аналітично

$$I_{nktm} = \frac{I_{\sigma}}{x_{кт}} = \frac{I_{нт}}{x_{кт\ расч}} . \quad (4.7)$$

Вираз (4.7) використовується також для знаходження струму КЗ від системи.

Метод випрямлених характеристик. Особливістю методу є необхідність визначення ЕРС генераторів E_t і їх опорів x_t для кожного моменту часу за спеціальними кривими (додат. Е). Це вимагає багатократного знаходження взаємних опорів і ЕРС окремих груп генераторів. При використанні цього методу генератори з АРЗ можуть працювати в двох режимах:

а) режим підйому збудження при



$$x_{вн} \leq x_{крт}, I_{нкт} \geq I_{крпкт}; \quad (4.8)$$

б) режим нормальній напруги:

$$x_{вн} \geq x_{крт}, I_{нкт} \leq I_{крпкт}. \quad (4.9)$$

У першому випадку (формула 4.8) генератор вводиться в схему заміщення своїми ЕРС E_t і x_t визначеними за кривими типових генераторів, або при відомих параметрах генераторів з урахуванням виразів:

$$E_t = E_{qnp} - (E_{qnp} - E_0'') \delta_{Et}; \quad x_t = x_d - x_d - x_d'' \sigma_{xt}, \quad (4.10)$$

де δ_{Et} і σ_{xt} – коефіцієнти, визначувані кривими методу випрямлених характеристик, для генераторів тих, що мають нетипові параметри;

E_{qnp} – граничне (стельове) значення синхронної ЕРС;

x_d – синхронний опір генератора.

Для режиму нормальній напруги (4.9) генератор повинен бути введений в схему $E_t = U_H$ $x_t = 0$



$$x_{крт} = x_t \frac{U_H}{E_t - U_H}, \quad (4.11)$$

$$I_{крпкт} = \frac{U_H}{x_{крт}}. \quad (4.12)$$

Для розрахунку схеми всі генератори з АРЗ залежно від очікуваного для них режиму вводяться в схему або своїми x_t і E_t або $E_t = U_H$ $x_t = 0$

Після перетворення схеми і знаходження результуючих ЕРС $E_{t\Sigma}$ і $x_{t\Sigma}$ струм КЗ для моменту часу, що цікавить, визначається за виразом

$$I_{нкт} = \frac{E_{t\Sigma}}{x_{t\Sigma}} I_0. \quad (4.13)$$

Після знаходження струму КЗ перевіряється правильність вибраних режимів генераторів для складних схем. Для цього знаходяться струми генераторів і порівнюються з критичними. При цьому повинні співпадати вибрані і отримані в результаті розрахунку умови (4.8 і 4.9). Якщо опиниться, що режими вибрані невірно, то їх слід змінити і повторити розрахунок. Для розгортання схеми допускається використовувати коефіцієнти розподілу, знайдені для схеми початкового моменту КЗ.

При знайдених взаємних опорах між джерелом і точкою КЗ режим може бути заданий достовірно в першому ж розрахунку.

Стале значення струму КЗ визначається при $t = 4\tau$.

4.3 Визначення ударного струму, значення струму КЗ, що діє, за

перший період і потужності короткого замикання

Ударний струм в місці КЗ визначається за значенням періодичною складовою струму КЗ при $t = 0$

$$i_y = k_y \sqrt{2I''_{нк}}, \quad (4.14)$$

де $k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_\vartheta}}$.

Еквівалентна постійна часу T_ϑ [1, 2] при розрахунку у відносних одиницях визначається як

$$T_\vartheta(o.e) = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma}, \quad (4.15)$$

а при розрахунку в іменованих одиницях –

$$T_\vartheta(c) = \frac{x_\Sigma}{\omega r_\Sigma}, \quad (4.16)$$

де x_Σ – результуючий реактивний опір схеми щодо точки КЗ, визначене без урахування активних опорів;

r_Σ – результуючий активний опір схеми щодо точки КЗ (розраховується за схемою, складеною з одних активних опорів, приведених до тих же базисних умов і ступеня напруги, що і реактивні); $\omega = 2\pi f = 314$ – кутова частота $\left(\frac{1}{c}\right)$.

При невідомих активних опорах допускається визначати ударний струм за усередненими значеннями ударного коефіцієнта [4]:

$k_y = 1,95$ – при КЗ на шинах генератора;

$k_y = 1,9$ – при КЗ на збірних шинах підвищеної напруги електричних станцій;

$k_y = 1,8$ – при КЗ в розподільних мережах.

Значення повного струму КЗ, що діє, за перший період його зміни визначається відповідно до виразу

$$I_y = I''_{нк} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (4.17)$$

Тепловий імпульс розраховується за початковим значенням періодичної складової струму КЗ. Періодичний струм $I''_{нк}$ приймають незгасаючим і тепловий імпульс $B_K (кА^2 \cdot c)$ визначають за формулою



$$B_k = I_{пк}''^2 \cdot (t_{отк} + T_{э}), \quad (4.18)$$

де $t_{отк} = 0,1$ с – час відключення КЗ.

Потужність КЗ в місці пошкодження є умовною величиною, визначуваною за формулою

$$S_{кз} = \sqrt{3} U_n I_{пкк}. \quad (4.19)$$

4.4 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ НАПРУГИ У ВУЗЛАХ СИСТЕМИ

Необхідно визначити залишкову напругу в заданій точці системи. При цьому слід пам'ятати, що у міру видалення від точки КЗ напруга збільшується і, згідно з рис. 4.1, визначається за формулою

$$U_{ост} = E - I_i x_i. \quad (4.20)$$

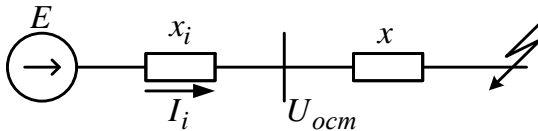


Рис. 4.1. Розрахункова схема

4.5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СИМЕТРИЧНОГО ТРИФАЗНОГО КЗ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Всі розрахунки приводитимуться згідно з такими початковими даними: схема системи № 1 – рисунок 2.1; лінії електропередачі – таблиця 2.1 (варіант 3); стан нейтралей трансформаторів – таблиця 2.2 (варіант 1); станції 1, 2, 3 – таблиця 2.3 (варіант 5); автотрансформатор – таблиця 2.3 (варіант 2).

4.5.1 Розрахунок параметрів і перетворення схеми заміщення

Розрахунок проведемо у відносних одиницях без урахування опорів навантаження. Як базисна потужність приймається потужність системи

$$S_{б} = S'' = 2000 \text{ МВА.}$$

За базисну напругу береться середня номінальна напруга мережі в точці КЗ:

$$U_{б} = U_{ср.н} = 115 \text{ кВ.}$$

Базисний струм приведений до середньої базисної номінальної напруги в

точці КЗ:

$$I_{б} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} U_{б}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 10,041 \text{ кА.}$$

Складається початкова схема заміщення (схема заміщення прямої послідовності) за схемою електричних з'єднань системи № 1.

Визначаються параметри схеми заміщення з приведенням їх значень до базисних величин.

Опори генераторів визначаються за формулою (3.5):

$$x_1 = \frac{\left(0,195 \cdot \frac{2000 \cdot 0,85}{300}\right)}{4} = 0,276, \quad x_{s'} = x_{s''} = 1,615,$$

$$x_8 = 0,633.$$

Опори трансформаторів – за формулою (3.7):

$$x_2 = \frac{\left(\frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{400}\right)}{4} = 0,131, \quad x_4 = x_4' = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{200} = 1,05, \quad x_9 = \frac{\left(\frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{125}\right)}{6} = 0,28.$$

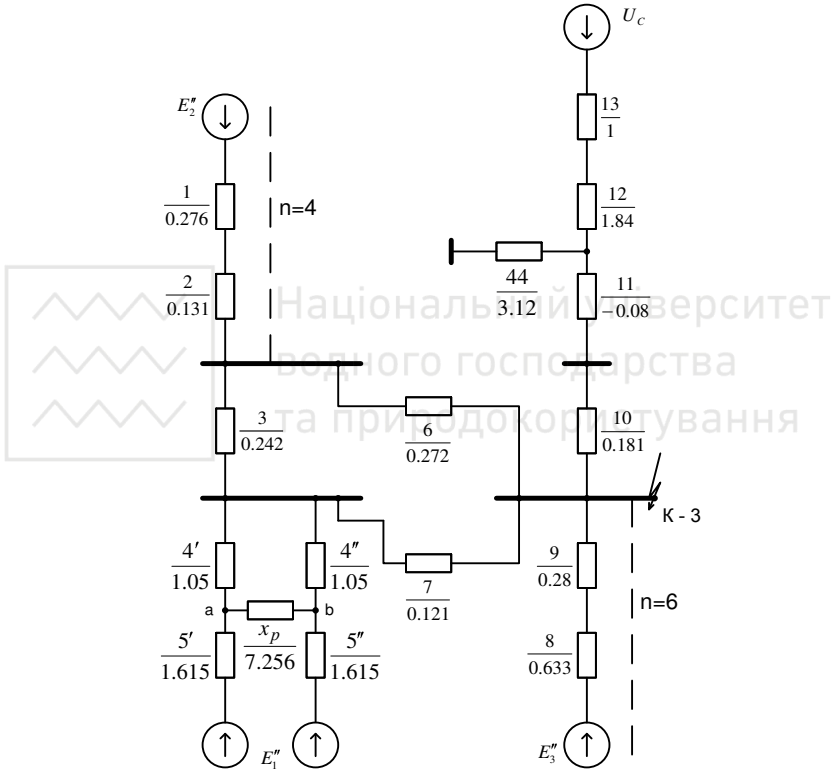


Рис. 4.13. Схема заміщення прямої послідовності

Опір реактора – за формулою (3.11): $x_p = 0,4 \cdot \frac{2000}{10,5^2} = 7,256.$

Опори ліній – за формулою (3.12): $x_3 = 0,4 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,242$



$$x_6 = 0,4 \cdot 4,5 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,272$$

Опори автотрансформатора – за формулами (3.8–3.10):

$$x_{11} = \frac{0,5 \cdot 11 + 19 - 31}{100} \cdot \frac{2000}{125} = -0,08,$$

$$x_{12} = \frac{0,5 \cdot 11 + 31 - 19}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 1,84,$$

$$x_{44} = \frac{0,5 \cdot 31 + 19 - 11}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 3,12.$$

$$\text{Опір системи: } x_{13} = \frac{S_{\sigma}}{S''} = \frac{2000}{2000} = 1.$$

Оскільки струм при зовнішньому КЗ не протікає через реактор, то з схеми заміщення реактор може бути виключений або закорочений (окрім КЗ в точці К5). Обмотка НН автотрансформатора також виключається з розрахунку симетричного КЗ, оскільки через неї не протікає струм (окрім КЗ в точці К10).

Тепер згортаємо схему заміщення прямої послідовності.

Розрахунок (рис. 4.14):

$$x_4 = \frac{x_{4'}}{2} = \frac{1,05}{2} = 0,525, \quad x_5 = \frac{x_{5'}}{2} = \frac{1,615}{2} = 0,807,$$

$$x_{14} = x_1 + x_2 = 0,276 + 0,131 = 0,408,$$

$$x_{15} = x_4 + x_5 = 0,525 + 0,807 = 1,333,$$

$$x_{16} = x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} = 0,181 - 0,08 + 1,84 + 1 = 2,941,$$

$$x_{17} = x_8 + x_9 = 0,28 + 0,633 = 0,913.$$

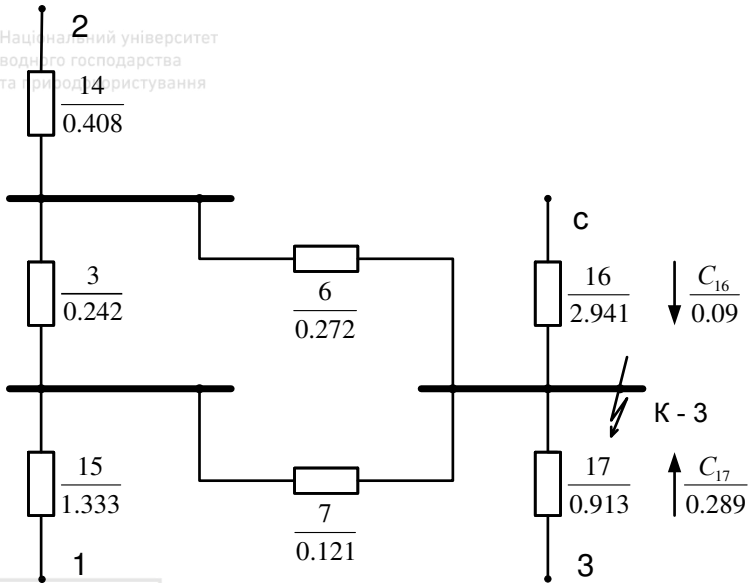


Рис. 4.14

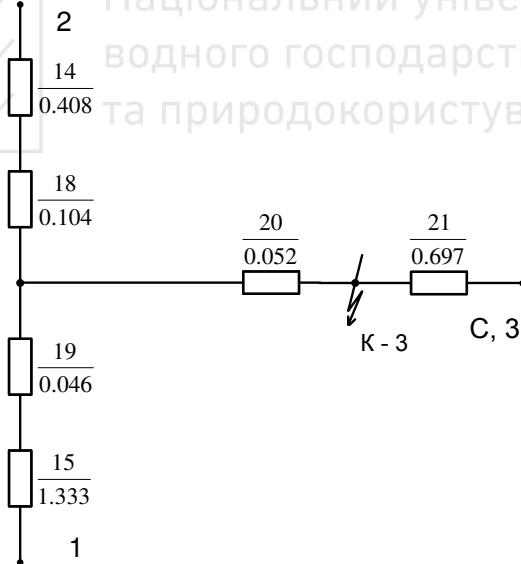
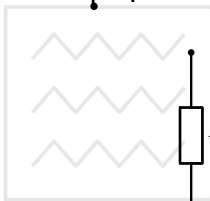


Рис. 4.15

Розрахунок (рис. 4.15):

$$x_{18} = \frac{x_6 \cdot x_3}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,272 \cdot 0,242}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,104,$$



$$x_{19} = \frac{x_7 x_3}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,121 \cdot 0,242}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,046,$$

$$x_{20} = \frac{x_6 x_7}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,272 \cdot 0,121}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,052,$$

$$x_{21} = \frac{x_{16} x_{17}}{x_{16} + x_{17}} = \frac{2,941 \cdot 0,913}{2,941 + 0,913} = 0,697.$$

Розрахунок (рис. 4.16):

$$x_{22} = x_{14} + x_{18} = 0,408 + 0,104 = 0,511,$$

$$x_{23} = x_{19} + x_{15} = 0,046 + 1,333 = 1,379.$$

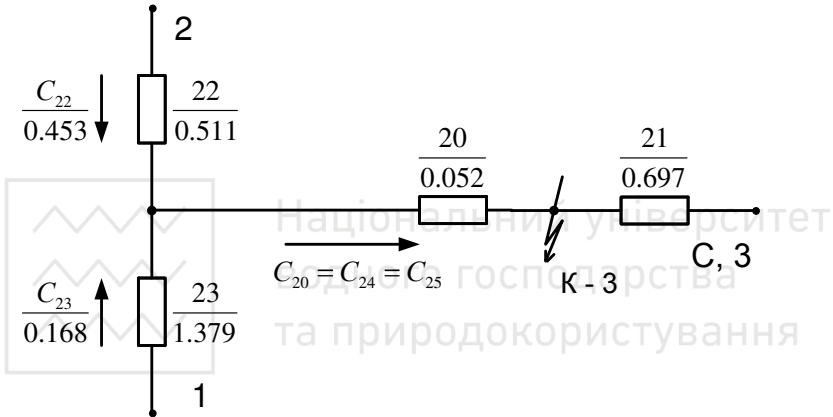


Рис. 4.16

Розрахунок (рис. 4.17): $x_{24} = \frac{x_{22} x_{23}}{x_{22} + x_{23}} = \frac{0,511 \cdot 1,379}{0,511 + 1,379} = 0,373.$

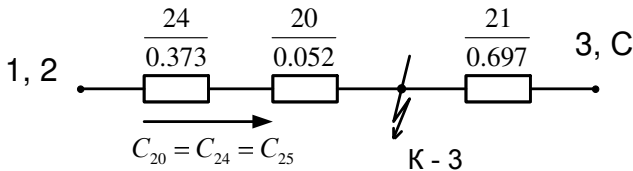


Рис. 4.17

Розрахунок (рис. 4.18): $x_{25} = x_{20} + x_{24} = 0,373 + 0,052 = 0,425.$

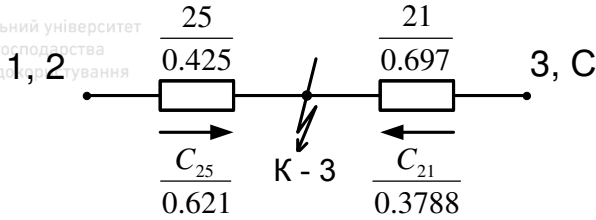


Рис. 4.18

$$\text{Розрахунок (рис. 4.19): } x_{\Sigma} = \frac{x_{25} \cdot x_{21}}{x_{25} + x_{21}} = \frac{0,425 \cdot 0,697}{0,425 + 0,697} = 0,264.$$

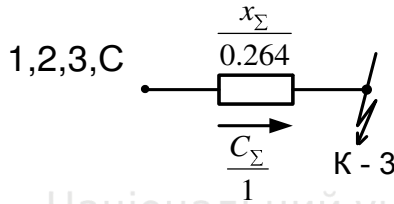


Рис. 4.19. Результуючий опір

4.5.2 Визначення пайової участі джерел в сумарному початковому струмі КЗ і розрахунок взаємних опорів

Необхідно визначити пайову участь кожної електричної станції і системи в початковому струмі КЗ з використанням коефіцієнтів розподілу.

Коефіцієнти розподілу знаходяться розгортанням схеми від результуючого опору до початкової схеми.

Одиничний струм розподіляється обернено пропорційно до опору.

$$\text{Розрахунок (рис. 4.18): } c_{21} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{21}} = \frac{0,264}{0,697} = 0,379$$

$$c_{25} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{25}} = \frac{0,264}{0,425} = 0,621$$

$$\text{Розрахунок (рис. 4.17, 4.16): } c_{20} = c_{24} = c_{25} = 0,621$$

$$c_{22} = \frac{x_{24}}{x_{22}} c_{20} = \frac{0,373}{0,511} \cdot 0,621 = 0,453,$$

$$c_{23} = \frac{x_{24}}{x_{23}} c_{20} = \frac{0,373}{1,379} \cdot 0,621 = 0,168.$$

Розрахунок (рис. 4.18, 4.14):

$$c_{16} = \frac{x_{21}}{x_{16}} \cdot c_{21} = \frac{0,697}{2,941} \cdot 0,379 = 0,0898,$$

$$c_{17} = \frac{x_{21}}{x_{17}} \cdot c_{21} = \frac{0,697}{0,913} \cdot 0,379 = 0,289.$$

Виконується перевірка

$$c_{22} + c_{23} + c_{16} + c_{17} = 0,453 + 0,168 + 0,0898 + 0,289 = 1.$$

Визначаються взаємні опори станцій і системи (рис. 4.20)

$$x_{kc} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{16}} = \frac{0,264}{0,0898} = 2,941, \quad x_{\kappa 1} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{23}} = \frac{0,264}{0,168} = 1,57,$$

$$x_{\kappa 2} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{22}} = \frac{0,264}{0,453} = 0,582, \quad x_{\kappa 3} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{17}} = \frac{0,264}{0,289} = 0,913.$$

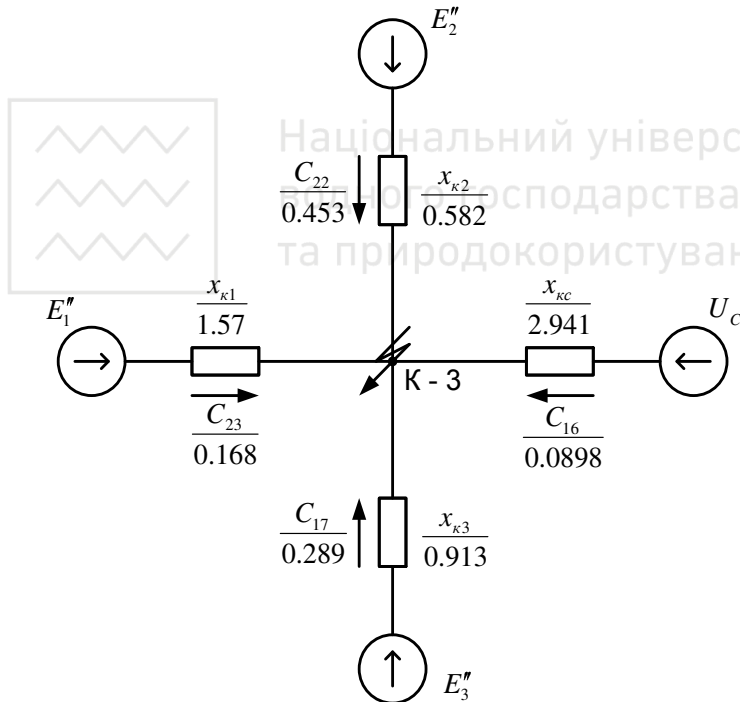


Рис. 4.20. Розділення джерел

4.5.3 Визначення періодичної складової струму

Знайдемо ЕРС E_{*1}'' першої станції:



$$E''_{\delta 1} = \sqrt{U \cos \varphi^2 + U \sin \varphi + I_{*\delta}'' x_{d*\delta}''^2} = \\ = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + 1 \cdot 0,53 + 0,235 \cdot 0,807^2} = 1,114$$

$$I_{*\delta}'' = \frac{S_n}{S_{\delta}} = \frac{2P_n}{S_{\delta} \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 200}{2000 \cdot 0,85} = 0,235, \quad x_{d*\delta}'' = x_5 = 0,807.$$

Оскільки при наближеному приведенні $E''_{*\delta} = E''_{*H}$ то ЕРС кожної системи можна визначити за паспортними даними.

$$E''_1 = E''_{1\delta} = 1,114, \quad E''_2 = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + 1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,195^2} = 1,117;$$

$$E''_3 = 1,098.$$

Струми окремих джерел в початковий момент часу:

$$I''_c = \frac{U_c}{x_{kc}} = \frac{1}{2,941} = 0,34, \quad I''_{cm1} = \frac{E''_1}{x_{k1}} = \frac{1,114}{1,57} = 0,71,$$

$$I''_{cm2} = \frac{E''_2}{x_{k2}} = \frac{1,117}{0,582} = 1,919, \quad I''_{cm3} = \frac{E''_3}{x_{k3}} = \frac{1,098}{0,913} = 1,203.$$

Сумарний струм трифазного короткого замикання:

$$I''_{\Sigma} = 0,34 + 0,71 + 1,919 + 1,203 = 4,17.$$

У іменованих одиницях $I''_{\Sigma} = I''_{\Sigma} I_{\delta} = 4,17 \cdot 10,041 = 41,87$ кА.

Еквівалентна ЕРС:

$$E''_{\Sigma} = \frac{\sum E_i Y_i}{\sum Y_i} = \frac{\frac{1,114}{1,57} + \frac{1,117}{0,582} + \frac{1,098}{0,913} + \frac{1}{2,941}}{\frac{1}{1,57} + \frac{1}{0,582} + \frac{1}{0,913} + \frac{1}{2,941}} = 1,1.$$

Сумарний струм трифазного короткого замикання

$$I''_{\Sigma} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma}} = \frac{1,1}{0,264} = 4,17$$

тобто струм співпадає із знайденим струмом від окремих джерел.

Періодична складова струму трифазного КЗ для моменту часу $t = 0,1$ с і $t = 3$ с знаходиться методом типових кривих (додат. Г).

Номинальні струми станцій в у.о. $I_{n1} = \frac{nP_n}{\cos \varphi S_{\delta}} = \frac{2 \cdot 200}{0,85 \cdot 2000} = 0,235$

$$I_{n2} = \frac{4 \cdot 300}{0,85 \cdot 2000} = 0,706, \quad I_{n3} = \frac{6 \cdot 90}{0,9 \cdot 2000} = 0,3.$$

При електричній віддаленості точки КЗ від джерела α відношення γ для моменту часу визначається за типовими кривими:

$$\alpha_1 = \frac{I''_{cm1}}{I_{n1}} = \frac{0,71}{0,235} = 3,021, \quad \alpha_2 = \frac{I''_{cm2}}{I_{n2}} = \frac{1,919}{0,706} = 2,718,$$

$$\alpha_3 = \frac{I''_{cm3}}{I_{n3}} = \frac{1,203}{0,3} = 4,01.$$

Для моменту часу $t = 0,1$ с: $\gamma_1 = 0,88$ $\gamma_2 = 0,91$

Для моменту часу $t = 3$ с: $\gamma_1 = 0,84$ $\gamma_2 = 0,9$

Періодична складова струму КЗ для моменту часу $t = 0,1$ с

$$I_{cm1(0.1)} = I''_{cm1} \gamma_1 = 0,71 \cdot 0,88 = 0,62,$$

$$I_{cm2(0.1)} = I''_{cm2} \gamma_2 = 1,919 \cdot 0,91 = 1,75,$$

$$I_{cm3(0.1)} = I''_{cm3} \gamma_3 = 1,203 \cdot 0,84 = 1,01.$$

Сумарний струм трифазного короткого замикання для $t = 0,1$ с

$$I_{\Sigma(0.1)} = 0,62 + 1,75 + 1,01 + 0,34 = 3,72,$$

$$I_{\Sigma(0.1)} = I_{\Sigma(0.1)} I_{\sigma} = 3,72 \cdot 10,041 = 37,35 \text{ кА.}$$

Періодична складова струму КЗ для моменту часу $t = 3$ с

$$I_{cm1(3)} = I''_{cm1} \gamma_1 = 0,71 \cdot 0,84 = 0,596,$$

$$I_{cm2(3)} = I''_{cm2} \gamma_2 = 1,919 \cdot 0,9 = 1,727,$$

$$I_{cm3(3)} = I''_{cm3} \gamma_3 = 1,203 \cdot 0,71 = 0,854.$$

Сумарний струм трифазного короткого замикання

$$I_{\Sigma(3)} = 0,596 + 1,727 + 0,854 + 0,34 = 3,517,$$

$$I_{\Sigma(3)} = I_{\Sigma(3)} I_{\sigma} = 3,517 \cdot 10,041 = 35,314 \text{ кА.}$$

4.5.4 Визначення ударного струму КЗ

Активні опори визначаються за відношенням: $r_i = \frac{x_i}{x/r}$.

Опори генераторів:

$$r_1 = \frac{0,276}{130} = 0,0021, \quad r_5 = \frac{0,807}{120} = 0,0067, \quad r_8 = \frac{0,633}{50} = 0,0127.$$

Опори трансформаторів:



$$r_2 = \frac{0,131}{40} = 0,0033, \quad r_4 = \frac{0,525}{30} = 0,0175, \quad r_9 = \frac{0,28}{30} = 0,0093.$$

Опори ліній: відношення $\frac{x}{r} = \frac{0,4}{0,075} = 5,33$

$$r_3 = \frac{0,242}{5,33} = 0,045, \quad r_6 = \frac{0,272}{5,33} = 0,051, \quad r_7 = \frac{0,121}{5,33} = 0,023,$$

$$r_{10} = \frac{0,181}{5,33} = 0,034.$$

Опори автотрансформатора: $r_{11,12} = \frac{x_{BC}}{30} = \frac{1,76}{30} = 0,0587.$

Опір системи: $r_{13} = 0.$

Схема заміщення для активних опорів складається і перетвориться аналогічно схемі заміщення для реактивних опорів (рис. 4.13–4.19):

$$r_{14} = 0,0021 + 0,0033 = 0,0054,$$

$$r_{15} = 0,0067 + 0,0175 = 0,0242,$$

$$r_{16} = r_{10} + 0,0587 + 0 = 0,0927,$$

$$r_{17} = 0,0127 + 0,0093 = 0,022,$$

$$r_{18} = 0,019, \quad r_{19} = 0,0087, \quad r_{20} = 0,0098,$$

$$r_{21} = \frac{0,0927 \cdot 0,022}{0,0927 + 0,022} = 0,0178,$$

$$r_{22} = 0,0054 + 0,019 = 0,024,$$

$$r_{23} = 0,0087 + 0,0242 = 0,0329,$$

$$r_{24} = \frac{0,024 \cdot 0,0329}{0,024 + 0,0329} = 0,0139,$$

$$r_{25} = 0,0098 + 0,0139 = 0,0237,$$

$$r_{\Sigma} = \frac{r_{25} \cdot r_{21}}{r_{25} + r_{21}} = \frac{0,0237 \cdot 0,0178}{0,0237 + 0,0178} = 0,01.$$



де T_{ϑ} – еквівалентна постійна часу.

Якщо T_{ϑ} у відносних одиницях, то

$$T_{\vartheta(o.e)} = \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{0,264}{0,01} = 26,4 \quad \text{у.о.},$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01\omega}{T_{\vartheta}}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314}{26,4}} = 1,89.$$

Якщо T_{ϑ} у іменованих одиницях, то

$$T_{\vartheta(c)} = \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{0,264}{\omega \cdot 0,01} = \frac{0,264}{314 \cdot 0,01} = 0,084 \quad \text{с.}$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\vartheta}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,084}} = 1,89.$$

Ударний струм визначається за формулою (4.14)

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{\Sigma}'' = 1,89 \cdot \sqrt{2} \cdot 41,87 = 111,91 \text{ кА.}$$

4.5.5 Визначення значення струму КЗ, що діє, за перший період, теплового імпульсу і потужності КЗ

Значення струму КЗ, що діє, за перший період його зміни

$$I_y = I_{\Sigma}'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = 41,87 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,89 - 1)^2} = 67,3 \text{ кА.}$$

А.

Тепловий імпульс струму КЗ

$$B_k = I_{nk}''^2 (t_{отк} + T_{\vartheta}) = 41,87^2 \cdot (0,1 + 0,084) = 322,57 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Потужність у момент часу $t = 0,1$ с (час відключення КЗ)

$$S_{k(0,1)} = \sqrt{3} U_{ср.н} I_{\Sigma(0,1)} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 37,35 = 7440 \text{ МВА.}$$

4.5.6 Розрахунок залишкової напруги при трифазному КЗ

Залишкова напруга на шинах СН автотрансформатора (у точці К4):

$$U_{CH} = U_c - I_c''(x_{13} + x_{12} + x_{11}) = 1 - 0,34 \cdot (1 + 1,84 - 0,08) = 0,062$$

або $U_{CH} = U_{K3} + I_c'' x_{10} = 0 + 0,34 \cdot 0,181 = 0,062$.



У іменованих одиницях: $U_{CH} = \frac{U_{cp.n}}{\sqrt{3}} U_{CH} = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot 0,062 = 4,12$ кВ.

Залишкова напруга в точці К5:

$$U_{K5} = E_1'' - \frac{I_{cm1}''}{2} x_5 = 1,114 - \frac{0,71}{2} \cdot 1,615 = 0,567.$$

У іменованих одиницях: $U_{K5} = \frac{U_{cp.n}}{\sqrt{3}} U_{K5} = \frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,567 = 3,44$ кВ.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

5. РОЗРАХУНОК НЕСИМЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

5.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Розрахунок режиму при несиметричному КЗ заснований на використанні методу симетричних складових, відповідно до якого струм і напруга у фазах визначаються як геометрична сума струмів або напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей [2, 3, 7].

Враховуючи, що повний струм в місці КЗ, а також струми зворотної і нульової послідовностей при несиметричному КЗ пропорційні струму прямої послідовності, основне завдання розрахунку несиметричних КЗ полягатиме у визначенні струму прямої послідовності. У свою чергу, струм прямої послідовності будь-якого несиметричного КЗ може бути визначений як струм при трифазному КЗ в крапці, віддаленій від дійсної точки КЗ на додаткову реактивність $x_{\Delta}^{(n)}$ визначувану видом КЗ.

Якщо не враховувати дугу в точці КЗ (металеве КЗ), то правило еквівалентності прямої послідовності має вигляд

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}''}{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad (5.1)$$

де $I_{K1}^{(n)}$ – струм прямої послідовності в точці КЗ;

E_{Σ}'' – результуюча ЕРС схеми прямої послідовності;

$x_{1\Sigma}$ – результуючий опір схеми прямої послідовності

щодо точки КЗ;

$x_{\Delta}^{(n)}$ – додаткова реактивність, визначувана видом КЗ.

Для розрахунку несиметричних КЗ використовують комплексні схеми заміщення [2]. Кожен вид КЗ характеризується відповідною комбінацією схем заміщення прямою, зворотної і нульової послідовностей і визначається співвідношенням симетричних струмів, що становлять, і напруги для особливої фази. Як окремі симетричні складові, так і повні величини струмів і напруги носять комплексний характер. У виразі (5.1) і надалі для спрощення запису крапки над комплексними величинами ставитися не будуть.

Особливою прийнято називати фазу, яка знаходиться в особливих умовах по відношенню до двох інших фаз. За особливу в розрахунках завжди приймають фазу А. Всі подальші співвідношення методу симетричних складових даються для фази А.

Для розрахунку симетричних КЗ $K^{(3)}$ використовується тільки схема заміщення прямої послідовності. При цьому, незалежно від точки КЗ, вона зводиться до еквівалентної схеми, яка вказана на рисунку 5.1.

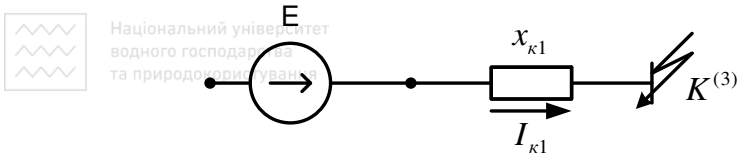


Рис. 5.1. Еквівалентна схема заміщення для розрахунку $K^{(3)}$

Розрахунок двофазного КЗ $K^{(2)}$ проводиться за допомогою схем заміщення прямої і зворотної послідовностей. Еквівалентна схема заміщення для даного випадку зображена на рисунку 5.2.

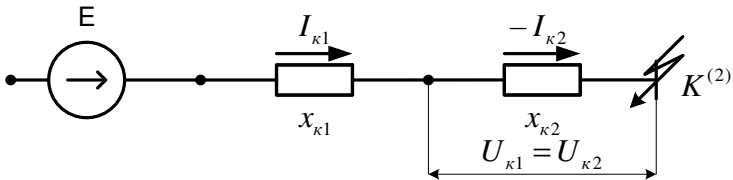


Рис. 5.2. Еквівалентна схема заміщення для розрахунків двофазного короткого замикання

Для розрахунку струмів і напруги при двофазному КЗ на землю $K^{(1.1)}$ необхідно використовувати схеми заміщення всіх трьох послідовностей. Розрахункова схема заміщення для цього випадку зображена на рисунку 5.3.

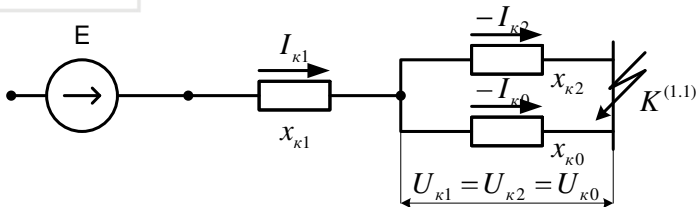


Рис. 5.3. Еквівалентна схема заміщення для розрахунків двофазного короткого замикання на землю

Розрахунок струмів і напруги однофазного КЗ $K^{(1)}$ у системі із заземленими нейтраліми також проводиться за допомогою схем заміщення всіх трьох послідовностей. Розрахункова схема для цього виду КЗ показана на рисунку 5.4.

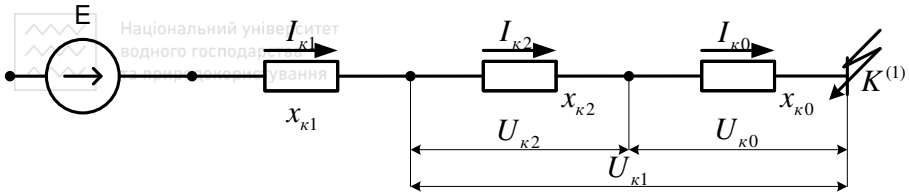


Рис. 5.4. Еквівалентна схема заміщення для розрахунків однофазного короткого замикання на землю

При розрахунках всіх видів несиметричних коротких замикань, відповідно до правила еквівалентності прямої послідовності, досить визначити лише пряму послідовність струму $I_{\kappa 1}$. Решта всіх розрахункових величин виражається через $I_{\kappa 1}$ і дані в таблиці 5.1.

Для визначення струму прямої послідовності потрібно заздалегідь знайти результуючі реактивності схем зворотної і нульової послідовностей і додаткові реактивності, залежні від вигляду КЗ ($x_{\Delta}^{(n)}$), які визначаються за таблицею 5.2.

Модуль повного струму в місці КЗ визначається як

$$I_{\kappa}^{(n)} = m^{(n)} I_{\kappa 1}^{(n)}, \quad (5.2)$$

де $m^{(n)}$ – коефіцієнт, залежний від виду КЗ (табл. 5.2).

Напряга прямої послідовності визначається за відомим значенням додаткової реактивності

$$U_{\kappa 1}^{(n)} = x_{\Delta}^{(n)} I_{\kappa 1}^{(n)}. \quad (5.3)$$

Напряга окремих послідовностей в місці КЗ визначається відповідно до рівнянь другого закону Кірхгофа [2]:

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa 1}^{(n)} &= E_{0\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{\kappa 1}^{(n)} \\ U_{\kappa 2}^{(n)} &= 0 - jx_{2\Sigma} I_{\kappa 2}^{(n)} \\ U_{\kappa 0}^{(n)} &= 0 - jx_{0\Sigma} I_{\kappa 0}^{(n)} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

або виражаються через основні співвідношення згідно з таблицею 5.1.

Таблиця 5.1

Основні співвідношення методу симетричних складових

Визначувані величини	Вид короткого замикання			
	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1.1)}$
$I_{K2}^{(n)}$	0	$-I_{\kappa 1}$	$I_{\kappa 1}$	$-I_{\kappa 1} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$I_{K0}^{(n)}$	0	0	$I_{\kappa 1}$	$-I_{\kappa 1} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$U_{K2}^{(n)}$	0	$U_{\kappa 1}$	$-jx_{2\Sigma} I_{\kappa 1}$	$U_{\kappa 1}$
$U_{K0}^{(n)}$	0	Значення до КЗ	$-jx_{0\Sigma} I_{\kappa 1}$	$U_{\kappa 1}$

Таблиця 5.2

Розрахункові співвідношення додаткової реактивності $x_{\Delta}^{(n)}$ і коефіцієнта $m^{(n)}$ залежних від вигляду КЗ

	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1.1)}$
$x_{\Delta}^{(n)}$	0	$x_{2\Sigma}$	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	$\frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

5.2 Визначення залишкової напруги при несиметричному КЗ

Складові напруги окремих послідовностей в заданому вузлі схеми можна визначати підсумовуванням (з урахуванням знаків) напруги відповідних послідовностей в місці КЗ і падінь напруги в опорах, включених в схемах кожної послідовності між точкою КЗ і вузлом, що цікавить m за співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} U_{1m}^{(n)} &= U_{\kappa 1}^{(n)} + jx_{\kappa 1m} I_{\kappa 1m}^{(n)} \\ U_{2m}^{(n)} &= U_{\kappa 2}^{(n)} + jx_{\kappa 2m} I_{\kappa 2m}^{(n)} \\ U_{0m}^{(n)} &= U_{\kappa 0}^{(n)} + jx_{\kappa 0m} I_{\kappa 0m}^{(n)} \end{aligned} \right\}, \quad (5.5)$$

де $I_{\kappa 1m}^{(n)}$, $I_{\kappa 2m}^{(n)}$, $I_{\kappa 0m}^{(n)}$ – струми відповідних послідовностей, що протікають по опорах $x_{\kappa 1m}$, $x_{\kappa 2m}$, $x_{\kappa 0m}$; $I_{\kappa 2m}^{(n)}$.

У розрахунках методом еквівалентних перетворень зручніше визначати напругу окремих послідовностей в заданій точці системи за падінням напруги на елементі.

Для визначення струмів $I_{\kappa 1m}^{(n)}$, $I_{\kappa 2m}^{(n)}$, $I_{\kappa 0m}^{(n)}$ необхідно визначити струморозподіл в межах схем заміщення кожної послідовності. Для схеми зворотної послідовності допускається застосовувати коефіцієнти розподілу, знайдені для схеми заміщення прямої послідовності. При розрахунку всі величини, що входять в формули повинні бути виражені в одноіменних одиницях – відносних, або іменованих. При переводі в іменовані одиниці слід користуватися співвідношенням

$$x_{(Om)} = x_* \frac{U_{\delta}^2}{S_{\delta}}. \quad (5.6)$$

Залишкова напруга визначається за окремими послідовностями з подальшим векторним підсумовуванням для знаходження повних величин, причому у міру віддалення від точки КЗ напруга прямої послідовності збільшується, а напруга зворотної і нульової послідовностей зменшується.

Залишкова напруга прямої, зворотної і нульової послідовностей визначається згідно з рисунком 5.5 за формулами:

$$U_{ocm1} = E - I_1 x_{c1}, \quad (5.7)$$

$$U_{ocm2} = I_2 x_{c2}, \quad (5.8)$$

$$U_{ocm0} = I_0 x_{c0}. \quad (5.9)$$

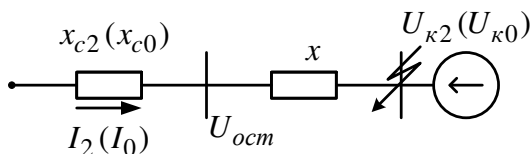


Рис. 5.5 Розрахункова схема

5.3 ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗНИХ ВЕЛИЧИН І ПОБУДОВА ВЕКТОРНИХ ДІАГРАМ

Оскільки знайдені значення визначають струми напруги окремих послідовностей для особливої фази, то для визначення струмів і напруги в інших фазах використовується оператор повороту $a = 1e^{j120^\circ}$ і $a^2 = 1e^{j240^\circ}$. Для струмів і напруги фаз А, В і С маємо:

$$I_{KA}^{(n)} = I_{\kappa 1}^{(n)} + I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)}$$



$$\begin{aligned}I_{\kappa B}^{(n)} &= a^2 I_{\kappa 1}^{(n)} + a I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\I_{\kappa C}^{(n)} &= a I_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)}, \\U_{\kappa A}^{(n)} &= U_{\kappa 1}^{(n)} + U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)}. \\U_{\kappa B}^{(n)} &= a^2 U_{\kappa 1}^{(n)} + a U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \\U_{\kappa C}^{(n)} &= a U_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)}\end{aligned}$$

Струм, що протікає в землі при $K^{(1)}$ і $K^{(1.1)}$ визначається як

$$I_z = 3I_{\kappa 0}^{(n)}. \quad (5.11)$$

На основі отриманих значень симетричних складових будуються векторні діаграми струмів і напруг як окремих послідовностей, так і повних величин. Побудову векторних діаграм слід провести для точки короткого замикання. Окрім цього, будують векторні діаграми залишкової напруги для заданої точки системи. При трансформації окремих послідовностей необхідно враховувати групу з'єднання обмоток трансформатора [2]. Так при групі з'єднання зірка-трикутник – вектор прямої послідовності повертається на 30° проти годинникової стрілки, а вектор зворотної послідовності – на 30° за годинниковою. При цьому генератор сприймає однофазне КЗ як двофазне. Побудову слід провести в іменованих одиницях з вказанням масштабу. Векторні діаграми напруги повинні вписуватися в трикутник лінійних напруг. Центр трикутника визначається напругою зсуву нейтралі (U_0). Фазні величини трикутника лінійної напруги в іменованих одиницях визначаються за виразом

$$U_\phi = E_{*\Sigma} \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3}}.$$

Векторні діаграми струмів і напруг в місці КЗ представлені на рисунках 5.6, 5.7, 5.8 для різних видів несиметричних КЗ.

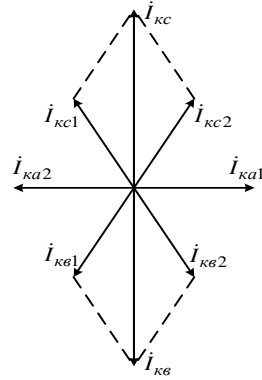
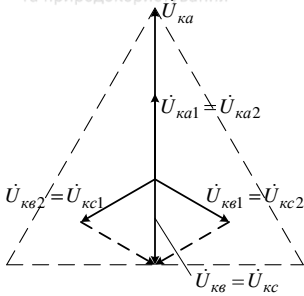


Рис. 5.6. Векторні діаграми струмів і напруги в точці КЗ при двофазному короткому замиканні

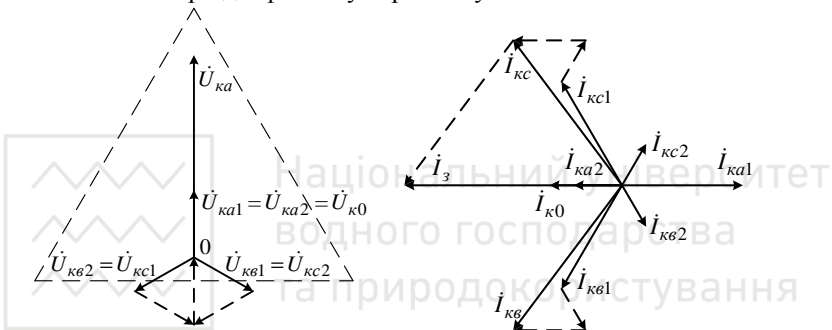


Рис. 5.7. Векторні діаграми струмів і напруги в точці КЗ при двофазному короткому замиканні на землю

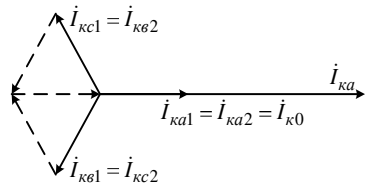
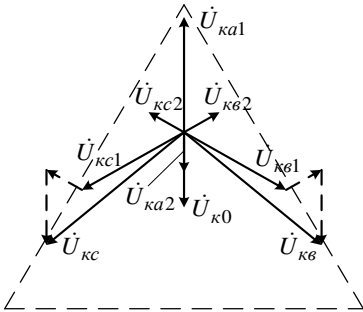


Рис. 5.8. Векторні діаграми струмів і напруги в точці КЗ при однофазному короткому замиканні



5.4 ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНИХ КЗ

МЕТОДОМ ТИПОВИХ КРИВИХ

Використання методу типових кривих для розрахунку несиметричних КЗ засноване на правилі еквівалентності прямої послідовності. Розрахунок проводиться для прямої послідовності струму КЗ окремо для кожного джерела. Визначається аналітично початковий струм прямої послідовності окремого джерела $I_{\kappa 1 i}^{n(n)}$ за формулою $I_{\kappa 1 i}^{n(n)} = \frac{E_i}{x_{1i} + x_{\Delta i}^{(n)}}$ де $x_{\Delta i}^{(n)}$ визначається за таблицею 5.2.

При цьому $x_{2i} = \frac{x_{2\Sigma}}{C_{2i}} = x_{\kappa 2i}$ $x_{0i} = \frac{x_{0\Sigma}}{C_{0i}} = x_{\kappa 0i}$, де C_{2i} і C_{0i} –

коефіцієнти розподілу для схем зворотної і нульової послідовностей відповідно.

Потім визначається віддаленість КЗ знаходженням розрахункового

коефіцієнта $\alpha_i = \frac{I_{\kappa 1 i}}{I_{n i}}$. Для набутого значення α_i за типовими кривими

визначається зміна початкового значення струму прямої послідовності генератора і струму КЗ до заданого моменту часу $\gamma_i = \frac{I_{\kappa 1 i}^{(n)}}{I_{\kappa 1 i}^{n(n)}}$ і знаходиться

необхідна величина такою, що періодичною складає струму КЗ у момент часу t джерела

$$I_{\kappa i t}^{(n)} = m^{(n)} I_{\kappa 1 i}^{n(n)} \gamma_i.$$

Струм від системи вважається незмінним в часі і підсумовується з набутих для заданого моменту часу значень струму для решти джерел

$$I_{\kappa \Sigma t}^{(n)} = \Sigma I_{\kappa i t}^{(n)}.$$

5.5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНОГО КЗ В КУРСОВІЙ РОБОТІ

Необхідно скласти і перетворити схеми заміщення окремих послідовностей і виконати розрахунок несиметричних коротких замикань.

5.5.1 Складання і перетворення схем окремих послідовностей

Схема заміщення зворотної послідовності за структурою аналогічна схемі заміщення прямої послідовності, але не містить ЕРС, а опори елементів вважаються постійними для будь-якого моменту часу. Генератори вводяться в схему своїми опорами зворотній послідовності (X_2).

Складається схема заміщення зворотної послідовності (рис. 5.9).

Опори зворотній послідовності для генераторів з приведенням їх значення до базисних величин:

$$x_{26} = \frac{\left(x_2 \frac{S_{\sigma} \cos \varphi_H}{P_H} \right)}{n} = \frac{0,238 \cdot \frac{2000 \cdot 0,85}{300}}{4} = 0,337,$$

$$x_{27} = 0,986, \quad x_{28} = 0,66.$$

Схема заміщення зворотної послідовності згортається аналогічно схемі заміщення прямої послідовності.

Розрахунок (рис. 5.10):

$$x_{29} = x_{26} + x_2 = 0,337 + 0,131 = 0,468,$$

$$x_{30} = x_4 + x_{27} = 0,525 + 0,986 = 1,511,$$

$$x_{32} = x_{29} + x_{18} = 0,468 + 0,104 = 0,572,$$

$$x_{33} = x_{19} + x_{30} = 0,046 + 1,511 = 1,557.$$

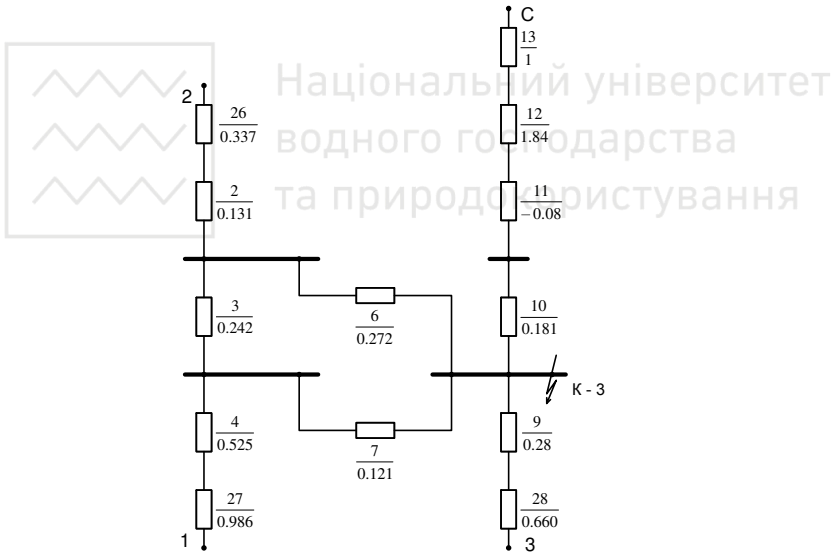


Рис. 5.9. Схема заміщення зворотної послідовності

Розрахунок (рис. 5.11):

$$x_{34} = \frac{x_{32} x_{33}}{x_{32} + x_{33}} = \frac{0,572 \cdot 1,557}{0,572 + 1,557} = 0,457,$$

$$x_{35} = \frac{x_{16} x_{31}}{x_{16} + x_{31}} = \frac{2,941 \cdot 0,94}{2,941 + 0,94} = 0,712,$$



$$x_{36} = x_{20} + x_{34} = 0,418 + 0,052 = 0,470.$$

$$x_{2\Sigma} = \frac{x_{36} \cdot x_{35}}{x_{36} + x_{35}} = \frac{0,470 \cdot 0,712}{0,470 + 0,712} = 0,283.$$

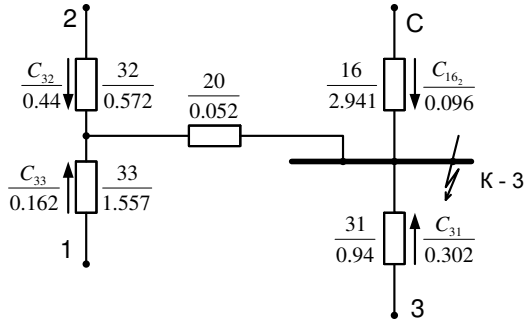


Рис. 5.10

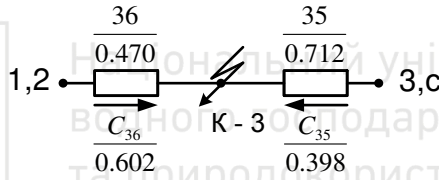


Рис. 5.11

Коефіцієнти розподілу від одиничного струму.

Розрахунок (рис. 5.11):

$$c_{35} = \frac{x_{2\Sigma}}{x_{35}} = \frac{0,283}{0,712} = 0,398,$$

$$c_{36} = \frac{x_{2\Sigma}}{x_{36}} = \frac{0,283}{0,470} = 0,602.$$

Розрахунок (рис. 5.10):

$$c_{32} = \frac{x_{34}}{x_{32}} c_{36} = \frac{0,418}{0,572} \cdot 0,602 = 0,44, \quad c_{33} = \frac{x_{34}}{x_{33}} c_{36} = \frac{0,418}{1,557} \cdot 0,602 = 0,162,$$

$$c_{31} = \frac{x_{35}}{x_{31}} c_{35} = \frac{0,712}{0,94} \cdot 0,398 = 0,302, \quad c_{16_2} = \frac{x_{35}}{x_{16}} c_{35} = \frac{0,712}{2,941} \cdot 0,398 = 0,096.$$

Виконується перевірка:

$$c_{32} + c_{33} + c_{31} + c_{16_2} = 0,44 + 0,162 + 0,302 + 0,096 = 1.$$

Визначаються взаємні опори зворотній послідовності для станцій і системи (рис. 5.12)

$$x_{2c} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{16_2}} = \frac{0,283}{0,096} = 2,941, \quad x_{21} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{33}} = \frac{0,283}{0,162} = 1,747,$$

$$x_{22} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{32}} = \frac{0,283}{0,44} = 0,643, \quad x_{23} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{31}} = \frac{0,283}{0,302} = 0,94.$$

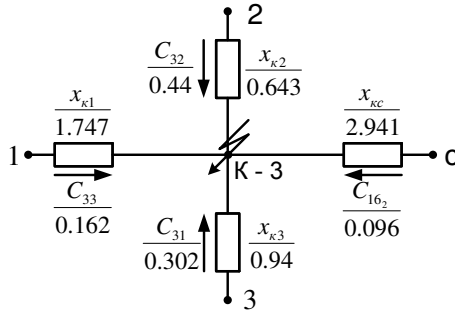


Рис. 5.12. Розділення джерел схеми зворотній послідовності

Схема заміщення нульової послідовності визначається трансформаторами, що беруть участь в схемі, і характером з'єднання їх обмоток. Струми нульової послідовності протікають через трансформатори, нейтралі яких заземлені. Генератори не беруть участь в схемі, оскільки виявляються віддаленими від шляхів протікання струмів нульової послідовності. Для автотрансформатора враховується обмотка НН.

Складається початкова схема заміщення нульової послідовності.

У схемі (рис. 5.13) $x_c = 0$ і всі нейтралі заземлені.

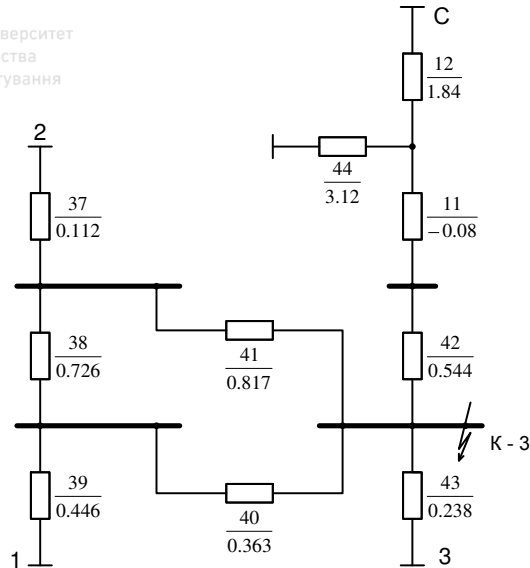


Рис. 5.13. Схема заміщення нульової послідовності

Якщо на станції № 1 нейтраль одного трансформатора не заземлено

($P1'$ – розімкнений), то схема змінить свій вигляд (рис. 5.14).

Визначаються параметри елементів схеми заміщення (рис. 5.13).

Трансформатори:

$$x_{37} = x_2 \cdot 0,85 = 0,131 \cdot 0,85 = 0,112,$$

$$x_{39} = x_4 \cdot 0,85 = 0,525 \cdot 0,85 = 0,446,$$

$$x_{43} = x_9 \cdot 0,85 = 0,28 \cdot 0,85 = 0,238.$$

Лінії:

$$x_{38} = x_{y\partial 0} L \frac{S_{\sigma}}{U_{нсп}^2} = 1,2 \cdot 4 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,726, \quad x_{40} = 1,2 \cdot 2 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,363,$$

$$x_{41} = 1,2 \cdot 4,5 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,817, \quad x_{42} = 1,2 \cdot 3 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,544,$$

$$\text{де } x_{y\partial 0} = 3x_{y\partial 1} = 3 \cdot 0,4 = 1,2.$$

Розрахунок (рис. 5.15):

$$x_{45} = x_{11} + \frac{x_{12}x_{44}}{x_{12} + x_{44}} = -0,08 + \frac{1,84 \cdot 3,12}{1,84 + 3,12} = 1,077,$$

$$x_{46} = \frac{x_{38}x_{41}}{x_{38} + x_{40} + x_{41}} = \frac{0,726 \cdot 0,817}{0,726 + 0,363 + 0,817} = 0,311,$$

$$x_{47} = 0,156,$$

$$x_{48} = 0,138.$$

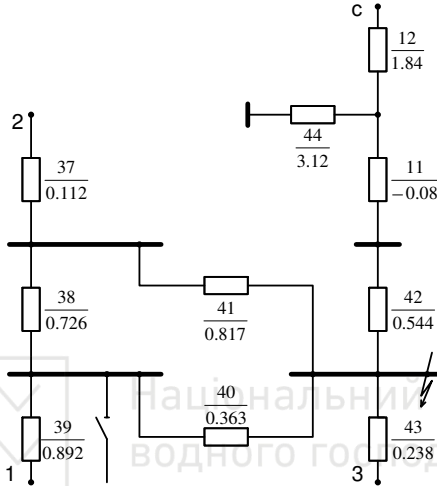


Рис. 5.14

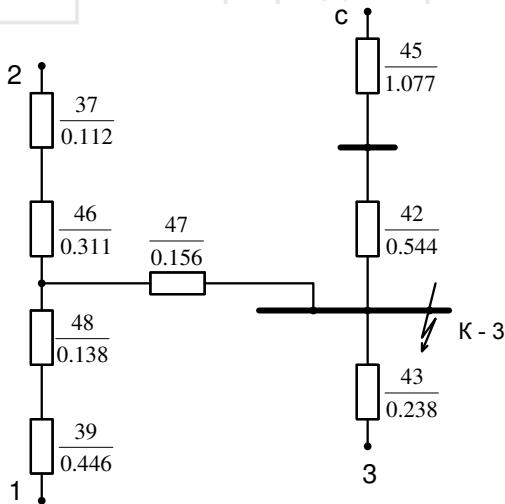


Рис. 5.15

Розрахунок (рис. 5.16):

$$x_{49} = x_{37} + x_{46} = 0,112 + 0,311 = 0,423,$$



$$x_{50} = x_{48} + x_{39} = 0,138 + 0,446 = 0,585,$$

$$x_{51} = x_{45} + x_{42} = 1,077 + 0,544 = 1,621.$$

Розрахунок (рис. 5.17):

$$x_{52} = \frac{x_{49} \cdot x_{50}}{x_{49} + x_{50}} = \frac{0,423 \cdot 0,585}{0,423 + 0,585} = 0,245, \quad x_{53} = \frac{x_{51} \cdot x_{43}}{x_{51} + x_{43}} = \frac{1,621 \cdot 0,238}{1,621 + 0,238} = 0,208.$$

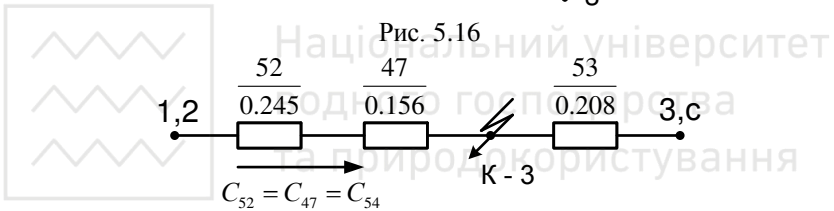
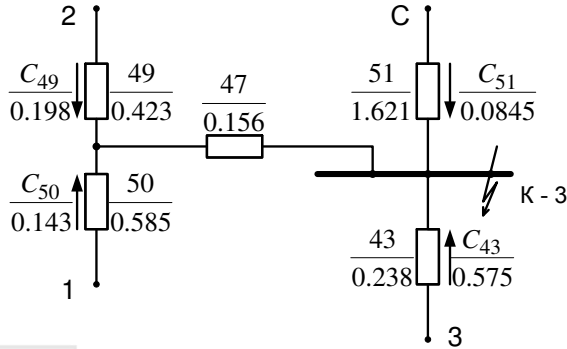


Рис. 5.17

Розрахунок (рис. 5.18):

$$x_{54} = x_{52} + x_{47} = 0,245 + 0,156 = 0,401.$$

Розрахунок (рис. 5.19):

$$x_{0\Sigma} = \frac{x_{54} \cdot x_{53}}{x_{54} + x_{53}} = \frac{0,401 \cdot 0,208}{0,401 + 0,208} = 0,137.$$

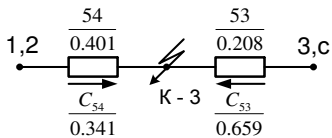


Рис. 5.18

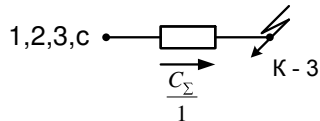


Рис. 5.19

Коефіцієнти розподілу від одиничного струму для нульової послідовності
Розрахунок (рис. 5.18–5.16):

$$c_{53} = \frac{x_{0\Sigma}}{x_{53}} = \frac{0,137}{0,208} = 0,659, \quad c_{54} = \frac{x_{0\Sigma}}{x_{54}} = \frac{0,137}{0,401} = 0,341.$$

$$c_{51} = \frac{x_{53}}{x_{51}} c_{53} = \frac{0,208}{1,621} \cdot 0,659 = 0,0845, \quad c_{43} = \frac{x_{53}}{x_{43}} c_{53} = \frac{0,208}{0,238} \cdot 0,659 = 0,575.$$

$$c_{49} = \frac{x_{52}}{x_{49}} c_{54} = \frac{0,245}{0,423} \cdot 0,341 = 0,198, \quad c_{50} = \frac{x_{52}}{x_{50}} c_{54} = \frac{0,245}{0,585} \cdot 0,341 = 0,143.$$

Виконується перевірка

$$c_{51} + c_{43} + c_{49} + c_{50} = 0,0845 + 0,575 + 0,198 + 0,143 = 1.$$

Визначаються взаємні опори нульовій послідовності для станцій і системи (рис. 5.20):

$$x_{0c} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{51}} = \frac{0,137}{0,0845} = 1,621, \quad x_{01} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{50}} = \frac{0,137}{0,143} = 0,958,$$

$$x_{02} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{49}} = \frac{0,137}{0,198} = 0,692, \quad x_{03} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{43}} = \frac{0,137}{0,575} = 0,238.$$

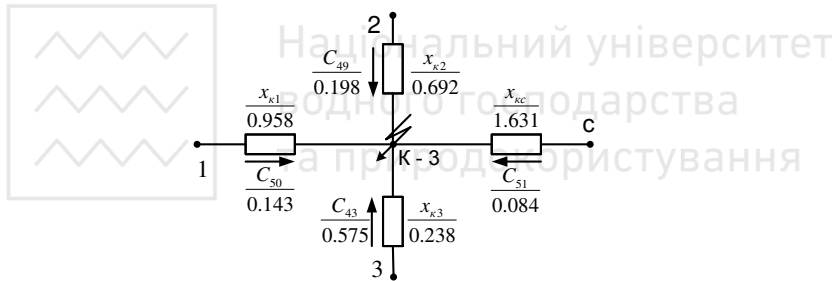


Рис. 5.20. Розділення джерел для нульовій послідовності

5.5.2 Визначення значень симетричних складових і повних фазних величин в точці КЗ

Визначаємо значення симетричних струмів, що становлять, і напруги в місці КЗ і їх повні фазні величини для початкового моменту часу.

Для двофазного КЗ на землю:

$$\text{Додатковий опір } x_{\Delta}^{(1.1)} = \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{0,283 \cdot 0,137}{0,283 + 0,137} = 0,092.$$

Значення коефіцієнта:

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,283 \cdot 0,137}{(0,283 + 0,137)^2}} = 1,53.$$

Струм прямої послідовності в місці КЗ:



$$I_{\kappa 1}^{(1,1)} = \frac{E_{\Sigma}''}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(1,1)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,092} = 3,089.$$

Струми зворотної і нульової послідовностей визначаються згідно з табл.

5.1:

$$I_{\kappa 2}^{(1,1)} = -I_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -3,089 \cdot \frac{0,137}{0,283 + 0,137} = -1,006,$$

$$I_{\kappa 0}^{(1,1)} = -I_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -3,089 \cdot \frac{0,283}{0,283 + 0,137} = -2,083.$$

Модуль повного струму в місці КЗ:

$$I_{\kappa}^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{\kappa 1}^{(1,1)} I_{\sigma} = 1,53 \cdot 3,089 \cdot 10,041 = 47,45 \text{ кА.}$$

$$\text{Струм в землі: } I_3^{(1,1)} = 3I_{0\Sigma}^{(1,1)} = 3 \cdot 2,083 \cdot 10,041 = 62,75 \text{ кА.}$$

Напряга окремих послідовностей в місці КЗ:

$$U_{\kappa 1}^{(1,1)} = x_{\Delta}^{(1,1)} I_{\kappa 1}^{(1,1)} = 0,092 \cdot 3,089 = 0,285,$$

$$U_{\kappa 2}^{(1,1)} = -I_{\kappa 2}^{(1,1)} x_{2\Sigma} = -(-1,006) \cdot 0,283 = 0,285,$$

$$U_{\kappa 0}^{(1,1)} = -I_{\kappa 0}^{(1,1)} x_{0\Sigma} = -(-2,083) \cdot 0,137 = 0,285.$$

$$\text{У іменованих одиницях } U_{\kappa}^{(1,1)} = U_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3}} = 0,285 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 18,92 \text{ кВ.}$$

Повні фазні величини:

$$U_{\kappa A}^{(1,1)} = U_{\kappa 1}^{(1,1)} + U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 18,92 + 18,92 + 18,92 = 56,76 \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa B}^{(1,1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1,1)} + a U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 0;$$

$$U_{\kappa C}^{(1,1)} = a U_{\kappa 1}^{(1,1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 0.$$

Для однофазного КЗ:

$$\text{Додатковий опір } x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 0,283 + 0,137 = 0,42.$$

Значення коефіцієнта $m^{(1)} = 3$.

Струм прямої послідовності в місці КЗ:

$$I_{\kappa 1}^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}''}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,42} = 1,608.$$

Струми зворотної і нульової послідовностей визначаються згідно з таблицею 5.1:

$$I_{\kappa 2}^{(1)} = I_{\kappa 1}^{(1)} = 1,608, \quad I_{\kappa 0}^{(1)} = I_{\kappa 1}^{(1)} = 1,608.$$

Модуль повного струму в місці КЗ рівний струму в землі:

$$I_{\kappa}^{(1)} = m^{(1)} I_{\kappa 1}^{(1)} I_{\sigma} = 3 \cdot 1,608 \cdot 10,041 = 48,44 \text{ кА.}$$

$$I_{\Sigma}^{(1)} = 3 I_{0\Sigma}^{(1)} = 3 \cdot 1,608 \cdot 10,041 = 48,44 \text{ кА.}$$

Напряга окремих послідовностей в місці КЗ:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = x_{\Delta}^{(1)} I_{\kappa 1}^{(1)} = 0,42 \cdot 1,608 = 0,675,$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{\kappa 1}^{(1)} x_{2\Sigma} = -1,608 \cdot 0,283 = -0,455,$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -I_{\kappa 1}^{(1)} x_{0\Sigma} = -1,608 \cdot 0,137 = -0,22.$$

У іменованих одиницях:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3}} = 0,675 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 44,82 \text{ кВ}$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = U_{\kappa 2}^{(1)} \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3}} = -0,455 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -30,21 \text{ кВ}$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = U_{\kappa 0}^{(1)} \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3}} = -0,22 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -14,61 \text{ кВ.}$$

Повні фазні величини:

$$U_{\kappa A}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = 44,82 - 30,21 - 14,61 = 0;$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1)} + a U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j240} 44,82 - e^{j120} 30,21 - 14,61 = 68,6e^{j251,4} \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j120} 44,82 - e^{j240} 30,21 - 14,61 = 68,6e^{j108,6} \text{ кВ.}$$

Для двофазного КЗ:

$$\text{Додатковий опір } x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 0,283.$$

$$\text{Значення коефіцієнта } m^{(2)} = \sqrt{3}.$$

Струм прямої послідовності в місці КЗ

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{E_{\Sigma}''}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,283} = 2,01.$$

Струми окремих послідовностей визначаються згідно з табл. 5.1:



Національний університет водного господарства
 $I_{\kappa 2}^{(2)} = -I_{\kappa 1}^{(2)} = -2,01, I_{\kappa 0}^{(2)} = 0.$

Модуль повного струму в місці КЗ:

$$I_{\kappa}^{(2)} = m^{(2)} I_{\kappa 1}^{(2)} I_{\delta} = \sqrt{3} \cdot 2,01 \cdot 10,041 = 34,96 \text{ кА.}$$

Напряга окремих послідовностей в місці КЗ:

$$U_{\kappa 1}^{(2)} = x_{\Delta}^{(2)} I_{\kappa 1}^{(2)} = 0,283 \cdot 2,01 = 0,569,$$

$$U_{\kappa 2}^{(2)} = -I_{\kappa 2}^{(2)} x_{2\Sigma} = -(-2,01) \cdot 0,283 = 0,569, U_{\kappa 0}^{(2)} = 0.$$

У іменованих одиницях:

$$U_{\kappa 1(2)}^{(2)} = U_{\kappa 2(2)}^{(2)} = U_{\kappa 1}^{(2)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,569 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 37,78 \text{ кВ.}$$

$$U_{\kappa A}^{(2)} = U_{\kappa 1}^{(2)} + U_{\kappa 2}^{(2)} = 2U_{\kappa 1}^{(2)} = 2 \cdot 37,78 = 75,56 \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa B}^{(2)} = U_{\kappa C}^{(2)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(2)} + a U_{\kappa 2}^{(2)} = (a^2 + a) U_{\kappa 1}^{(2)} = -37,78 \text{ кВ.}$$

Набутих в результаті розрахунку фазних значень симетричних струмів напруги, що становлять, в місці КЗ використовуються для побудови в масштабі векторних діаграм (рис. 5.6–5.8).

5.5.3 Визначення залишкової напруги при несиметричному КЗ

Залишкова напруга визначається за рекомендаціями розділу 5.2 для точок К4 і К5 при короткому замиканні в точці КЗ розрахункового варіанту за окремими послідовностями з подальшим векторним підсумовуванням для знаходження повних величин. Залишкова напруга прямої, зворотної і нульової послідовностей визначається за формулами (5.7) (5.8) (5.9).

Для однофазного КЗ фазна напруга окремих послідовностей:

Точка К4:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + I_{c1}^{(1)} x_{10} = 0,675 + 0,131 \cdot 0,181 = 0,7;$$

$$\text{де: } I_{c1}^{(1)} = \frac{U_c}{x_{cK}^{(1)}} = \frac{1}{7,62} = 0,131 \text{ при } x_{\kappa C}^{(1)} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_{16}} = \frac{0,264 + 0,42}{0,0898} = 7,62.$$

Напруга прямої послідовності більша, ніж в точці КЗ.

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{\kappa 2}^{(1)} c_{16_2} x_{55} = -1,608 \cdot 0,096 \cdot 2,76 = -0,426;$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -I_{\kappa 0}^{(1)} c_{51} x_{45} = -1,608 \cdot 0,084 \cdot 1,077 = -0,145;$$

Напруги зворотної і нульової послідовностей менше, ніж в точці КЗ.

Фазні значення окремих послідовностей в іменованих одиницях:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,7 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 46,5 \text{ кВ}$$



$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -0,426 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -28,3 \text{ кВ}$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -0,145 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -9,6 \text{ кВ.}$$

Повні фазні величини:

$$U_{\kappa A}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = 46,5 - 28,3 - 9,6 = 8,6 \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1)} + a U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(n)} = e^{j240} 46,5 - e^{j120} 28,3 - 9,6 = 67,5 e^{j253,9} \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j120} 46,5 - e^{j240} 28,3 - 9,6 = 67,5 e^{j106,1} \text{ кВ.}$$

Точка К5:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = E_1'' - I_{cm11}^{(1)} x_5' / 2 = 1,114 - 0,27 \cdot 1,615 / 2 = 0,896;$$

де приблизно: $I_{cm11}^{(1)} = I_{\kappa 1}^{(1)} c_{23} = 1,608 \cdot 0,168 = 0,27$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{\kappa 2}^{(1)} c_{33} x_{27}' / 2 = -1,608 \cdot 0,162 \cdot 1,972 / 2 = -0,257;$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = 0$$

Фазні значення в іменованих одиницях:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}} = 0,896 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 5,43 \text{ кВ}$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -0,257 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = -1,56 \text{ кВ}$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = 0$$

Повні величини:

При трансформації окремих послідовностей в точці К5 необхідно враховувати групу з'єднання обмоток трансформатора згідно з розділом 5.3.

$$U_{\kappa A}^{(1)} = e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} = e^{j30} 5,43 - e^{-j30} 1,56 = 4,84 e^{-j46,2} \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + a e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} = 6,99 \text{ кВ;}$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} =$$

$$= e^{j120} e^{j30} 5,43 - e^{j240} e^{-j30} 1,56 = 4,84 e^{-j313,8} \text{ кВ}$$

За визначеними значеннями симетричних складових будують в масштабі векторні діаграми для точок К4 і К5.

5.5.4 Розрахунок струму несиметричного КЗ для $t = 0,1 \text{ с}$ і $t = 3 \text{ с}$

Періодична складова струму несиметричного КЗ для моменту часу $t = 0,1 \text{ с}$ і $t = 3 \text{ с}$ знаходиться методом типових кривих (додат. Г).

Номінальні струми станцій в у.о. знайдені раніше: $I_{н1} = 0,235$, $I_{н2} = 0,706$, $I_{н3} = 0,3$. Розрахунок виконується для прямої послідовності струму КЗ окремо для кожного джерела. Визначається аналітично початковий струм прямої послідовності кожного джерела $I''_{к1i}^{(n)}$ за формулою $I''_{к1i}^{(n)} = \frac{E_i}{x_{Ki}}$, де

$$x_{Ki}^{(1)} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_i}. \quad c_i - \text{коєфіцієнт розподілу відповідного джерела для схеми}$$

прямої послідовності. Нижче наведено приклад розрахунку однофазного КЗ.

Визначаються взаємні опори станцій і системи

$$x_{K1}^{(1)} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_{23}} = \frac{0,264 + 0,42}{0,168} = 4,07, \quad x_{K2}^{(1)} = \frac{0,684}{0,453} = 1,51,$$

$$x_{K3}^{(1)} = \frac{0,684}{0,289} = 2,37, \quad x_{KC}^{(1)} = \frac{0,684}{0,0898} = 7,62.$$

Початковий струм прямої послідовності окремого джерела

$$I''_{к11}^{(1)} = \frac{E_1}{x_{K1}^{(1)}} = \frac{1,114}{4,07} = 0,274; \quad I''_{к12}^{(1)} = \frac{1,117}{1,51} = 0,49;$$

$$I''_{к13}^{(1)} = \frac{1,098}{2,37} = 0,463; \quad I''_{к1C}^{(1)} = \frac{1,0}{7,62} = 0,131.$$

При електричній віддаленості точки КЗ від джерела α відношення γ для моменту часу визначають за типовими кривими:

$$\alpha_1 = \frac{I''_{к11}^{(1)}}{I_{н1}} = \frac{0,274}{0,235} = 1,17, \quad \alpha_2 = \frac{0,49}{0,706} = 0,69, \quad \alpha_3 = \frac{0,463}{0,3} = 1,54.$$

$$\text{Для моменту часу } t = 0,1 \text{ с: } \gamma_1 = 0,97 \quad \gamma_2 = 0,97$$

$$\text{Для моменту часу } t = 3 \text{ с: } \gamma_1 = 1,0 \quad \gamma_2 = 1,0$$

Періодична складова прямої послідовності струму однофазного КЗ для моменту часу $t = 0,1$ с

$$I_{K11(0.1)}^{(1)} = I''_{к11}^{(1)} \gamma_1 = 0,274 \cdot 0,97 = 0,266; \quad I_{K12(0.1)}^{(1)} = 0,49 \cdot 0,97 = 0,475;$$

$$I_{K13(0.1)}^{(1)} = 0,463 \cdot 0,96 = 0,444; \quad I_{K1C(0.1)}^{(1)} = I_{K1C(3)}^{(1)} = I''_{к1C}^{(1)} = 0,131,$$

Сумарний струм однофазного короткого замикання для $t = 0,1$ с

$$I_{\Sigma(0.1)*}^{(1)} = 3I_{K1(0.1)}^{(1)} = 3(0,266 + 0,475 + 0,444 + 0,131) = 3,95,$$

$$I_{\Sigma(0.1)}^{(1)} = I_{\Sigma(0.1)*}^{(1)} I_{\sigma} = 3,95 \cdot 10,041 = 41,1 \text{ кА.}$$

Періодична складова прямої послідовності струму однофазного КЗ для моменту часу $t = 3$ с

$$I_{K11(3)}^{(1)} = I_{K11}^{(1)} \gamma_1 = 0,274 \cdot 1,0 = 0,274; \quad I_{K12(3)}^{(1)} = 0,49 \cdot 1,0 = 0,49;$$

$$I_{K13(3)}^{(1)} = 0,463 \cdot 0,95 = 0,44;$$

Сумарний струм однофазного короткого замикання для $t = 3$ с

$$I_{\Sigma(3)*}^{(1)} = 3I_{K1(3)}^{(1)} = 3(0,274 + 0,49 + 0,44 + 0,131) = 4,0;$$

$$I_{\Sigma(3)}^{(1)} = I_{\Sigma(0.1)*}^{(1)} I_a = 4,0 \cdot 10,041 = 41,64 \text{ кА.}$$



Національний університет
водного господарства
та природокористування



1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 152 с.
2. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебник для электрических и энергетических вузов и факультетов М. : Энергия, 1970. 520 с.
3. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ; М. : Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 283 с.
4. Справочник по проектированию электроснабжения промышленных предприятий / под ред. Ю. Г. Барыбина и др. М. : Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей : учеб. пособие для студентов вузов / В. М. Блок и др.; под ред. В. М. Блок. М. : Высш. школа, 1981. 304 с.
6. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам. М. : Госкомитет по стандартам, 1996. 85 с.
7. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т.1. / К.С. Демирчян и др. 4-е изд. СПб. : Питер, 2004. 463 с.
8. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие / под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. М. : Изд. Центр «Академия», 2005. 416 с.
9. Черемісін М. М. Перехідні процеси в системах електропостачання. Х. : Факт, 2005. 176 с.
10. Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен. Перехідні процеси в системах електропостачання. Національна гірнича академія України, 2003. 597 с.



ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ «Перехідні процеси в електроенергетиці»

Шифр: _____

Видано студенту _____ група _____

1. Для заданої схеми електричної мережі виконати розрахунок трифазного короткого замикання (КЗ) в одній точці.

Визначити:

- 1.1 пайову частину кожної електричної станції і системи в початковому струмі КЗ з використанням коефіцієнтів розподілу;
- 1.2 періодичну складову початкового струму КЗ від кожного джерела і сумарний струм трифазного КЗ;
- 1.3 періодичну складову струму трифазного КЗ для часу $t = 0,1 \text{ с}$ і $t = 3 \text{ с}$ методом типових кривих;
- 1.4 ударний струм КЗ;
- 1.5 відключаєму потужність КЗ;
- 1.6 тепловий імпульс;
- 1.7 залишкову напругу на шинах СН автотрансформатора і в точці К5.

2. Скласти і перетворити схеми заміщення окремих послідовностей і виконати розрахунок заданого виду несиметричного КЗ.

Визначити:

- 2.1 значення симетричних складових струмів і напруг в місці КЗ і їх повні фазні величини для початкового моменту часу;
 - 2.2 значення симетричних складових і повні фазні величини напруги на шинах СН автотрансформатора і в точці К5 для початкового моменту часу;
 - 2.3 періодичну складову струму несиметричного КЗ для часу $t = 0,1 \text{ с}$ і $t = 3 \text{ с}$ методом типових кривих;
3. Побудувати векторні діаграми струмів і напруги в місці КЗ, а також векторні діаграми напруги на шинах СН автотрансформатора і в точці К5.

Примітки:

1. Розрахунок провести у відносних одиницях при наближеному приведенні.
2. Вважати, що до КЗ генератори працювали в номінальному режимі. Опір навантаження не враховувати.
3. При визначенні ударного струму використовувати еквівалентну постійну часу.

Термін здачі «__» листопада ____ р.

Завдання видав «__» вересня ____ р.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які основні допущення прийняті при вирішенні завдань, поставлених в роботі?
2. Особливості використаного розрахункового методу, відмінності між розрахунковими методами.
3. Які основні допущення покладені в основу поняття про джерело «нескінченної потужності»?
4. Відмінності в наближеному і точному приведенні.
5. Як визначити струм КЗ від системи нескінченної потужності?
6. Які межі зміни ударного коефіцієнта в індуктивно-активному ланцюзі?
7. Які межі зміни відношення i_y / I_y ?
8. Вивести формулу $x_{*b} = x_{*n} \cdot \frac{S_b}{S_n}$.
9. Вивести формулу $x_{*cb} = x_{*n} \cdot \frac{S_b}{S_c''}$.
10. Вивести формулу $x_{*db} = x_{yd} \cdot \ell \cdot \frac{S_b}{U_n^2}$.
11. Вказати допущення, покладені в основу методів: типових кривих, розрахункових кривих, випрямлених характеристик.
12. У чому виражається умовність терміну значення струму КЗ, що «діє, за перший період його зміни»?
13. У чому виражається умовність поняття «Початкове значення струму КЗ»?
14. У чому виражається умовність поняття «Потужність короткого замикання»?
15. Сформулювати правило еквівалентності прямої послідовності.
16. Особливості розрахунку несиметричних КЗ практичними методами розрахунку.
17. Чи зміниться напруга прямої послідовності в місці КЗ при несиметричних КЗ на землю при заземленні нейтралей частини трансформаторів?
18. У яких випадках струм сталого КЗ може перевищувати величину струму в початковий момент?
19. Чи може струм несиметричного вигляду КЗ $K^{(n)}$ у початковий момент перевищувати струм трифазного КЗ?
20. Чи може струм несиметричного вигляду КЗ $K^{(n)}$ у сталому режимі перевищувати струм трифазного КЗ?

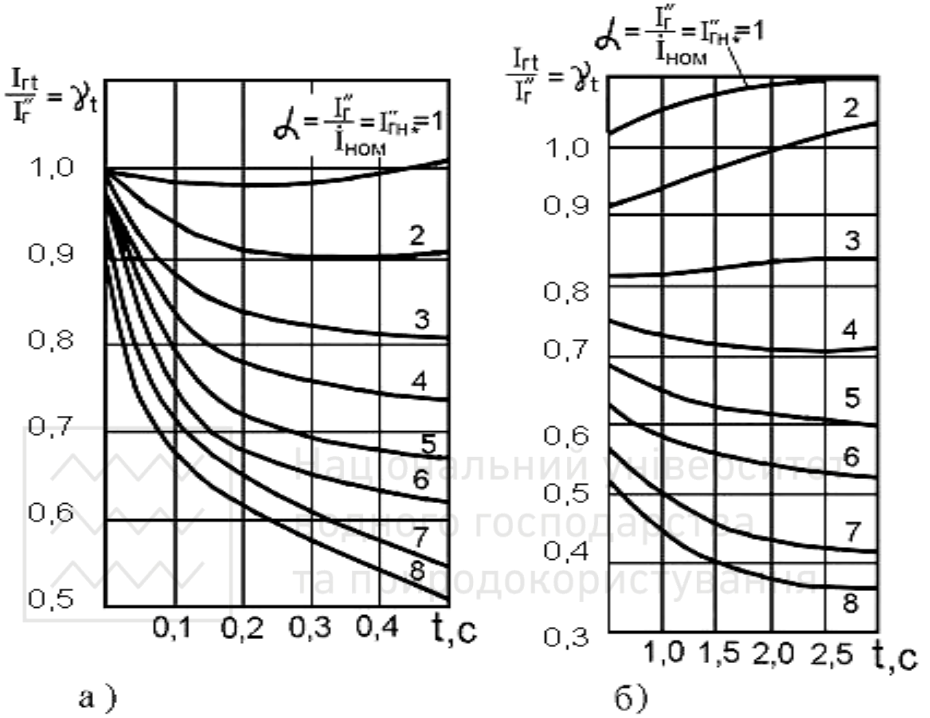
21. Записати співвідношення між окремими складовими струмів і напруги при несиметричному КЗ вигляду $K^{(n)}$.
22. Записати співвідношення між повним струмом КЗ і прямою послідовністю струму для КЗ вигляду $K^{(n)}$.
23. Як впливають троси на індуктивний опір нульовій послідовності?
24. Як зміниться опір нульовій послідовності двохланцюгової лінії при відключенні одного ланцюга?
25. Як визначається додаткова реактивність $x_{\Delta}^{(n)}$ при КЗ вигляду $K^{(n)}$?
26. Що таке комплексна схема заміщення?
27. Записати операторів повороту a a^2
28. Зобразити векторну діаграму струмів (напруги) в місці КЗ при несиметричному пошкодженні вигляду $K^{(n)}$.
29. Що таке «еквівалентна постійна часу»?
30. Як визначити залишкову напругу в довільній точці системи при симетричному КЗ?
31. Як визначити залишкову напругу в довільній точці системи при несиметричному КЗ?



Національний університет
водного господарства
та природокористування

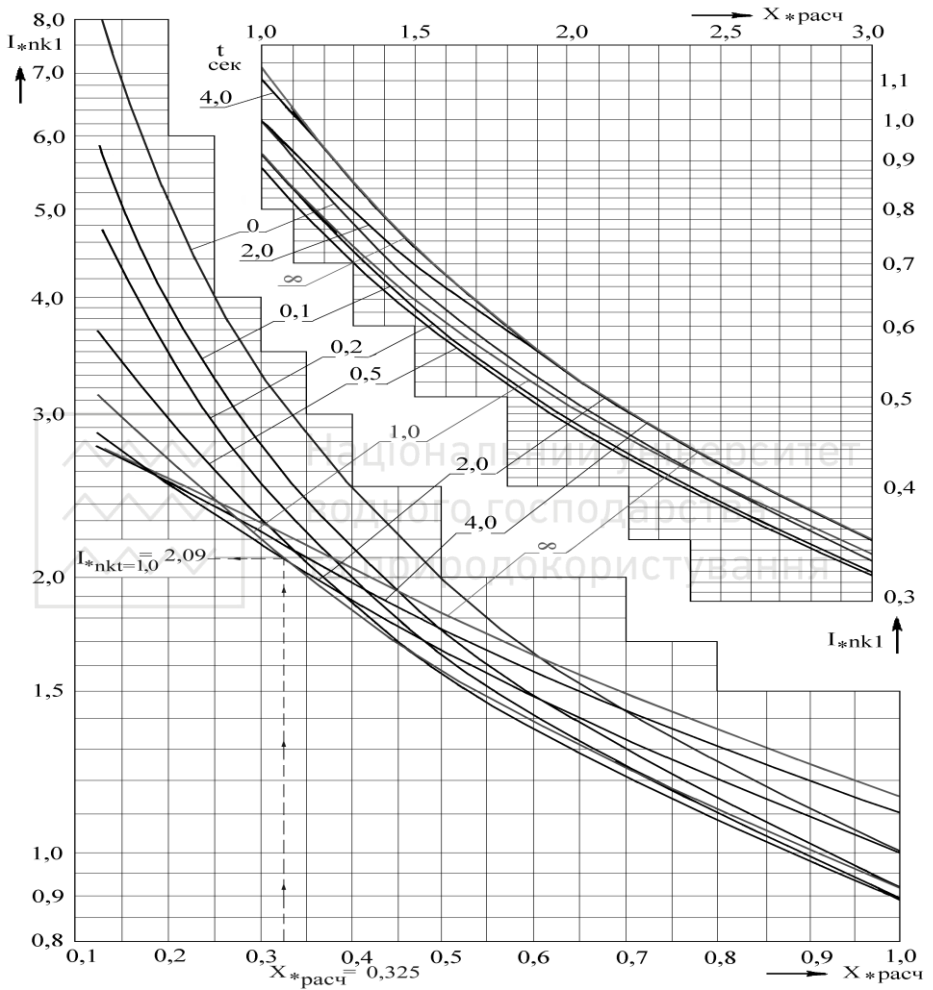


**ТИПОВІ КРИВІ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ
ГЕНЕРАТОРІВ**



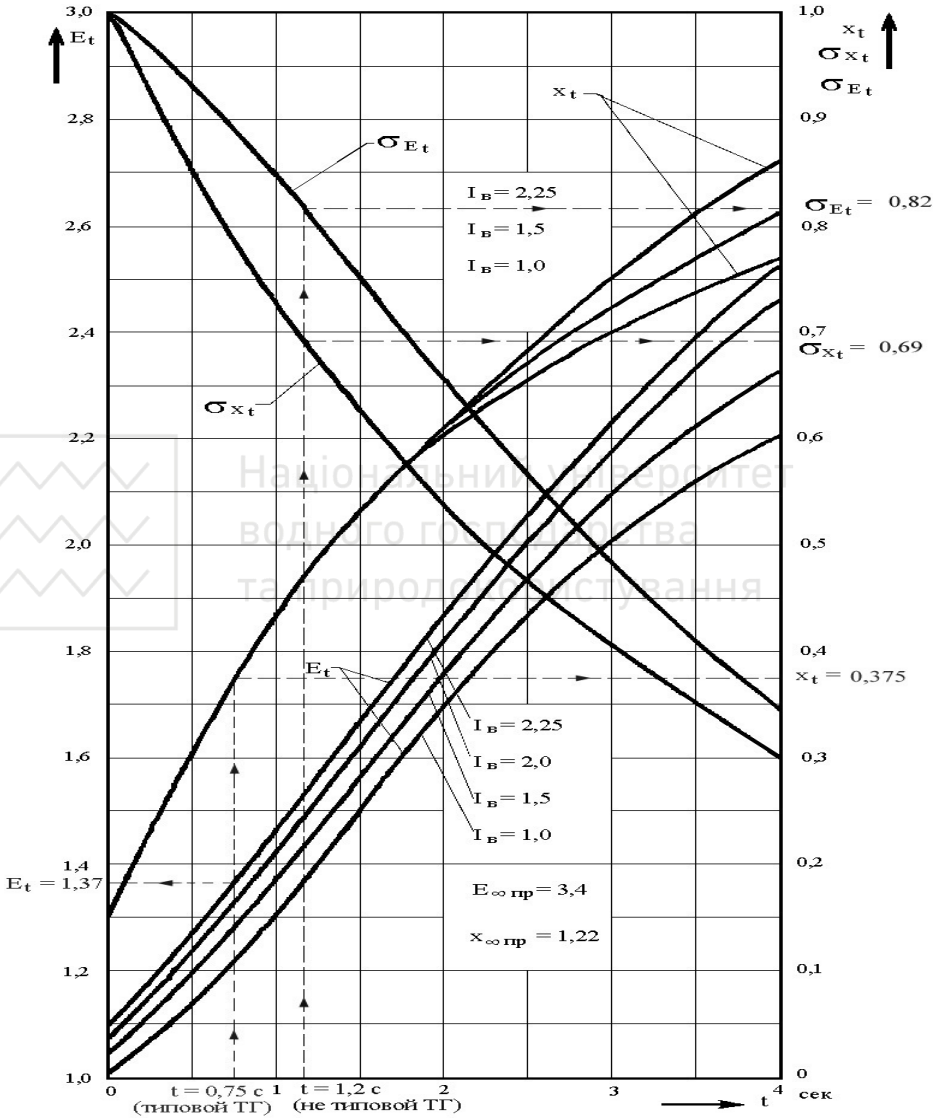


РОЗРАХУНКОВІ КРИВІ ДЛЯ ТИПОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА З АРЗ





КРИВІ МЕТОДУ ВИПРЯМЛЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК



Типовий турбогенератор з АРЗ