

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт

з дисципліни **“Перехідні процеси в енергосистемах”**

для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

освітньо-професійної програми

«Енергетичний менеджмент»

всіх форм навчання

2019

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Перехідні процеси в енергосистемах” для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент» всіх форм навчання / Укл.: О. А. Шрам, О. І. Кузьменко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 38 с.

Укладачі: О. А. Шрам, доцент, канд. техн. наук,
О. І. Кузьменко, зав. лаб.

Рецензент: В. В. Попов, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний
за випуск: О. А. Шрам, доцент, канд. техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
електропостачання промислових
підприємств
протокол № 6 від 24.01.2019 р.

Затверджено
на засіданні НМК
електротехнічного факультету
протокол № 7 від 21.02.2019 р.

ЗМІСТ

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1	4
1.1 Мета роботи	4
1.2 Загальні відомості	4
1.3 Підготовка до роботи	12
1.4 Порядок проведення роботи	16
1.5 Зміст звіту	16
1.6 Контрольні запитання	16
1.7 Література	17
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2	18
2.1 Мета роботи	18
2.2 Загальні відомості	18
2.3 Підготовка до роботи	25
2.4 Порядок проведення роботи	28
2.5 Зміст звіту	28
2.6 Контрольні запитання	28
2.7 Література	29
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3	30
3.1 Мета роботи	31
3.2 Загальні відомості	31
3.3 Підготовка до роботи	35
3.4 Порядок проведення роботи	36
3.5 Зміст звіту	37
3.6 Контрольні запитання	37
3.7 Література	38

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Розрахунок надперехідних струмів трифазного короткого замикання методом вузлових потенціалів за допомогою ЕОМ та аналіз аварійних режимів .

1.1 Мета роботи

Дослідження і розрахунки перехідних процесів при коротких замиканнях (КЗ) є однією з необхідних умов розв'язання багатьох завдань, які виникають при проектуванні й експлуатації систем електропостачання. Забезпечення безаварійного електропостачання споживачів, стійкості режимів роботи систем електропостачання й навантаження вимагає проведення досліджень перехідних процесів при КЗ з використанням обчислювальної техніки.

Метою роботи є проведення розрахунків струмів трифазного КЗ аналітичним методом, методом вузлових потенціалів за допомогою ЕОМ та аналіз аварійних режимів

1.2 Загальні відомості

Основною причиною порушення нормального режиму роботи окремих електроустановок і системи в цілому переважно є КЗ, які являють собою будь-яке випадкове, непередбачене нормальним режимом роботи електричне з'єднання різних точок електроустановки між собою чи з землею. Замикання в електроустановках з глухо- або ефективнозаземленою нейтраллю через дугу або безпосередні з'єднання частин електроустановки називають короткими замиканнями. Замикання в електроустановках з ізольованими нейтраллями або з нейтраллями заземленими через спеціальні компенсуючі пристрої відносять до простих замикань. У таких мережах замикання однієї фази на землю призводить до виникнення струму, який залежить головним чином від ємності фаз стосовно землі.

Зазвичай на місці замикання утворюється певний перехідний опір, зумовлений електричною дугою. В ряді випадків, особливо в електроустановках напругою вищою за 1 кВ, перехідні опори

настільки невеликі, що практично на них можна не зважати. Такі КЗ називають металевими.

Трифазне КЗ є симетричним на відміну від двофазного, двофазного на землю й однофазного КЗ і являє собою з'єднання всіх трьох фаз електроустановки в одну точку (рисунку. 1.1)

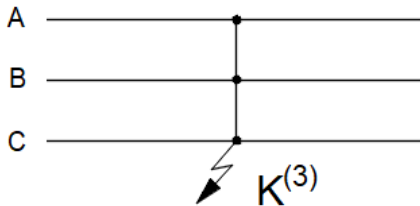


Рисунок 1.1

При виникненні КЗ в системі електропостачання еквівалентний опір кола зменшується (міра зменшення залежить від позиції точки КЗ в системі), що призводить до збільшення струмів в окремих гілках системи порівняно зі струмами нормального режиму. В свою чергу це викликає зниження напруги в системі, котра особливо велика поблизу місця КЗ.

Розрахунок і моделювання електромагнітного перехідного процесу в електричних системах починається з вибору розрахункової однолінійної схеми, на якій вказуються номінальні параметри всіх елементів електроустановки, що входять у розрахункову схему. Приймаються припущення, які приведені в [1,2], і які відповідають меті розрахунку чи досліджень, які проводяться. Припущення при розрахунку струмів і напруг КЗ не здійснюють помітного впливу на точність розрахунків, але дозволяють значною мірою спростити процес рішення й визначити граничні значення струмів КЗ та інших параметрів аварійного режиму з достатньою для інженерних обґрунтувань точністю.

На підставі розрахункової схеми електричної системи створюється схема заміщення. Схема заміщення системи електропостачання являє собою схеми заміщення її окремих елементів, з'єднаних між собою з тією ж послідовністю, як і на розрахунковій схемі. Опори елементів схеми заміщення й ЕРС джерел

живлення можуть бути виражені в іменованих або відносних одиницях.

В лабораторній роботі використовується метод іменованих одиниць із зведенням значень параметрів схеми заміщення до обраного базового рівня напруги мережі з урахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації всіх силових трансформаторів, тобто так зване точне зведення параметрів.

Розрахункові формули опорів елементів схеми заміщення мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} X_W &= X_0 \cdot l \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \\ X_G &= X_d'' \cdot \frac{U_{номG}^2}{S_{номG}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \\ X_T &= \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{номT}^2}{S_{номT}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \\ X_C &= X_{*C}'' \cdot \frac{U_{номC}^2}{S_{номC}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \\ \text{або} \\ X_C &= \frac{U_{номC}^2}{S_{кз}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2, \\ X_H &= X_{*H}'' \cdot \frac{U_{номH}^2}{S_{номH}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де X_W , X_G , X_T , X_C , X_H – індуктивні опори лінії, генератора, трансформатора, системи та навантаження відповідно, Ом;

X_0 , l – питомий опір і довжина лінії відповідно, Ом/км, км;

$U_{номG}$, $U_{номT}$, $U_{номC}$, $U_{номH}$ – номінальні лінійні напруги елементів схеми, кВ;

$S_{номG}$, $S_{номT}$, $S_{номC}$, $S_{номH}$ – номінальні потужності елементів схеми, МВА;

$S_{кз}$ – потужність трифазного КЗ на шинах системи, МВА;

$$S_{KЗ} = \sqrt{3} \cdot I_{KЗ}'' \cdot U_{номС},$$

де $I_{KЗ}''$ – надперехідний струм трифазного КЗ на шинах системи,кА,

$K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$ - коефіцієнти трансформації тих трансформаторів, які розташовані між точкою КЗ і елементом, який підлягає зведенню. Коефіцієнт K являє собою відношення напруги обмотки трансформатора, яка звернена до базового ступеня напруги, до напруги обмотки трансформатора, яка звернена до елемента, що підлягає зведенню.

Як правило, склад навантаження за характером електроприймачів є невідомий. Тому навантаження, які входять до розрахункової схеми враховують узагальнено, за своїми середніми параметрами. Доцільно враховувати навантаження приблизно як джерело з надперехідним ЕРС та надперехідним опором. Їх відносні значення дорівнюють:

$$E_H'' = 0.85 ;$$

$$X_H'' = 0.35 .$$

Ці значення розраховані при повній потужності навантаження (S_H) і при середній номінальній напрузі того ступеня, де це навантаження підключено.

Основним завданням розрахунку режиму з КЗ є визначення струму безпосередньо в аварійній гілці. Еквівалентні перетворення схеми заміщення дозволяють одержати результуючий сумарний опір короткозамкнутого кола й навести схему заміщення до найпростішого вигляду, зображеному на рисунку 1.2.

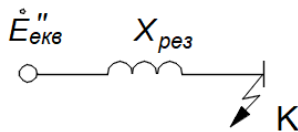


Рисунок1.2

де $E_{екв}^{\circ}$ – це еквівалентна повна надперехідна ЕРС всіх i -их гілок, яка приведена до базового рівня напруги, і знаходиться за формулою:

$$E_{екв}^{\circ} = X_{pez} \sum_{i=1}^n \frac{E_i^{\circ}}{X_i}, \quad (1.2)$$

де X_{pez} – результуючий, еквівалентний опір схеми заміщення, отриманий при згортанні схеми заміщення відносно точки КЗ;

E_i° – повна надперехідна ЕРС синхронного генератора (СГ) системи або навантаження i -ї гілки, яка приведена до базової напруги.

При виконанні перетворень схеми необхідно вибирати таку їх послідовність, щоб кількість перетворень (особливо складних) було найменшим, що забезпечує зменшення похибок при рахуванні.

ЕРС СГ i -ї гілки визначається:

$$E_i^{\circ} = \sqrt{(U + I \cdot X_d^{\circ} \cdot \sin \varphi)^2 + (I \cdot X_d^{\circ} \cdot \cos \varphi)^2}, \quad (1.3)$$

або

$$E_i^{\circ} = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi + X_d^{\circ} \cdot I)^2}, \quad (1.4)$$

де U , I – фазна напруга на затискачах СГ та струм статора в момент часу перед КЗ (або номінальні значення).

При розрахунках в іменованих одиницях до формул (1.3; 1.4) необхідно підставляти U , I та X_d° в іменованих одиницях, тобто кВ, кА та Ом відповідно. Тоді потрібно перерахувати опір $X_{d(в.о)}^{\circ}$:

$$X_{d(Ом)}^{\circ} = X_{d(в.о)}^{\circ} \frac{U_{номГ}^2}{S_{ном}}.$$

Значення $X''_{d(e.o)}$, $U_{ном}$, $S_{ном}$ приведені у паспортних даних генераторів.

ЕРС навантаження та ЕРС системи і-х гілок розраховуються, кВ:

$$\begin{aligned} E_i'' &= 0.85 \frac{U_{ном} H}{\sqrt{3}} \\ E_i'' &= \frac{U_{ном} G}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

ЕРС гілок, які розраховані за формулами (1.3 - 1.5) необхідно привести до базового ступеня напруги:

$$\overset{\circ}{E}_i'' = E_i'' \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n. \quad (1.6)$$

Періодична складова надперехідного струму трифазного КЗ у початковий момент часу знаходиться слідуючим чином:

$$I'' = \frac{\overset{\circ}{E}''}{X_{рез}}. \quad (1.7)$$

Для розрахунків струму КЗ методом вузлових потенціалів вихідна схема заміщення приводиться до виду ,подібного до представленого на рисунку 1.3.

Вузли в схемі нумеруються в довільному порядку, також довільно визначаються напрямки струмів у міжвузлових вітках, але номер вузла, номер ЕРС джерела та номер опора вітки джерела повинні співпадати. Точка КЗ моделюється вводом у схему фіктивної вітки джерела з ЕРС рівною 0 та опором джерела, рівним за значенням додатковому опору $\Delta X^{(n)}$. Для трифазного КЗ $\Delta X^{(n)} = 0$ (див. таблицю 2.1). Наприклад, на схемі заміщення (рисунку 1.3) $E_4 = 0$; $X_4 = 0$.

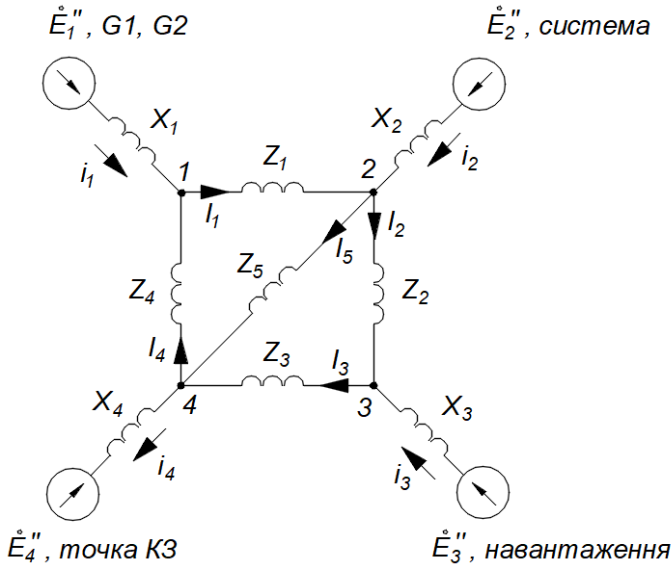


Рисунок 1.3

Вихідними даними для розрахунків є:

а) матриця-стовпчик ЕРС джерел

$$|E| = (E_1, E_2, E_3, E_4);$$

б) діагональна матриця опорів віток джерел

$$|X| = \text{diag}(X_1, X_2, X_3, X_4);$$

в) діагональна матриця опорів міжвузлових віток

$$|Z| = \text{diag}(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5).$$

Схема визначає також першу матрицю інциденцій (з'єднань) **П**-форми, яка формується наступним способом:

ij - елемент матриці дорівнює +1, якщо струм I_j у j -ій вітці направлений від вузла i ; дорівнює -1, якщо струм I_j направлений до вузла i ; дорівнює 0, якщо струм I_j не зв'язаний з вузлом i .

Для схеми, зображеної на рисунку 1.3, матриця Π -форми буде:

$$|\Pi| = \begin{array}{ccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \longrightarrow \text{вітки } j \\ \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 4 \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \downarrow \\ \text{вузли } i \end{array}$$

Згідно методу вузлових потенціалів розраховуються струми у міжвузлових вітках (I) і у вітках джерел(i) .

Дані, необхідні для вводу в ЕОМ (програма ЕМАГ1)

1. Кількість вузлів у схемі – N.
2. Кількість між вузлових віток у схемі – M.
3. Матриця Π -форми.
4. Матриця ЕРС джерел - $|E|$.
5. Матриця опорів джерел - $|X|$ (тільки діагональні елементи).
6. Матриця опорів міжвузлових віток - $|Z|$ (тільки діагональні елементи).
7. Базовий струм, кА - I_{δ} (тільки для методу відносних одиниць).
8. Коефіцієнт несиметрії - $m^{(n)}$ (див. таблицю 2.1).

1.3 Підготовка до роботи

При підготовці до виконання лабораторної роботи студентів слід:

1.3.1. Вивчити методичні вказівки до даної лабораторної роботи.

1.3.2. Згідно з вихідними даними за заданим викладачем варіантом за таблицею 1.1 накреслити схему заміщення електричної системи і розрахувати опори елементів схеми заміщення та ЕРС при точному зведенні в іменованих одиницях за формулами (1.1-1.6).

1.3.3. Використовуючи відомі методи еквівалентного перетворення привести схему заміщення електричної системи до виду подібному на представлений схемі на рисунку 1.3.

1.3.4. Підготувати вихідні дані для розрахунків на ЕОМ.

1.3.5. Оформити заготовку до звіту з лабораторної роботи (титульна сторінка, мета роботи, основні теоретичні повідомлення, схеми й розрахунки згідно з п. 1.3.2 – 1.3.4).

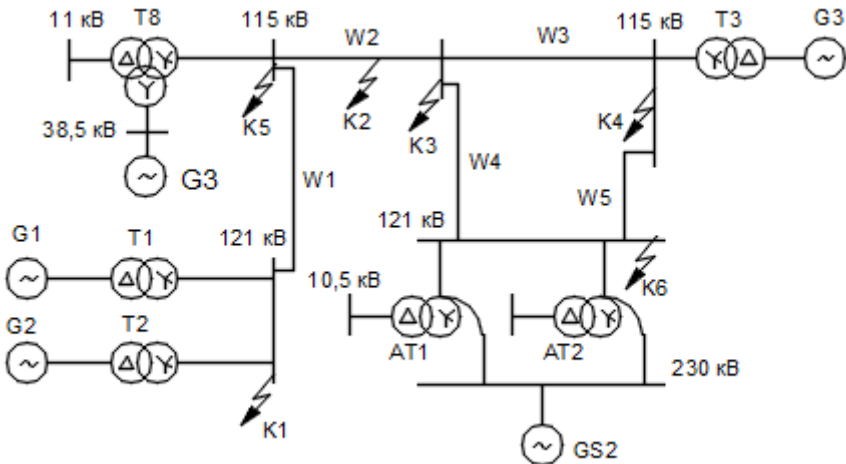


Рисунок 1.4 – Розрахункова схема 1

Таблиця 1.1 - Вихідні дані

Елемент схеми	Параметри	Номер варіанту		
		1	2	3
Турбогенератори G1, G2	$P_{ном}$, МВт	200	100	160
	$\cos\varphi_{ном}$, в.о	0.85	0.8	0.85
	X_d'' , в.о	0.19	0.192	0.21
	$I_{ном}$, кА	8.62	6.87	5.67
	$U_{ном}$, кВ	15.75	10.5	13.8
Турбогенератори G3, G4	$P_{ном}$, МВт	32	56	83
	$\cos\varphi_{ном}$, в.о	0.8	0.85	0.8
	X_d'' , в.о	0.23	0.21	0.26
	$I_{ном}$, кА	2.2	3.64	4.33
	$U_{ном}$, кВ	10.5	10.5	13.8
Автотрансформа- тори АТ1, АТ2	$S_{ном}$, МВА	250	200	125
	U_{KBC} , %	11	11	11
	U_{KCH} , %	20	20	28
	U_{KBH} , %	32	32	45
Трансформатори Т1, Т2	$S_{ном}$, МВА	250	125	200
	U_{κ} , %	10.5	10.5	10.5
Трансформатори Т3, Т4	$S_{ном}$, МВА	40	63	80
	U_{κ} , %	10.5	10.5	11
Трансформатор Т5	$S_{ном}$, МВА	63	63	63
	U_{κ} , %	10.5	10.5	10.5

Продовження таблиці 1.1

		Параметри	Номер варіанту		
			1	2	3
Трансформатор Т8		$S_{ном}$, МВА	63	40	80
		U_{KBC} , %	10.5	10.5	11
		U_{KCH} , %	7	6.5	7
		U_{KBH} , %	18	17.5	18.5
Система GS1		I''_{K3} , кА	30	28	35
Система GS2		S_{K3} , МВА	18000	15000	16000
		$I''_{K3}^{(1)}$, кА	30	32	34
Лінії	W1	X_0 , Ом/км	0,4		
		l , км	25	30	32
		X_0/X_1	3.0		
	W2	l , км	18	20	22
		X_0/X_1	3.5		
	W3	l , км	16	17	20
		X_0/X_1	3.0		
	W4	l , км	22	28	32
		X_0/X_1	3.0		
	W5	l , км	40	45	60
		X_0/X_1	3.0		
	W6	l , км	80	85	90
		X_0/X_1	4.7		
	W7	l , км	140	80	110
		X_0/X_1	5.5		
Навантаження, Н		$P_{ном}$, МВт	50	30	40
		$\cos\varphi_{ном}$, в.о	0.85	0.8	0.8
		X''_{*H} , в.о	0.35		

1.4 Порядок проведення роботи

1.4.1. Розрахувати надперехідний струм трифазного КЗ.

1.4.2. Ввести в ЕОМ та розрахувати надперехідний струм трифазного КЗ методом вузлових потенціалів.

1.5 Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи повинні бути приведені стислі теоретичні повідомлення, що використовуються при виконанні роботи; розрахункова схема з вихідними даними за заданим варіантом; схеми заміщення; розрахунки опорів, ЕРС та надперехідного струму КЗ; розраховані на ЕОМ струми КЗ у міжвузлових вітках та струми у вітках джерел; висновки по роботі.

1.6 Контрольні запитання

1. Види КЗ і причини що їх викликають.
2. Наслідки КЗ.
3. Метод іменованих одиниць.
4. Розрахунок надперехідної ЕРС.
5. Точне та наближене зведення опорів, напруг та струмів.
6. Поясніть залежність повного струму КЗ, його періодичної та аперіодичної складових від часу.
7. Розрахунок надперехідного струму КЗ.
8. Розрахунок ударного струму КЗ.

1.7 Література

1. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Госстандарт. М., 1988.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання./Г.Г.Півняк, В.І.Винославський, А.Я.Рибалко, Л.І.Несен / За ред. Г.Г.Півняка,-Дніпропетровськ : Вид. НГА України , 2000. –597с
3. Переходные процессы в системах электроснабжения /В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен и др.; под ред. В. Н. Винославского. - К.: Вища шк. 1989.
4. Черемісін М.М., Мороз О.М., Єгоров О.Б., Швець С.В.Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]/ М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець.–Харків: ТОВ «В справі», 2016. –260с. –Бібліогр.: с. 254. – 200 пр.ISBN978-617-7305-20-9.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах : Учеб.пособие.-Новосибирск: Изд-во НГТУ , 2003. –283с.
6. Дивчук Т. Е. Особенности определения параметров силовых трансформаторов методами схемно-полевого моделирования / Т. Е. Дивчук, Д. К. Мимоходов, С. А. Кутилин, А. Э. Кузнецов, Ю. В. Гуразда, И. С. Сырых// Електротехніка та електроенергетика. – 2017. – № 1. –С. 61-70. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-8> .

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Розрахунок надперехідних та ударних струмів трифазного короткого замикання у вузлі навантаження з електродвигунами за допомогою ЕОМ.

2.1 Мета роботи

Мета роботи – навчитися визначати надперехідні та ударні струми КЗ у вузлі навантаження із високовольтними двигунами та практичне застосування обчислювальної техніки для розрахунків.

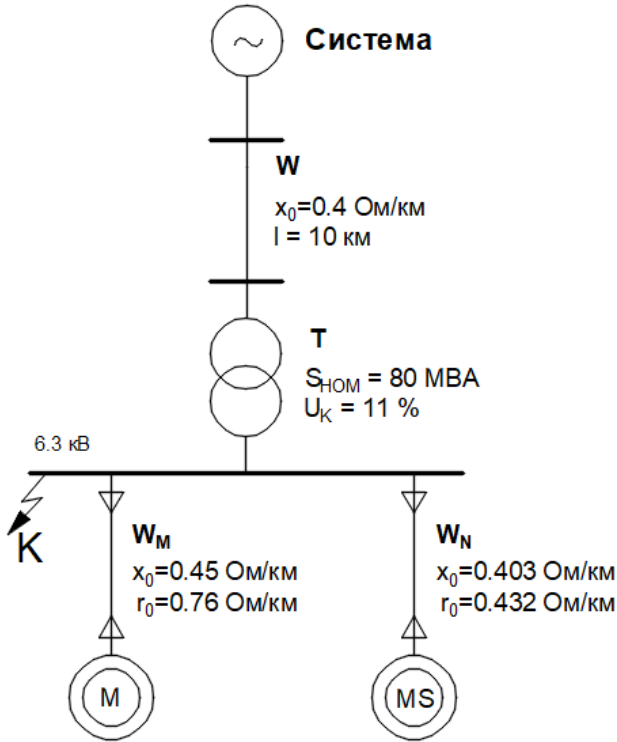
2.2 Загальні відомості

При КЗ у вузлі навантаження двигуни, які підключені до цього вузла, продовжують деякий час обертатися за інерцією. В початковий момент КЗ потікозчеплення ротора залишаються незмінними і підтримуються вільними струмами короткозамкнутої обмотки і тіла ротора. Двигуни переходять у генераторний режим і генерують струм до місця пошкодження, який з часом згасає завдяки активному опору статора і зовнішньої мережі.

Синхронні, асинхронні двигуни та синхронні компенсатори генерують значний струм КЗ якщо вони безпосередньо зв'язані з точкою КЗ або розміщені на невеликому електричному віддаленні. Відповідно [1, 2] вплив АД, СД на струм КЗ не враховується при потужності двигунів до 100 кВт в одиниці, якщо вони відокремлені від місця КЗ однією трансформацією, а також при будь-якій потужності, якщо вони відокремлені від місця КЗ двома та більше трансформаціями.

Вплив навантаження (наприклад двигунів та інших електроприймачів) вузла енергосистеми електрично віддаленого від точки КЗ доцільно враховувати в початковий момент КЗ у вигляді комплексного узагальненого навантаження з середніми параметрами $X''_H = 0.35$; $E''_H = 0.85$. Потрібно враховувати таке навантаження тоді, коли струм в місці КЗ від цього навантаження складає більше 5% від струму в місці КЗ, визначеного без врахування навантаження.

Розрахунок струмів КЗ в лабораторній роботі рекомендується виконати у системі відносних одиниць. Вибираються базові умови $S_{\bar{o}}$ та $U_{\bar{o}}$, визначаються базовий струм $I_{\bar{o}}$ та параметри елементів схеми заміщення, яка складається за розрахунковою схемою (рисунок 2.1).



W - повітряна ЛЕП,
 W_M , W_N - кабельні лінії,
 MS - синхронний двигун (СД),
 M - асинхронний двигун (АД)
 Рисунок 2.1 – Розрахункова схема

Індуктивний опір зв'язку $X_{\Sigma S}$ між точкою КЗ та системою за рисунком 2.1 визначається:

$$X_{\Sigma S} = X_S + X_W + X_T, \quad (2.1)$$

де X_S , X_W , X_T - індуктивні опори системи, лінії електропередачі та трансформатора відповідно, які розраховані з застосуванням метода відносних одиниць.

Надперехідний струм КЗ від системи буде:

$$I_S'' = \frac{E_S'' \cdot I_\delta}{X_{\Sigma S}}, \quad (2.2)$$

де E_S'' – надперехідна ЕРС системи, яка дорівнює 1.

Ударний струм КЗ від системи:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_S'' \cdot K_y, \quad (2.3)$$

де $K_y = 1,85$.

Розглянемо розрахунок струму підживлення КЗ від СД:

$$I_{CD}'' = \frac{E_{CD}'' \cdot I_\delta}{\sqrt{(x_{CD} + x_{зовн})^2 + r_{зовн}^2}}, \quad (2.4)$$

де E_{CD}'' - ЕРС СД розрахована в відносних одиницях з номінального доаварійного режиму ($U_* = 1; I_* = 1$):

$$E_{CD}'' = \sqrt{(1 \pm X_d'' \sin \varphi)^2 + (X_d'' \cos \varphi)^2}, \quad (2.5)$$

Якщо СД до КЗ працював з перезбудженням, то в формулі (2.5) треба прийняти знак “+”. При відсутності вихідних даних приблизно приймають $E_{CD}'' = 1.1$ [3].

$$X_{CD} = X_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}, \quad (2.6)$$

де X_{CD} — індуктивний опір СД у відносних базисних одиницях.

$x_{зовн}$, $r_{зовн}$ — зовнішні опори зв'язку СД з точкою КЗ, які дорівнюють індуктивному та активному опорам кабельної лінії W_M (рисунок 2.1)

$$x_{зовн} = x_{W_M} = x_o \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}, \quad (2.7)$$

$$r_{зовн} = r_{W_M} = r_o \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}. \quad (2.8)$$

Ударний струм КЗ від СД визначається:

$$i_{yCD} = \sqrt{2} I_{CD}'' \cdot K_y, \quad (2.9)$$

$$K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}. \quad (2.10)$$

Постійна часу T_a для вітки з двигуном, з'єднаним з точкою КЗ кабелем, повинна визначатися з урахуванням активного опору кабеля, тому що він приблизно дорівнює значенню активного опору обмотки статора.

$$T_a = \frac{x_{2CD} + x_{зовн}}{\frac{x_{2CD}}{T_{aCC}} + \omega r_{зовн}}, \quad (2.11)$$

$$T_{aCD} = \frac{x_{2CD}}{\omega r_{CD}}. \quad (2.12)$$

Постійна часу СД T_{aCC} визначається за формулою (2.12) та в залежності від типу СД приводиться в каталогах і в [3, 4]. Припустимо приймати приблизні середні значення T_{aCC} за таблицею 2.1.

Таблиця 2.1

Потужність СД, МВт	T_{aCC} , с
до 1,6	0,05
2-4	0,07
більше 4	0,10

Надперехідний струм КЗ від АД розраховується аналогічно як і від СД по формулах (2.4 – 2.6), враховуючи що замість x_d'' потрібно підставити x_*'' , а у формулі (2.5) слід прийняти знак “-“

$$x_*'' = \frac{1}{I_{*пуск.АД}}.$$

При відсутності вихідних даних приблизно приймають $E_{АД}'' = 0,9$. Зовнішні опори по (2.7 – 2.8) розраховуються за параметрами кабельної лінії W_N .

Ударний струм КЗ від АД розраховується по формулі (2.9), в якій ударний коефіцієнт:

$$K_y = e^{\frac{-0,01}{T_p'}} + e^{\frac{-0,01}{T_a}}, \quad (2.13)$$

де T_p' , T_a – постійні часу затухання періодичної та аперіодичної складових струму КЗ відповідно, с;

T'_p , T_a визначаються враховуючи зовнішні опори кабельної лінії W_N .
 T_{aAA} , T_{pAD} припустимо приймати за таблицею 2.2.

Таблиця 2.2

Параметр	Серії АД						
	А	АО	ДАЗО	АЗМ	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
T_{aAD} , с	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
T_{pAD} , с	0,04	0,04	0,09	$\frac{0,06}{S_{ном}}, \%$	0,075	0,06	0,044

T'_p , T_a визначаються як:

$$T'_p = T_{pAA} \left(1 + \frac{x_{зовн}}{x_{AD}} \right), \quad (2.14)$$

$$T_a = \frac{x_{AD} + x_{зовн}}{\frac{x_{AD}}{T_{aAD}} + \omega r_{зовн}},$$

де x_{AD} - індуктивний опір АД:

$$x_{AD} = x''_* \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}}, \quad (2.15)$$

$x_{зовн}$ – зовнішній опір кабельної лінії W_N ;

T_{pAA} – постійна часу затухання періодичного струму АД при КЗ на його затискачах (див. табл. 2.2).

Результуючий струм трифазного КЗ визначається як сума струмів КЗ від системи та високовольтних двигунів. Відповідно, результуючі надперехідний та ударний струми КЗ будуть:

$$I''_{\Sigma} = I''_{GS} + I''_{CD} + I''_{AD}, \quad (2.16)$$

$$i_{y\Sigma} = i_{yGS} + i_{yCD} + i_{yAD}. \quad (2.17)$$

Дані, необхідні для вводу в ЕОМ (програма ЕМАГЗ)

1. Кількість систем, що живлять точку КЗ – K .
2. Кількість СД – M .
3. Кількість АД – N .
4. Базова потужність, МВА – $S_{баз}$.
5. Базова напруга, кВ – $U_{баз}$.
6. Індуктивний опір, в.о – x_S .
7. Активний опір, в.о – r_S .
8. Номінальна потужність СД, МВА – S_{CD} .
9. Номінальна напруга СД, кВ – U_{CD} .
10. $\cos \varphi_{CD}$.
11. Надперехідний опір СД, в.о – x_d'' .
12. Постійна часу, с – T_{aCC} .
13. Індуктивний опір, в.о. – $x_{зовн.СД}$.
14. Активний опір, в.о. – $r_{зовн.СД}$.
15. Номінальна потужність АД, МВА – S_{AD} .
16. Номінальна напруга АД, кВ – U_{AD} .
17. Кратність пускового струму, в.о – $I_{пуск*}$.
18. $\cos \varphi_{AD}$.
19. Постійна часу, с – T_{aAA} .
20. Постійна часу, с – T_{pAA} .
21. Індуктивний опір, в.о. – $x_{зовн.АД}$.
22. Активний опір, в.о. – $r_{зовн.АД}$.

2.3 Підготовка до роботи

При підготовці до виконання лабораторної роботи студентові слід:

2.2.1. Вивчити методичні вказівки до даної лабораторної роботи.

2.2.2. Згідно з вихідними даними, які приведені в таблицях 2.3 – 2.4 розрахувати надперехідний та ударний струми КЗ від системи, АД та СД.

Таблиця 2.3

Номер варіанту	Система		СД	W_M	АД	W_N
	I''_{KS} , кА	$U_{с.ном}$, кВ	Кількість, шт	l_M , м	Кількість, шт	l_N , м
1	20	115	2	50	15	11
2	15	230	11	35	4	18
3	18	115	4	46	13	13
4	13	230	9	39	6	20
5	16	115	6	42	11	15
6	11	230	7	43	8	22
7	14	115	8	38	9	17
8	9	230	5	47	10	24
9	12	115	10	34	7	19
10	7	230	3	51	12	26
11	21	115	11	32	5	21
12	16	230	3	19	2	38
13	19	115	13	30	3	23
14	5	230	7	21	4	36
15	17	115	15	28	1	25
16	10	230	14	23	6	34
17	15	115	9	26	14	27
18	12	230	16	25	3	32
19	13	115	7	24	12	29
20	4	230	2	27	5	30
21	11	115	5	22	10	31
22	6	230	4	29	7	28
23	9	115	3	20	8	33
24	8	230	6	31	9	16
25	7	115	2	18	6	35
26	10	230	8	33	11	14
27	11	115	4	16	4	37
28	12	230	10	39	13	12
29	13	115	6	14	2	39
30	14	230	12	37	15	10

Таблица 3.4

Номер вапарту	СД					АД							
	$P_{ном},$ кВт	$X_D'',$ з.о	$T_{ад},$ с	$\eta_{сд},$ з.о	$\cos\phi$	$X_{2сд},$ з.о	$M_{адр},$ кг	$P_{ном},$ кВт	$\cos\phi$	$S_{ном},$ %	$I_{нук},$ з.о	$\eta_{ад},$ з.о	
1	СДН-2	315	0,232	0,039	0,96	0,232	0,232	А	400	0,89	-	5,1	0,93
2	СДН-2	400	0,236	0,044	0,96	0,236	0,232	А	200	0,81	-	5,0	0,93
3	СДН-2	800	0,253	0,056	0,96	0,253	0,232	А	630	0,87	-	4,6	0,93
4	СДН-2	1000	0,181	0,062	0,96	0,181	0,232	А	320	0,86	-	6,0	0,93
5	СДН-2	1800	0,174	0,066	0,96	0,174	0,232	ДА3О4	315	0,88	-	7	0,93
6	СДН-2	2000	0,148	0,071	0,96	0,148	0,232	ДА3О4	400	0,87	-	7	0,93
7	СТД	630	0,147	0,035	0,96	0,149	0,232	ДА3О4	500	0,82	-	6	0,93
8	СТД	800	0,143	0,037	0,96	0,175	0,232	4А3М	630	0,88	0,7	5,3	0,93
9	СТД	1000	0,133	0,04	0,96	0,162	0,232	4А3М	800	0,89	0,7	5,3	0,93
10	СТД	1200	0,138	0,056	0,96	0,1887	0,232	4А3М	1000	0,89	0,7	5,3	0,93
11	СТД	1800	0,129	0,059	0,96	0,157	0,232	4А3М	1200	0,89	0,7	5,5	0,93
12	СТД	2000	0,134	0,052	0,96	0,163	0,232	4А3М	1800	0,89	0,9	5,2	0,93
13	СТМН	1500	0,116	0,057	0,96	0,141	0,232	БДД	830	0,86	-	3,6	0,93
14	СТМН	2000	0,151	0,071	0,96	0,184	0,232	БДД	750	0,75	-	4,5	0,93
15	СТМН	2500	0,09	0,082	0,96	0,9	0,232	БДД	1000	0,83	-	4,3	0,93

2.4 Порядок проведення роботи

Підготувати дані для вводу в ЕОМ та розрахувати надперехідні та ударні струми КЗ від системи, СД та АД.

2.5 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен уміщувати стислі теоретичні повідомлення, які використовуються при виконанні роботи; розрахункову схему з вихідними даними за заданим варіантом; схему заміщення; розрахунки струмів КЗ; результати розрахунків струмів КЗ на ЕОМ та висновки по роботі.

2.6 Контрольні запитання

1. В яких випадках враховують електродвигуни при розрахунку струмів КЗ.
2. Як розраховуються надперехідний та ударний струми КЗ від системи?
3. Накресліть графіки зміни повного струму КЗ від системи, СД, АД та його складових з часом.
4. Поясніть фізичний зміст ударного коефіцієнта.
5. Як визначається ЕРС електродвигунів при розрахунках струмів КЗ?
6. Як враховується узагальнене навантаження при розрахунках струмів КЗ?
7. Як розраховуються надперехідний та ударний струми КЗ від СД?
8. Як розраховуються надперехідний та ударний струми КЗ від АД?
9. Яку відмінність мають типові криві зміни періодичної складової струмів КЗ від АД і СД

2.7 Література

1. Правила улаштування електроустановок. Україна Видання офіційне. Міненерговугілля України. — Х.: Форт, 2017. — 760 с.
2. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Госстандарт. М., 1988.
3. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. — 5-те вид. доопрац. та допов. — Дніпро : НГУ, 2016. — 600 с.
4. Черемісін М.М., Мороз О.М., Єгоров О.Б., Швець С.В. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]/ М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець.—Харків: ТОВ «В справі», 2016. —260с. —Бібліогр.: с. 254. — 200 пр.ISBN978-617-7305-20-9.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.-283с
6. Лоскутов С. В. Моделювання контактного електроопору / С. В. Лоскутов, Щетиніна М. О., Зеленіна О. А. // Електротехніка та електроенергетика. — 2018. — № 1. —С. 22-29. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-3>.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження статичної стійкості синхронного генератора без автоматичного регулювання збудження (АРЗ) за допомогою ЕОМ.

3.1 Мета роботи

Дослідження електромеханічних перехідних процесів в електричних системах дозволяє передбачити протікання будь-якого перехідного процесу, не допускаючи можливих негативних наслідків. Метою роботи є практичне застосування обчислювальної техніки для дослідження стійкості режимів електропередачі з синхронним генератором без АРЗ.

3.2 Загальні відомості

Статична стійкість – це здатність заданого усталеного режиму самовстановлюватися після закінчення дії малих збурень параметрів цього режиму, а не “сповзати” від них, а також протистояти малим збуренням при поступовому погіршенні режиму впритул до граничного. Малі збурюючі впливи завжди супроводжують експлуатацію системи і вони пов’язані, в основному, із змінами навантаження, а також з реакцією на це регулюючих пристроїв; з включенням і відключенням окремих генераторів або зміною їх потужності; із змінами в нормальних експлуатаційних схемах при комутаціях тощо.

В даній роботі розглядається найпростіша схема електричної системи, яка зображена на рис. 3.1.

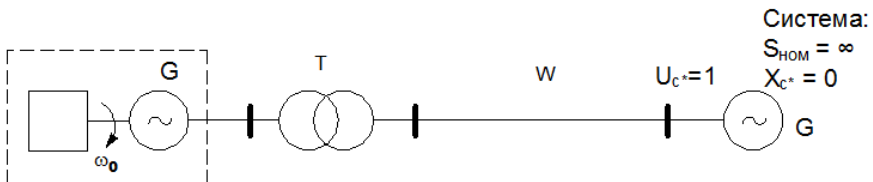


Рисунок 3.1

Під найпростішою системою розуміють таку систему, в якій одиночний еквівалентний генератор зв'язаний з шинами незмінної напруги трансформаторами та лініями, по яким передається потужність від електричної станції в систему. При цьому приймається, що сумарна потужність електричних станцій системи у багато разів перевищує потужність станції, яка розглядається. Таке припущення дозволяє вважати напругу на шинах системи незмінною в будь-яких режимах її роботи ($U = \text{const}$).

Із [1] відомо, що рух ротора синхронного генератора (СГ) описується диференціальним рівнянням :

$$\frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{P_d}{\omega_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} = P_0 - P, \quad (3.1)$$

де T_j – постійна інерції ротора, с ;

P_d – демпферний коефіцієнт, в.о. ;

P_0 – потужність турбіни вихідного усталеного режиму, в.о. ;

δ – кут вибігу ротора генератора, рад ;

ω_0 – синхронна швидкість обертання ротора, рад/с .

Електромагнітна потужність СГ P визначається :

$$P = P_{\max} \cdot \sin \delta = \frac{E_q \cdot U_c}{X_c} \cdot \sin \delta, \quad (3.2)$$

де E_q – поперечна синхронна ЕРС генератора, в.о.;

U_c – напруга на шинах приймальної системи, в.о. ;

X_c – сума опорів елементів електропередачі від точки прикладення ЕРС E_q до шин приймальної системи з напругою U_c , в.о.

Задача аналізу статичної стійкості системи вирішується визначенням залежностей (наприклад $\delta = f(t)$, $P = f(t)$ і т. і.), які

характеризують зміну параметрів заданого вихідного режиму в часі при малих збуреннях цього режиму. В більшості випадків достатньо визначити зміну кута δ вибігу ротора СГ з часом. Для цього необхідно розв'язати нелінійне диференційне рівняння (3.1) (або систему диференційних рівнянь), яке описує цей режим. Знайти рішення $\delta = f(t)$ рівняння (3.1) у загальному вигляді неможливо. Тому дослідження стійкості проводиться або шляхом інтегрування лінеаризованого диференційного рівняння з використанням метода малих коливань, або прямим інтегруванням вихідного нелінійного диференційного рівняння з використанням чисельних методів.

Суть методу малих коливань полягає в тому, що замінюючи кут δ в нелінійному диференційному рівнянні (3.1) на $\delta_0 + \Delta\delta$ і проводячи математичні перетворення, маємо змогу отримати лінеаризоване однорідне диференційне рівняння руху малих відхилень кута $\Delta\delta$ ротора СГ для заданого значення кута δ_0 усталеного режиму (3.3).

$$\frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} + \frac{P_d}{\omega_0} \cdot \frac{d(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt} + P_{\max} \cdot \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = P_0,$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} = \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2}.$$

Якщо рівняння (3.2) розкласти в ряд Тейлора в межах $\Delta\delta$, то одержимо

$$P_{\max} \cdot \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = P_{\max} \cdot \sin(\delta_0) + \frac{dP}{d\delta_0} \cdot \Delta\delta + \frac{1}{2!} \cdot \frac{d^2P}{d\delta_0^2} \cdot \Delta\delta^2 + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^n P}{d\delta_0^n} \cdot \Delta\delta^n.$$

При малих $\Delta\delta$ ступенями $\Delta\delta$ вище першої можна знехтувати і враховуючи, що :

$$P_{\max} \cdot \sin \delta_0 = P_0,$$

$$\frac{dP}{d\delta_0} = P_{\max} \cdot \cos \delta_0 = C.$$

Отримаємо кінцево:

$$\frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{P_d}{\omega_0} \cdot \frac{d\Delta\delta}{dt} + C \cdot \Delta\delta = 0. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) – це однорідне лінійне диференціальне рівняння відносно малих відхилень кута вибігу ротора $\Delta\delta$, яке характеризує вільний рух ротора генератора. Воно має розв’язок $\Delta\delta = f(t)$, отриманий шляхом інтегрування і за яким можна визначити статичну стійкість або нестійкість режиму.

Механічна постійна інерції T_j дорівнює часу, впродовж якого частота обертання змінюється на 100% під дією прикладеного до валу постійного результуючого моменту, який дорівнює номінальному моменту СГ. T_j може бути приведена в довідниках, в каталогах або розрахована за формулою :

$$T_j = \frac{1.096 \cdot 10^{-5} \cdot j \cdot n^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (3.4)$$

де j – момент інерції, $\text{T} \cdot \text{м}^2$;

n – синхронна частота обертання , об/хв ;

$S_{\text{ном}}$ — номінальна потужність СГ, МВА .

В розрахунках за формулами (3.1) – (3.4) за базову потужність

прийнята потужність $S_{ном}$ СГ.

Демпферний коефіцієнт P_d визначається як відношення асинхронного моменту СГ (при малих ковзаннях) до самого ковзання. Якщо розглядаються синхронні гойдання ротора СГ і асинхронні режими з малим ковзанням, то P_d приблизно дорівнює:

$$P_d \approx 2...10.$$

Синхронна ЕРС E_q СГ розраховується за формулою:

$$E_q = \sqrt{\left(U_{C^*} + \frac{Q_{0^*} \cdot X_C}{U_{C^*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{0^*} \cdot X_C}{U_{C^*}} \right)^2},$$

де P_{0^*} , Q_{0^*} – потужність розрахункового режиму роботи СГ, в.о.

$$P_{0^*} = \frac{P_0}{S_{\sigma}},$$

$$Q_{0^*} = P_{0^*} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0.$$

В даній лабораторній роботі :

$$P_0 = P_{номГ}; S_{\sigma} = S_{номГ}; \cos \varphi_0 = \cos \varphi_{номГ}.$$

В результаті розрахунків на ЕОМ рівняння (3.3) отримаємо залежності : $\Delta \delta = f(t)$ і $\Delta \omega = f(\Delta \delta)$, де $\Delta \omega$ – швидкість зміни кута $\Delta \delta$, рад/с :

$$\Delta \omega = \frac{d\Delta \delta}{dt}.$$

По характеру зміни $\Delta\delta = f(t)$ можна зробити висновок про статичну стійкість. При згасаючій зміні кута $\Delta\delta$ в часі, тобто коли $\Delta\delta$ аперіодично або коливаннями прагне до значення δ нового усталеного режиму, режим роботи електропередачі при заданих умовах може вважатися стійким. Якщо кут $\Delta\delta$ аперіодично чи коливаннями безперервно зростає, то такий режим роботи електропередачі вважається нестійким.

По залежності $\Delta\omega = f(\Delta\delta)$, яка має назву фазової траєкторії, можливо визначити не тільки стійкість системи, але й провести якісний аналіз перехідного процесу, тобто визначити з якою швидкістю буде змінюватися кут $\Delta\delta$.

Дані, необхідні для вводу в ЕОМ (програма EMEX 1)

1. Постійна часу інерції ротора, с (T_j).
2. Демпферний коефіцієнт, в.о. (P_d).
3. Синхронна ЕРС, в.о. (E_q).
4. Результируючий опір, в.о. (X_C).
5. Час аналізу, с (t).
6. Початкове значення кута дельта, град ($\Delta\delta$).
7. Крок інтегрування по часу, с (Δt).

3.3 Підготовка до роботи

При підготовці до виконання лабораторної роботи студентів слід :

1. Вивчити методичні вказівки до даної лабораторної роботи.
2. Згідно з вихідними даними за заданим викладачем варіантом за таблицями 3.1 та 3.2 підготувати дані, які необхідні для вводу в ЕОМ.
3. Оформити заготовку до звіту з лабораторної роботи.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

Генератор, G	$P_{ном} = 160 \text{ МВт}, S_{ном} = 188 \text{ МВА}, \cos \varphi_{ном} = 0.85,$ $n = 3000 \text{ об/хв}, x_d = 1.713, x_d' = 0.304;$
Трансформатор, Т	$S_{ном} = 200 \text{ МВА}, U_k \% = 11.0 \% ;$
Лінія, W	$U_{ном} = 230 \text{ кВ}, x_0 = 0.4 \text{ Ом/км}$

Таблиця 3.2 – Значення моменту інерції та довжини лінії

Номер варіанту	Момент інерції J , Тм ²	Довжина лінії, км
1	3.25	150
2	6.6	200
3	3.87	180
4	4.38	240
5	5.28	160
6	5.28	220
7	7.45	170
8	10.0	210
9	5.75	190
10	5.03	250
11	3.37	230
12	4.9	205
13	7.7	130
14	6.0	140
15	5.8	150

3.4 Порядок проведення роботи

1. Провести на ЕОМ розрахунок стійкості електропередачі та отримати графіки $\Delta\delta = f(t)$ і $\Delta\omega = f(\Delta\delta)$ для наступних випадків :

1.1. Для значення кута $\delta_0 = 60^\circ$ при двох значеннях демпферного коефіцієнта P_d :

$$P_d = 0,$$

$$P_d = 5.$$

1.2. При $P_d = 5$ і при різних значеннях кута δ_0 :

$$\delta_0 = 30^0,$$

$$\delta_0 = 80^0,$$

$$\delta_0 = 120^0.$$

2. Провести аналіз статичної стійкості і зробити висновки.

3.5 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити :

- вихідну схему електропередачі;
- рівняння електромеханічного стану електропередачі;
- розрахунок параметрів, необхідних для вводу в ЕОМ та результати розрахунку стійкості.

В кінці звіту необхідно зробити висновки по результатах роботи.

3.6 Контрольні запитання

1. Поняття про статичну стійкість, малі збурення, кут вибігу, перетин, максимально допустимий перетік, пропускну здатність перетину.

2. Фізична картина процесів, які протікають в системах при малих збуреннях.

3. Яка послідовність дослідження статичної стійкості у лабораторній роботі ?

4. Метод малих коливань.
5. Практичний критерій статичної стійкості.
6. Запас статичної стійкості режиму.
7. Як впливає демпфування на граничне значення потужності ?
8. Поясніть по отриманим графікам залежність для статично стійких та статично нестійких режимів.
9. Нормативні показники статичної стійкості.
10. Як визначити граничне значення потужності перетину?

3.7 Література

- 1 Правила улаштування електроустановок. Україна Видання офіційне. Міненерговугілля України. — Х.: Форт, 2017. — 760 с.
- 2.Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. — 5-те вид. доопрац. та допов. — Дніпро : НГУ, 2016. — 600 с.
- 3 ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Госстандарт. М., 1988.
- 4 Черемісін М.М., Мороз О.М., Єгоров О.Б., Швець С.В.Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]/ М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець.—Харків: ТОВ «В справі», 2016. —260с. —Бібліогр.: с. 254. — 200 пр. ISBN978-617-7305-20-9.
5. Сіделєв М. І. Матрично-топологічна модель електромагнітних кіл. Електротехніка та електроенергетика, [S.l.], п. 1, р. 5-14, мау. 2018. ISSN 2521-6244. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-1>.