

ПЕРЕХІДНІ ТА НЕСТАЦІОНАРНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи (РГЗ)
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
денної та заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс

Рецензенти:

П. Ф. Буданов – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

І. С. Варшамова – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням
Науково-методичної ради Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 7 від 28 лютого 2025 року)*

П 27 **Перехідні та нестационарні режими роботи енергосистем : методичні вказівки до виконання самостійної роботи (РГЗ) для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня денної та заочної форм здобуття освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / укладачі І. В. Пантелєєва, О. М. Пономаренко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 16 с.)**

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи (РГЗ) містять стислі теоретичні відомості про електромеханічні перехідні процеси без пояснень фізики процесів. Наведені приклади задач з їх розв'язком, а також варіанти завдань для самостійного опрацювання і питання для самоперевірки.

УДК 621 (075.5)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Пантелєєва І. В., Пономаренко О. М.,
уклад., 2025

ЗМІСТ

1. Мета практичних занять та загальні положення дисципліни	5
2. Розрахунок коефіцієнту запасу стійкості та оцінка впливу факторів на стійкість системи	6
3. Аналіз динамічної стійкості	10
Список використаних джерел	13

1. Мета практичних занять та загальні положення дисципліни

Предмет вивчення дисципліни – несталі режими електроенергетичної системи (ЕЕС) в цілому та її підсистеми – простішої електричної системи. Це один з передбачених навчальним планом спеціальних курсів, що дозволяють придбати навички, необхідні для кваліфікованого проектування й експлуатації ЕЕС.

Мета вивчення дисципліни – формування знань в області електромеханічних перехідних процесів у системах електропостачання й електроенергетичної системи в цілому.

Задача дисципліни – придбання навичок і умінь розраховувати й дослідити несталі режими зазначених систем.

Електроенергетична система є електромеханічною, тобто сукупністю механічних систем і електричних ланцюгів, в яких механічні й електричні процеси взаємозалежні і не можуть протікати незалежно один без одного.

Вивчення дисципліни засноване на знанні загальноінженерних курсів: «Вища математика», «Теоретичні основи електротехніки», «Механіка», а також спеціальних курсів: «Електричні машини», «Електричні системи і мережі», «Електричні станції і підстанції», «ОПВР».

У свою чергу ця дисципліна необхідна для вивчення спеціальних дисциплін: «Релейний захист», «Автоматизація електроустановок» і т.д.

Значення дисципліни в рішенні загальних енергетичних задач полягає в тому, що вона дозволяє визначити вимоги до окремих елементів, підвищити надійність і економічність, а також електроенергетичних систем у цілому. Подальший розвиток методів аналізу перехідних процесів дозволить не тільки підвищити надійність роботи системи, але і розробляти й удосконалювати нові методи управління цими процесами.

Перехідні процеси в електроенергетичній системі визначаються в основному процесами в синхронних машинах, тому необхідно повторити розділ «Синхронні машини» з курсу «Електричні машини». Варто усвідомити фізичний

зміст параметрів синхронної машини в нормальному і перехідному режимах і визначити зв'язок між цими параметрами.

Об'єкт вивчення електромеханічних перехідних процесів – взаємозалежні електромагнітні і механічні процеси в системах електропостачання в нормальних і аварійних режимах. При аналізі електромеханічних перехідних процесів найважливіше значення додається питанням стійкості (статистичної, динамічної і результируючої) [3,4,5].

При вивченні окремих тем необхідно контролювати рівень засвоєння шляхом відповіді на питання для самоперевірки і самостійного рішення задач, що приведені.

2. Розрахунок динамічного переходу методом послідовних інтервалів

Завдання 1

У простішій електричній системі станція G забезпечена АРЗ пропорційного типу і передачі потужності через ЛЕП напругою 220 кВ, довжиною 220 км у систему, потужність якої значно більше потужності станції.

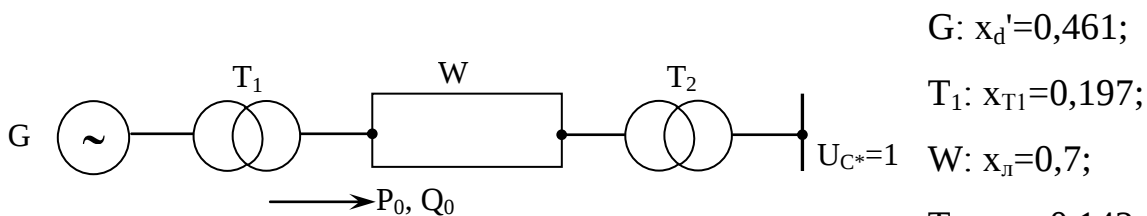


Рис. 1.

$$G: x_d'=0,461;$$

$$T_1: x_{T1}=0,197;$$

$$W: x_L=0,7;$$

$$T_2: x_{T2}=0,142;$$

$$P_0=0,583; \cos \varphi=0,85.$$

Необхідно: дослідити вплив на коефіцієнт запасу статичної стійкості наступних факторів:

- 1) коефіцієнту потужності у шин системи, яка приймає;
- 2) опору генераторів станції, яка передає, x_d' ;
- 3) довжини лінії, l ;
- 4) розчеплення проводів у фазі, n .

Рішення

$$\text{a)} \quad K_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{max}} - P_0}{P_0} \cdot 100\%,$$

де максимальна потужність, що передається, співпадає з межею стійкості;

$$\text{б)} \quad P_{\text{max}} = \frac{E_q \cdot U_{c*}}{X_{d\Sigma}};$$

$$\text{в)} \quad X_{d\Sigma} = x'_d + x_{T1} + \frac{x_{T2}}{2} + x_{T2};$$

$$X_{d\Sigma} = 0,461 + 0,197 + \frac{0,7}{2} + 0,142 = 1,15;$$

$$\text{г)} \quad E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2};$$

$$Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0; \quad Q_0 = 0,583 \cdot 0,62 = 0,362;$$

$$E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,362 \cdot 1,15}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,583 \cdot 1,15}{1} \right)^2} = 1,57;$$

$$\text{д) тоді:} \quad P_{\text{max}} = P_{\text{пред}} = \frac{1 \cdot 1,57}{1,15} = 1,365;$$

$$\text{е)} \quad K_{\text{зап}} = \frac{1,365 - 0,583}{0,583} \cdot 100\% = 134\%.$$

Система має достатній запас стійкості, тому що система враховується стійкою, якщо $K_{\text{зап}} \geq 20\%$.

Результати аналогічних розрахунків приведені на рис. 2÷5 для різних $\cos \varphi$, x'_d , l і n .

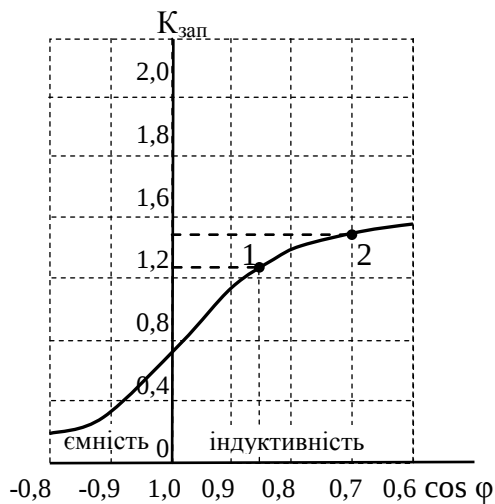


Рис. 2. Вплив $\cos \varphi$

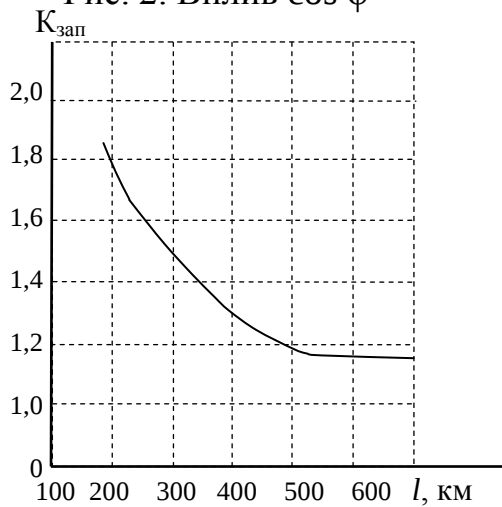


Рис. 4. Вплив довжини ЛЕП

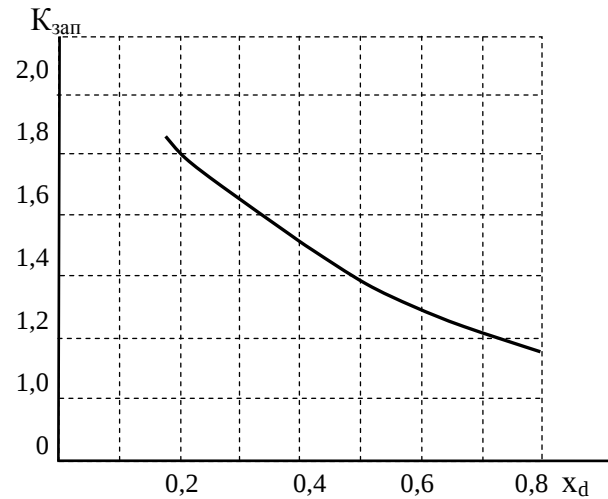


Рис. 3. Вплив x_d'

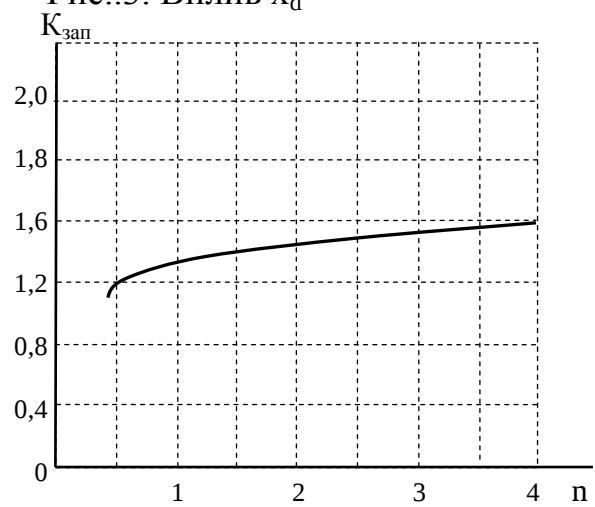


Рис. 5. Вплив розчеплення проводів у фазі ЛЕП

По результатам розрахунків можна зробити наступні висновки.

1. Збільшення передачі реактивної потужності ($\cos \varphi$) приводить до збільшення запасу стійкості внаслідок збільшення ЕДС генератора.
2. Зниження опору x_d також збільшує запас стійкості. Однак, таке збільшення недоцільне, тому що приводить до значного збільшення вартості генератора через зміни в його конструкції.
3. Збільшення довжини ЛЕП приводить до зменшення запасу стійкості.
4. Розчеплення проводів у фазі ЛЕП приводить до збільшення запасу стійкості внаслідок зниження індуктивного опору лінії. У даному випадку $K_{\text{зап}}$ зростає незначно, тому що довжина лінії і частка її опору у сумарному опорі $x_{d\Sigma}$ невелика.

Приклади розрахунку деяких факторів на $K_{\text{зап}}$

а) вплив x_d

№	x'_d	$x_{d\Sigma}$	E_q	P_{max}	$K_{\text{зап}}$
1.	0,461	1,15	1,57	1,365	1,34
2.	0,2	0,89	1,42	1,596	1,74
3.	0,6	1,29	1,65	1,279	1,19
4.	0,8	1,49	1,77	1,188	1,04

б) вплив $\cos \varphi$

№	$\cos \varphi$	Q_0	E_q	P_{max}	$K_{\text{зап}}$
1.	0,85	0,36	1,57	1,365	1,34
2.	0,9	0,28	1,482	1,289	1,21
3.	1,0	0	1,204	1,047	0,8
4.	0,6	0,775	2	1,739	1,98

Аналогічно розраховуються інші фактори у табличній формі.

Завдання 2

Електростанція працює через ЛЕП на систему нескінченної потужності (схема і параметри із завдання 1). Крім того, $x_d=1,8$.

Необхідно визначити запас статичної стійкості системи у випадку:

- 1) відсутності у генераторів автоматичного регулювання збудження (АРЗ);
- 2) при наявності АРЗ пропорційного типу;
- 3) при наявності АРЗ сильної дії.

Рішення

1. При відсутності АРЗ межа потужності, що передається, визначається, виходячи з того, що незмінною є синхронна ЕДС: $E_d = \text{const.}$

$$1) x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + \frac{x_{\text{л}}}{2} + x_{T2};$$

$$x_{d\Sigma} = 1,8 + 0,197 + \frac{0,7}{2} + 0,142 = 2,49;$$

$$2) E_d = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2};$$

$$E_d = \sqrt{\left(1 + \frac{0,362 \cdot 2,49}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,583 \cdot 2,49}{1} \right)^2} = 2,39;$$

$$3) P_{\max} = \frac{E_d \cdot U_c}{x_{d\Sigma}}; P_{\max} = \frac{2,39 \cdot 1}{2,49} = 0,96;$$

$$4) K_{\text{зап}} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0}; K_{\text{зап}} = \frac{0,96 - 0,583}{0,583} \cdot 100\% = 0,65.$$

2. При наявності у генератора АРЗ пропорційного типу, коефіцієнт запасу визначається із умови, що постійною є ЕДС за перехідним опором: $E'_q = \text{const}$, $x'_d = 0,46$; $K_{\text{зап}} = 1,34$ – цей випадок розглядався у попередньому завданні.

3. АРЗ сильної дії у залежності від їх настройки, забезпечують постійну напругу або на затисках генераторів, або на початку лінії: $U_r = \text{const}$.

Тоді розраховується опір системи, тобто зовнішній опір:

$$1) x_c = x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}; x_c = 0,197 + \frac{0,7}{2} + 0,142 = 0,689.$$

2) Напруга на затисках генератора:

$$U_r = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot x_c}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_c}{U_c} \right)^2};$$

$$U_r = \sqrt{\left(1 + \frac{0,362 \cdot 0,689}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,583 \cdot 0,689}{1} \right)^2} = 1,31.$$

$$3) P_{\max} = \frac{U_r \cdot U_c}{x_c}; P_{\max} = \frac{1,31 \cdot 1}{0,689} = 1,9.$$

$$4) K_{\text{зап}} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0}; K_{\text{зап}} = \frac{1,9 - 0,583}{0,583} \cdot 100\% = 2,26.$$

Висновок: зростання межі потужності, що передається, обумовлене тим, що АРЗ повністю або частково виключає вплив власних опорів генераторів на статичну стійкість, створюючи так звану «зону штучної» стійкості на характеристиці потужності.

3. Аналіз динамічної стійкості

Вивчення теми варто починати з аналізу переходу від одного режиму до іншого по кутовій характеристиці потужності. При цьому варто представляти, що

причиною великих збурень можуть бути різкі зміни як параметрів системи, так і режиму.

Оскільки для визначення практичних критеріїв динамічної стійкості аналіз перехідних процесів виконується спрощено, то необхідно знати прийняті при цьому допущення. Зокрема, процеси розглядаються при великих збуреннях, але малих змінах швидкості і незмінності ЕДС.

Загальним методом дослідження характеру відносного руху ротору генератора є метод чисельного інтегрування. У практичних розрахунках часто використовується спрощена модифікація чисельного інтегрування – метод послідовних інтегралів. Це найбільш загальний метод дослідження перехідного процесу при великих збуреннях, він не вимагає введення будь-яких обмежень у відношенні моментів.

Метод послідовних інтервалів дозволяє одержати залежність зміни кута δ від часу, по якій можна судити про динамічну стійкість системи [2,3,4].

Завдання 3

У ЛЕП виникає неочікуване відключення однієї з двох паралельних ліній. Параметри нормального режиму: $P_0=1$; $Q_0=0,2$; $U_0=1$; $x'_d=0,295$; $x_{T1}=0,138$; $x_{T2}=0,122$; $x_l=0,244$ (для двох ланцюгів); $T_j=8,18$.

Необхідно провести розрахунок динамічного переходу та побудувати криву зміни кута δ у часі. Прийняти постійною перехідну ЕДС.

Рішення

I. Розрахунок нормального режиму:

$$x_{d\Sigma}^I = x'_d + x_{T1} + x_l + x_{T2}; \quad x_{d\Sigma}^I = 0,295 + 0,138 + 0,244 + 0,122 = 0,799:$$

$$E'_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot x_{d\Sigma}^I}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_{d\Sigma}^I}{U_c} \right)^2};$$

$$Q_0 \cdot x_{d\Sigma}^I; E'_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,2 \cdot 0,799}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,799}{1} \right)^2} = 1,41;$$

$$\delta_0^I = \arctg \frac{P_0 \cdot x_{d\Sigma}^I}{1 + Q_0 \cdot x_{d\Sigma}^I}; \delta_0^I = \arctg \frac{1 \cdot 0,799}{1 + 0,2 \cdot 0,799} = \arctg 0,69;$$

$$\delta_0^I = 34,6^\circ;$$

$$P_{\max}^I = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}^I}; P_{\max}^I = \frac{1,41 \cdot 1}{0,799} = 1,765.$$

II. Аварійний режим:

$$x_{d\Sigma}^{II} = x'_d + x_{T1} + x_{л} + x_{T2}; x_{d\Sigma}^{II} = 0,295 + 0,138 + 0,122 + 0,488 = 1,043;$$

$$P_{\max}^{II} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}^{II}}; P_{\max}^{II} = \frac{1,41 \cdot 1}{1,043} = 1,35.$$

Метод послідовних інтервалів

1) I інтервал. Приймаємо $\Delta t = 0,05$ с.

а) Електрична потужність у перший момент часу після відключення однієї з ЛЕП:

$$P_{(0)} = P_{\max}^{II} \cdot \sin \delta_{(0)}^I; P_{(0)} = 1,35 \cdot \sin 34,5^\circ = 0,764.$$

б) Залишок потужності на початку першого інтервалу:

$$\Delta P_{(0)} = P_0^I - P_{(0)}; \Delta P_{(0)} = 1 - 0,764 = 0,236.$$

в) Збільшення кута протягом першого інтервалу:

$$\Delta \delta_{(1)} = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_j} \cdot \frac{\Delta P_0}{2} = K \cdot \frac{\Delta P_0}{2}; \Delta \delta_{(1)} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{8,18} \cdot \frac{0,236}{2} = 0,65^\circ.$$

г) Значення кута δ у кінці I інтервалу:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)}; \delta_{(1)} = 34,6^\circ + 0,65^\circ = 35,25^\circ.$$

2) II інтервал.

а) Електрична потужність, яка видається генератором, на початку II інтервалу:

$$P_{(1)} = P_{\max}^{II} \cdot \sin \delta_{(1)}^I; P_{(1)} = 1,35 \cdot \sin 35,25^\circ = 0,778.$$

б) Залишок потужності на початку другого інтервалу:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)}; \Delta P_{(1)} = 1 - 0,778 = 0,222.$$

в) Зростання кута δ протягом другого інтервалу:

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \cdot \Delta P_{(1)}; \Delta \delta_{(2)} = 0,65^\circ + 5,5 \cdot 0,222 = 1,87^\circ.$$

г) Кут δ наприкінці другого інтервалу:

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}; \delta_{(2)} = 35,25^\circ + 1,87^\circ = 37,12^\circ.$$

3) III інтервал.

а) $P_{(2)} = P_{\max}^{\text{II}} \cdot \sin \delta_{(2)}^{\text{I}}; P_{(2)} = 1,35 \cdot \sin 37,12^\circ = 0,813.$

б) $\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)}; \Delta P_{(2)} = 1 - 0,813 = 0,187.$

в) $\Delta \delta_{(3)} = \Delta \delta_{(2)} + K \cdot \Delta P_{(2)}; \Delta \delta_{(3)} = 1,87^\circ + 5,5 \cdot 0,187 = 2,9^\circ.$

г) $\delta_{(3)} = \delta_{(2)} + \Delta \delta_{(3)}; \delta_{(3)} = 37,12^\circ + 2,9^\circ = 40,02^\circ.$

Всі наступні інтервали розраховуються аналогічно (як II та III інтервали).

Одночасно з розрахунком динамічного переходу, складається таблиця результатів.

Таблиця 1 - Залежність $\delta=f(t)$

Час, с	0	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$
Кут δ°	$\delta_{(0)}$	$\delta_{(1)}$	$\delta_{(2)}$	$\delta_{(3)}$

Розрахунок продовжується до тих пір, доки не визначиться характер перехідного процесу, тобто, доки кут δ не почне зменшуватись або доки не буде ясно, що кут безмежно зростає (значення значно більше 90°), тобто порушиться стійкість системи, а генератор випаде з синхронізму.

У кінці розрахунку будується графік зміни кута δ у часі $\delta=f(t)$ і робиться висновок про характер динамічного переходу. Графік $\delta=f(t)$ може мати вигляд, представлений на рис. 6.

Дуже часто треба визначити не тільки характер перехідного процесу, а й знайти час відключення к.з., якщо відомий граничний кут відключення $\delta_{\text{гр. відкл.}}$.

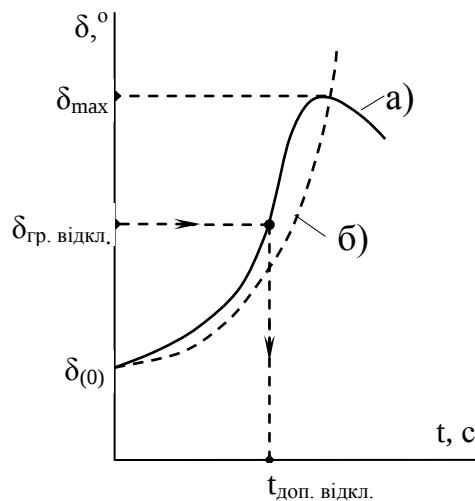


Рис. 6. Зміна кута δ у часі:

- а) динамічний перехід стійкий;
- б) порушення стійкості системи (кут δ безперервно зростає)

Дуже часто треба визначити не тільки характер перехідного процесу, а й знайти граничний час відключення к.з., якщо відомий граничний кут відключення $\delta_{\text{гр. відкл.}}$. Проміжок часу, впродовж якого ротор встигає досягти цього кута, називається гранично допустимим часом відключення к.з., який визначає ті чи інші вимоги відносно швидкості відключення вимикачів та релейного захисту.

На характеристиці $\delta=f(t)$ (рис. 6) у масштабі на осі δ показується заданий кут $\delta_{\text{гр. відкл.}}$, потім на осі t визначається $t_{\text{доп. відкл.}}$.

Метод послідовних інтервалів – спосіб чисельного розв’язання диференціальних рівнянь, що описують перехідні електромеханічні процеси, є найбільш загальним методом аналізу динамічної стійкості. Значною перевагою його є те, що він дає картину протікання процесу у часі і, завдяки цьому, дозволяє ввести у розрахунок такі чинники, вплив яких залежить від часу [1,2].

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри нормального режиму для простішої електричної системи у відносних одиницях

№ вар.	P_0	Q_0	$U_{o.c.}$	X'_α	X_{T1}	X_{T2}	X_L
1	1	0,15	1	0,135	0,138	0,122	0,244
2	1	0,16	1	0,185	0,127	0,131	0,272
3	1	0,17	1	0,175	0,14	0,41	2,12
4	1	0,18	1	0,171	0,131	2,63	0,313
5	1	0,19	1	0,172	0,175	0,128	0,329
6	1	0,2	1	0,167	0,144	0,139	0,335
7	1	0,21	1	0,239	0,15	0,222	0,41
8	1	0,22	1	0,2	0,167	0,257	0,426
9	1	0,23	1	0,26	0,18	0,3	0,438
10	1	0,24	1	0,182	0,155	0,321	0,444
11	1	0,25	1	0,28	0,187	0,328	0,452
12	1	0,26	1	0,217	0,191	0,441	0,459
13	1	0,27	1	0,202	0,199	2,0	0,463
14	1	0,14	1	0,263	2,1	0,195	0,484
15	1	0,156	1	0,224	2,2	0,178	0,512
16	1	0,168	1	0,314	0,129	0,25	0,534
17	1	0,195	1	0,304	0,135	2,1	1,213
18	1	0,186	1	0,328	0,189	0,125	1,4
19	1	0,215	1	0,4	0,19	0,138	1,48
20	1	0,205	1	0,368	0,24	0,127	1,82

Список використаних джерел

1. Пантелєєва І.В., Олійник Ю.С. Перехідні процеси в енергосистемах та розрахунок параметрів елементів енергосистеми: навч.-метод. посібн. для студентів денної та заочної форм навчання ОС «бакалавр», «магістр» спец. 141 Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка/І.В. Пантелєєва, Ю.С. Олійник; УПА – Харків: [б.в.], 2018. – 130 с.
2. Пантелєєва І.В. Теорія, режими роботи та розрахунок параметрів елементів енергосистеми/Навч. Посібник. Харків. – 2014. – 242 с.
3. Остапчук О.В., Денисюк П.Л., Матеєнко Ю.П. Електрична частина станцій та підстанцій. Навчальний посібник. – Київ: КПУ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 182 с.
4. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання. – Київ: «Політехніка», 2022. – 250 с.
5. Остапчук О.В., Бондаренко О.Л. Проектування електричних станцій. Навчальний посібник. – Київ, 2023. – 153 с.
6. Козлов В.Д. Електрична частина станцій та підстанцій. Підручник. – Київ: НАНУ, 2018. – 312 с.
7. Енергетика: [сайт]. Режим доступу: <https://LEONARDO.ENERGY.ORG/>

Електронне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

ПАНТЄЛЄЄВА Ірина Вікторівна
ПОНОМАРЕНКО Олена Михайлівна

ПЕРЕХІДНІ ТА НЕСТАЦІОНАРНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи (РГЗ)
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
денної та заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 28.02.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 0,518. Обсяг 0,372 Мб. Зам. № 80/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна