

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до самостійної роботи

з навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності*

*141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025

Методичні рекомендації до самостійної роботи з навчальної дисципліни «Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних та енергетичних системах» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 48 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова

Рецензент

Я. Б. Форкун, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 5 від 19.11.2024.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ЗАВДАНЬ.....	5
1.1 Короткі теоретичні відомості.....	5
1.2 Завдання виконання самостійної роботи.....	6
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЛЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ХОЛОСТОГО ХОДУ ЛЕП.....	8
2.1 Короткі теоретичні відомості.....	8
2.2 Завдання для виконання самостійної роботи.....	11
3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЛЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ З ЛЕП.....	12
3.1 Короткі теоретичні відомості.....	12
3.2 Завдання для виконання самостійної роботи.....	13
4 РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕП НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	14
4.1 Короткі теоретичні відомості.....	14
4.2 Завдання для самостійної роботи.....	18
5 РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕС НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	21
5.1 Короткі теоретичні відомості.....	21
5.2 Завдання для самостійної роботи.....	22
6 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ВСТАНОВЛЕНИХ РЕЖИМІВ СЕП	27
6.1 Короткі теоретичні відомості.....	27
6.2 Завдання для самостійної роботи.....	32
Список рекомендованих джерел.....	36
Додатки.....	37

ВСТУП

Вивчення дисципліни «Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних та енергетичних системах» дозволяє сформувати у студентів цілісне уявлення про моделювання як одного з засобів аналізу роботи та режимів систем електропостачання.

У цьому курсі вивчаються основні розділи прикладної математики, які найбільше застосовуються під час вирішення базових завдань електроенергетики. Це дозволяє пов'язати математику як загальнотеоретичну науку з її застосуванням в інженерній практиці та наукових дослідженнях, сформувати грамотний технічний підхід до вирішення інженерних та наукових проблем, а також підготувати студента до більш глибокого та критичного сприйняття спеціальних дисциплін.

Основною метою самостійної роботи є вивчення принципів побудови математичних моделей у завданнях дослідження електромеханічних процесів, а також проектування та керування об'єктами електроенергетики. Зокрема, до них належать дослідження фізичних процесів у довгих лініях на основі моделей мікрорівня, розв'язання задачі розрахунку встановлених режимів та аналізу статичної стійкості СЕС на основі моделей макрорівня, а також задач синтезу та аналізу логічних схем із використанням моделей мета рівня.

Для кожної самостійної роботи наведено короткі теоретичні відомості, завдання на самостійну роботу, алгоритм та методику її виконання. Варіанти розрахункових схем та таблиці вихідних даних винесені до додатків. Особливу увагу приділено практичним навичкам використання сучасних методів комп'ютерного моделювання, зокрема в програмних системах *Mathcad*, *Microsoft Excel*, *Electronics Workbench*.

1 ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ЗАВДАНЬ

Мета самостійної роботи. Застосування різних видів моделей під час вирішення електротехнічних завдань у середовищі *Mathcad* та *Electronics Workbench*. Дослідження можливостей графічного моделювання для подання процесів та функцій у двовимірному та тривимірному просторах у середовищі *Mathcad* та *Excel*.

1.1 Короткі теоретичні відомості

Моделювання є універсальним і ефективним методом пізнання навколишнього світу. Процес розв'язання будь-якої задачі нерозривно пов'язаний із формуванням того чи іншого виду моделі.

Модель – це матеріальний чи уявний об'єкт, який у процесі пізнання (вивчення) заміщає об'єкт-оригінал, зберігаючи у своїй найбільш типовій його риси, притаманні для вирішуваного завдання.

Під час побудови моделі враховуються ті чинники, що найбільш істотні для проведеного дослідження. Отже, *фундаментальною властивістю моделі* є те, що вона завжди бідніша за об'єкт-оригінал.

Використання моделі дозволяє:

- зрозуміти, як влаштований реальний об'єкт, які його структура, властивості, закони розвитку та взаємодії з навколишнім світом;
- навчитися керувати об'єктом (процесом), вибрати найкращий спосіб керування при заданих цілях;
- прогнозувати прямі та непрямі наслідки реалізації заданих способів та форм впливу на об'єкт.

Ефективна модель повинна мати низку властивостей, таких як [4]:

- *адекватність* – ступінь відповідності об'єкту-оригіналу (повнота моделі);

– *універсальність* – застосування моделі до аналізу численної групи об’єктів і вирішення широкого класу завдань;

– *економічність* – кількість обчислювальних ресурсів, які необхідні реалізації моделі.

Моделі можна класифікувати за низкою ознак, наприклад, за способом подання моделі поділяються на матеріальні та ідеальні.

До *матеріальних* можна віднести, зокрема, *фізичні моделі*, які є збільшеною чи зменшеною копією об’єкта-оригіналу.

Ідеальні моделі включають образні (іконічні), вербальні (словесні), знакові моделі, до них відносяться графічні і математичні моделі *дозволяють* за допомогою графіки відобразити суттєві властивості *об’єкта*. розв’язувати різноманітні дослідницькі завдання.

У самостійній роботі досліджуються можливості застосування різних форм моделей для вирішення електротехнічних завдань за допомогою універсальних та спеціалізованих програмних систем, таких як *Mathcad*, *Electronics Workbench*, *Microsoft Excel*.

1.2 Завдання на виконання самостійної роботи

1. Як вихідні дані задана схема електричних з’єднань за варіантами (дод. А, табл. А.1., рис. А.1., А.2):

– сформувати фізичну модель у вигляді електричної схеми в *Electronics Workbench* та виміряти значення струмів I_1, I_2, I_3 . Короткий опис принципів роботи серед *Electronics Workbench* представлений у додатку В;

– сформувати математичну модель, використовуючи закони Ома та Кірхгофа та розрахувати значення струмів I_1, I_2, I_3 у середовищі *Mathcad*;

– порівняти результати, отримані за допомогою фізичної та математичної моделей.

2. Як вихідні дані задана схема електричних з'єднань (дод. А, табл. А.2, рис. А.3, А.4):

- сформувати фізичну модель у вигляді електричної схеми в *Electronics Workbench* та виміряти значення струмів I_1, I_2, I_3 ;

- сформувати математичну модель у вигляді системи рівнянь на основі першого та другого законів Кірхгофа та розрахувати значення струмів I_1, I_2, I_3 у середовищі *Mathcad* двома способами:

 - $\Rightarrow$ з використанням конструкції $\{Given.....Find\}$;

 - $\Rightarrow$ із використанням матричного методу.

3. Задано рівняння, що моделює перехідні процеси в електричній системі, а також функція у тривимірному просторі (дод. А, пункт 3):

- сформувати графічну модель серед *Mathcad*, побудувавши графіки перехідних процесів на інтервалі часу $t = 0...10$, якщо коефіцієнт k приймає два можливих значення: $k_1 = 20, k_2 = 50$;

- сформувати графічну модель процесу, поданого функцією в тривимірному просторі. Проаналізувати можливості роботи з графічними моделями, які надає *Mathcad*.

4. Задано статистичні дані про навантаження підприємства (дод. А, табл. А.3):

- побудувати графік навантаження серед *Microsoft Excel*. Проаналізувати можливості роботи з графічними моделями, які надає *Microsoft Excel*;

- визначити значення математичного очікування та середньоквадратичного відхилення навантаження на заданому інтервалі за допомогою вбудованих функцій *Microsoft Excel*.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЛЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ХОЛОСТОГО ХОДУ ЛЕП

Мета самостійної роботи. Ознайомлення з властивостями та математичними моделями ЛЕП, отримання навичок дослідження об'єкта з його математичної моделі.

2.1 Короткі теоретичні відомості

Передача електроенергії ЛЕП обумовлена поширенням електромагнітних хвиль уздовж проводів. З урахуванням розподіленості параметрів ліній та зміни струмів і напруг у часі співвідношення між струмами та напруги в лінії записуються у вигляді диференціальних рівнянь у приватних похідних із незалежними змінними часу та однієї просторової координати. Розв'язання таких рівнянь з урахуванням граничних умов та синусоїдальності зміни струмів та напруг у часі записується у символічній формі для діючих значень напруг та струмів по кінцях ЛЕП [3, 4]:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch}(\dot{\gamma}l) + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \operatorname{sh}(\dot{\gamma}l), \quad (2.1)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \operatorname{sh}(\dot{\gamma}l) + \dot{I}_2 \operatorname{ch}(\dot{\gamma}l), \quad (2.2)$$

де $\dot{U}_1 - \dot{I}_1$ комплексні діючі значення напруги і струму на початку лінії (з боку живлення);

$\dot{U}_2$ та $\dot{I}_2$ – комплексні діючі значення напруги та струму в кінці лінії (з боку навантаження);

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{z}_0}{\dot{y}_0}} - \text{хвильовий опір};$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}_0 \cdot \dot{y}_0} = \alpha + j\beta - \text{коефіцієнт поширення хвилі};$$

де α – коефіцієнт загасання хвилі;

β – коефіцієнт фази;

$\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$ – комплексна величина погонного опору фази ЛЕП;

$\dot{y}_0 = g_0 + jb_0$ – комплексна величина погонної провідності фази ЛЕП.

Для ідеальної лінії $r_0 = 0$, $g_0 = 0$.

Тут і нижче для трифазної системи значення струму збільшено в $\sqrt{3}$ раз, тому під час порівняння струму з гранично допустимим його варто ділити на $\sqrt{3}$.

Рівняння (2.1) та (2.2) називаються рівняннями довгої лінії та можуть бути подані як рівняння чотириполюсника (рис. 2.1) через параметри $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$.

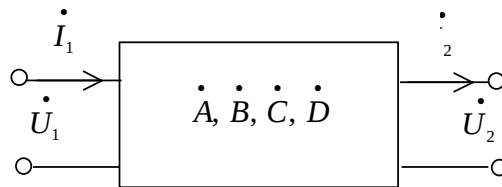


Рисунок 2.1 – Чотириполюсник

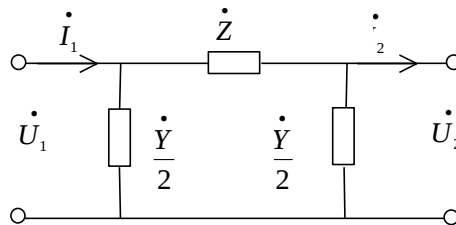


Рисунок 2.2 – П-подібна схема заміщення ЛЕП

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_2 + \dot{B} \dot{I}_2, \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C} \dot{U}_2 + \dot{D} \dot{I}_2. \quad (2.4)$$

Таким чином, математичною моделлю ЛЕП, що враховує розподіл параметрів однорідної ЛЕП, є рівняння чотириполюсника з коефіцієнтами, які виходять з рівнянь (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) відповідно. Назвемо рівняння (2.1) та (2.2) *моделлю I* (рівняння довгої лінії).

Для спрощення дослідження властивостей ЛЕП іноді запроваджують поняття ідеальної лінії. В ідеальній лінії параметри r_0 і g_0 дорівнюють нулю, що відповідає відсутності втрат. Таку модель назвемо *моделью 2* (рівняння ідеальної лінії). У практичних розрахунках дуже часто нехтують розподілом параметрів лінії внаслідок того, що більшість ліній має невелику довжину, і інтервал часу поширення електромагнітних хвиль у таких лініях значно менше періоду зміни синусоїдальної напруги і струму (0,02 с). Математична модель лінії у разі значно спрощується і називається спрощеною моделлю із зосередженими параметрами – *модель 3*.

Коефіцієнти чотириполюсника всіх моделей наведені нижче.

Модель 1 $\dot{A} = \dot{D} = \text{ch}(\dot{\gamma}l)$; $\dot{B} = \dot{Z}_c \text{sh}(\dot{\gamma}l)$; $\dot{C} = \frac{\text{sh}(\dot{\gamma}l)}{\dot{Z}_c}$.

Модель 2 $\dot{A} = \dot{D} = \cos(\dot{\beta}l)$; $\dot{B} = j \dot{Z}_c \sin(\dot{\beta}l)$; $\dot{C} = j \frac{\sin(\dot{\beta}l)}{\dot{Z}_c}$.

Модель 3. Якщо ЛЕП представити П-подібною схемою заміщення із зосередженими параметрами (рис. 2.2) та припустити, що значення цих параметрів можна обчислити множенням погонних параметрів на довжину ЛЕП:

$$\dot{Z} = \dot{z}_0 l ; \dot{Y} = \dot{y}_0 l ,$$

то отримаємо ще одну модель. Коефіцієнти чотириполюсника через параметри схеми заміщення рівні:

$$\dot{A} = \dot{D} = 1 + \dot{z}_0 l \frac{\dot{y}_0 l}{2} = 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2} ; \dot{B} = \dot{z}_0 l = \dot{Z} ; \dot{C} = \dot{y}_0 l + \dot{z}_0 l \frac{(\dot{y}_0 l)^2}{2} = \dot{Y} + \dot{Z} \left(\frac{\dot{Y}}{2} \right)^2 .$$

Режим холостого ходу ЛЕП. За холостого ходу струм наприкінці ЛЕП дорівнює нулю ($\dot{I}_2 = 0$), $\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_2$ і $\dot{I}_1 = \dot{C} \dot{U}_2$.

Незважаючи на відсутність навантаження по лінії, протікає струм, обумовлений провідністю лінії, і напруги по кінцях лінії не рівні між собою. Крім того, такий режим дуже небезпечний для лінії через великі значення напруги та

струмів. Для зниження небезпечних рівнів режимних параметрів здійснюють компенсацію ємнісних струмів за допомогою установки в ЛЕП спеціальних котушок індуктивностей реакторів.

2.2 Завдання для виконання самостійної роботи

Вихідні дані наведено у додатку Б за варіантами.

1. Встановіть вихідні параметри лінії, режиму та обмеження для лінії.
2. Знайти опору α , β , γ для ідеальної ЛЕП (використовувати *модель 2*).
3. Визначити параметри чотириполюсника для ідеальної лінії (для режиму холостого ходу).
4. Знайти напругу в кінці лінії. Записати рівняння та побудувати графік зміни напруги вздовж ЛЕП.
5. Знайти струм на початку лінії. Записати рівняння та побудувати графік зміни струму вздовж ЛЕП.
6. Побудувати графіки зміни активної та реактивної потужності вздовж ЛЕП.
7. Зробити висновок про допустимість режиму, нанести на графіки рівні допустимих значень.

3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЛЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ З ЛЕП

Мета самостійної роботи. Ознайомлення з властивостями та математичними моделями ЛЕП, отримання навичок дослідження об'єкта з його математичної моделі.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Під час передачі потужності по ЛЕП виникають втрати потужності, тому напруги по кінцях лінії розрізняються за величиною та фазою. Для ліній великої протяжності цікавить визначення напруги і струмів по лінії різних її точках.

Найбільш економічний режим передачі потужності виникає, якщо опір навантаження ЛЕП дорівнює хвильовому опору. У цьому випадку відбита хвиля відсутня, і передача енергії відбувається з мінімальними втратами. Потужність, що передається в цьому режимі, називається натуральною і дорівнює

$$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_c}. \quad (3.1)$$

До переваг режиму передачі натуральної потужності належить таке:

- передача енергії відбувається із мінімальними втратами;
- сприятливий розподіл напруги вздовж ЛЕП $U_2 \approx U_1$;
- лінія самозбалансована за Q .

Струм у кінці лінії може бути визначений за співвідношенням:

$$I_2 = \frac{\dot{S}_2^*}{U_2}. \quad (3.2)$$

3.2 Завдання для виконання самостійної роботи

Задати вихідні дані для навантажувального режиму, потужність навантаження $P_2 -$, $Q_2 = 0$; $U_{1н}$.

Дослідити розподіл параметрів уздовж лінії у трьох режимах:

⇒ режим передачі натуральної потужності $P_2 = P_{нат}$;

⇒ режим передачі потужності більше натуральної $P_2 > P_{нат}$;

⇒ режим передачі потужності менше натуральної $P_2 < P_{нат}$.

У кожному з цих режимів зробити таке:

– використовуючи рівняння чотирьохполосника (2.3) і рівняння (3.2), скласти систему рівнянь, знайти струм і напругу в кінці лінії $\dot{I}_2$ за $\dot{U}_2$ допомогою блока $\{Given... find\}$;

– сформулювати математичні залежності для побудови графіків зміни напруги, струму, активної та реактивної потужності вздовж ЛЕП $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$, $Q(x)$ для кожного режиму.

Побудувати графіки зміни напруги, струму, активної та реактивної потужності вздовж ЛЕП $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$, $Q(x)$ в одних координатних осях.

Зробити висновки про закономірності зміни струму та напруги вздовж ЛЕП та допустимості для всіх трьох режимів.

4 РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕП НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета самостійної роботи. Моделювання встановлених режимів СЕП на основі лінійних рівнянь стану (узагальненого рівняння стану та рівняння вузлових напруг) у середовищі *Mathcad*.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Завдання розрахунку та аналізу встановлених режимів є базовим як під час проєктування, так і керування системами електропостачання (СЕП) [1, 2].

Під час проєктування СЕП розрахунок встановлених режимів проводиться з метою вибору і уточнення параметрів проєктованої системи. У процесі експлуатації подібні розрахунки дозволяють оперативно керувати та прогнозувати роботу СЕП. У цьому здійснюється оцінка допустимості режиму з технічних умов устаткування.

Постановка завдання розрахунку режиму функціонування визначається особливостями СЕП як складної технічної системи, яка включає велику кількість елементів, що виробляють, перетворюють, передають, розподіляють, споживають електроенергію і утворюють складно-замкнену розгалужену структуру.

Режимом роботи СЕП називається *стан* системи будь-якої миті часу чи певного інтервалу часу.

Під *встановленим режимом* розуміється такий стан СЕП, коли параметри системи на інтервалі часу зберігаються незмінними або змінюються достатньо повільно. Завдання розрахунку режимів СЕП, що встановилися, зводиться до визначення сукупності параметрів, що характеризують роботу системи: напруг у різних точках системи, струмів у її елементах, потоків і втрат потужності і т. д.

Проведення розрахунку встановленого режиму пов'язане з низкою основних етапів:

- попереднє перетворення та перехід до розрахункової схеми електричної системи;
- формування рівняння стану за відомими вихідними даними з урахуванням структури розрахункової схеми;
- вибір методу розрахунку, складання алгоритму та програми на ЕОМ;
- проведення розрахунку встановленого режиму на ЕОМ;
- аналіз точності одержаних результатів.

В основі розв'язання задачі розрахунку режиму лежить використання математичних моделей макрорівня, що становлять лінійні рівняння стану (наприклад, узагальнене рівняння стану, рівняння вузлових напруг [1, 2]) та нелінійні рівняння стану (наприклад, рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності або у формі балансу струмів [2]).

Математичні моделі макрорівня, що застосовуються в задачі розрахунку режимів, засновані на законах Ома і Кірхгофа, поданих у матричній формі запису.

Розглянемо дві форми лінійних рівнянь стану, які дозволяють зробити розрахунок встановленого режиму при спрощеному поданні навантаження і генерації потужності за допомогою лінійних джерел струму (задавального струму).

Модель 1. Класичною формою лінійної моделі є *узагальнене рівняння стану*.

$$1\text{-й закон Кірхгофа: } MI_B = J; \quad (4.1)$$

$$2\text{-й закон Кірхгофа: } NZ_B I_B = E_K, \quad (4.2)$$

де M – матриця інцидентій 1-го роду визначає зв'язок гілок та вузлів схеми.

Структура Правила формування

N – матриця інциденцій 2-го роду описує зв'язок гілок та незалежних контурів

$$M = \begin{matrix} \text{В} \\ \text{У} \\ \text{З} \\ \text{Л} \\ \text{И} \end{matrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{matrix} \text{Гілки} \\ \left[\begin{array}{c} \vdots \\ m_{ij} \\ \vdots \end{array} \right] \end{matrix} \quad m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо} \\ -1, & \text{якщо} \\ 0, & \end{cases} \begin{matrix} \bullet \xrightarrow{j} \\ \bullet \xleftarrow{j} \\ \end{matrix}$$

Структура Правила формування

$$N = \begin{matrix} \text{К} \\ \text{О} \\ \text{Н} \\ \text{Т} \\ \text{У} \\ \text{Р} \\ \text{И} \end{matrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{matrix} \text{Гілки} \\ \left[\begin{array}{c} \vdots \\ n_{ij} \\ \vdots \end{array} \right] \end{matrix} \quad n_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо} \\ -1, & \text{якщо} \\ 0, & \end{cases} \begin{matrix} \xrightarrow{j} \\ \xleftarrow{j} \\ \end{matrix}$$

n – число вузлів, m – число гілок, L – число незалежних контурів.

Вектор задавальних струмів. Матриця опорів гілок

$$J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \quad Z_B = \begin{bmatrix} Z_1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_m \end{bmatrix} = Y_B^{-1}$$

Вектор струмів гілок. Вектор ЕРС гілок. Вектор контурних струмів

$$I_B = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad E_B = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} \quad E_K = N E_B = \begin{bmatrix} E_{K1} \\ E_{K2} \\ \vdots \\ E_{KL} \end{bmatrix}$$

Узагальнене рівняння стану, отримане на основі 1-го та 2-го законів Кірхгофа, має вигляд:

$$AI_B = F, \quad (4.3)$$

де $A = \begin{bmatrix} M \\ \dots \\ NZ_B \end{bmatrix}$ – блокова матриця коефіцієнтів;

$F = \begin{bmatrix} J \\ \dots \\ E_K \end{bmatrix}$ – блокова матриця вільних членів рівнянь.

Подана модель є універсальною, але не економічною у зв'язку з великою розмірністю системи рівнянь (4.3).

Модель 2. Лінійна форма *рівняння вузлових напруг*

$$Y_y U_\Delta = J - MY_B E_B, \quad (4.4)$$

де $Y_y = MY_B M^T$ – матриця вузлових провідностей; $U_\Delta = [U_i - U_6]$ – матриця вузлових напруг; U_6 – базисна напруга балансуєного вузла; $Y_B = Z_B^{-1}$ – матриця провідностей гілок; E_B – матриця ЕРС гілок; J – вектор задавальних струмів.

Якщо в схемі заміщення навантаження і генерація потужності моделюються за допомогою задавальних струмів, то $E_B = 0$ і рівняння вузлових напруг має вигляд

$$Y_y U_\Delta = J. \quad (4.5)$$

Алгоритм розрахунку встановленого режиму за рівнянням вузлових напруг включає такі етапи.

1. Розрахунок вузлових напруг за рівнянням (4.5)

$$U_\Delta = Y_y^{-1} J.$$

2. Визначення рівнів напруги у вузлах $U = U_\Delta + U_6$. (4.6)

Можливе виконання етапів 1 та 2 одночасно.

$$U = Y_y^{-1}(J - Y_{\zeta}U_{\zeta}), \quad (4.7)$$

Y_{ζ} – матриця провідностей гілок, що зв'язують вузли схеми з балансуючим вузлом B .

3. Розрахунок падінь напруги у гілках схеми

$$U_B = M^T U_{\Delta} = M^T (U - U_{\zeta}). \quad (4.8)$$

4. Визначення струмів у гілках схеми

$$I_B = Y_B (U_B + E_B). \quad (4.9)$$

5. Розрахунок потоків потужності P , Q .

4.2 Завдання для самостійної роботи

1. *Розрахунок режиму, що встановився, за лінійними моделями для мережі постійного струму.*

Розрахувати струми у гілках розрахункової схеми мережі постійного струму (дод. В), використовуючи узагальнене рівняння стану.

Алгоритм розрахунку

⇒ Ввести вихідні дані M , N , вектор-стовпець опорів гілок Z , вектор струмів навантаження, J , що задають вектор ЕРС гілок E_B .

⇒ Сформувати діагональну матрицю опорів Z_B , використовуючи вбудовану функцію $Z_B = \text{diag}(Z)$.

⇒ Розрахувати проміжну матрицю $H = N \cdot Z_B$, матрицю контурних ЕРС E_K .

⇒ Сформувати блокові матриці коефіцієнтів A та вільних членів рівняння F , використовуючи вбудовану функцію *stack*, наприклад:

$$A := \text{stack}(M, H).$$

⇒ Розрахувати струми у гілках схеми за узагальненим рівнянням стану через зворотну матрицю коефіцієнтів.

Визначити параметри режиму для розрахункової схеми, додаток В за рівнянням вузлових напруг у лінійній формі.

Алгоритм розрахунку

⇒ Розрахувати матрицю вузлових провідностей з $Y_y = MY_B M^T$.

⇒ Визначити рівні напруги у вузлах по (4.7), або використовуючи (4.5) і (4.6), $U_0 = 10,5$ кВ.

⇒ Розрахунок падінь напруг у гілках схеми (4.8).

⇒ Визначення струмів у гілках схеми (4.9).

Порівняти результати розрахунку – струми у гілках схеми, отримані за **Моделями 1 та Моделями 2**

2. Розрахунок режиму, що встановився, по лінійних моделях для мережі змінного струму.

Визначити параметри режиму для розрахункової схеми, додаток В, за рівнянням вузлових напруг у лінійній формі. Вихідні дані щодо варіантів наведені в таблиці В.3 (дод. В). Розрахунок провести з урахуванням одиниць виміру параметрів.

Алгоритм розрахунку

⇒ Ввести вихідні дані M , вектор-стовпець опорів гілок Z (Ом), вектор струму, що задають навантаження J (кА), $U_0 = 220$ кВ.

⇒ Сформувати діагональну матрицю провідностей гілок у сименсах

$$Y_{B,i,i} = \frac{1}{Z_i} \text{ де } i := 1 \dots 7.$$

⇒ Сформувати матрицю провідностей гілок, що зв'язують вузли схеми з балансуючим Y_0 у сименсах.

⇒ Розрахувати матрицю вузлових провідностей у сименсах.

⇒ Розрахувати напруги у вузлах схеми у кіловольтах.

⇒ Визначити модуль та фазу напруг у кіловольтах та градусах.

⇒ Розрахувати вектор падіння напруги у гілках схеми в кіловольтах.

⇒ Розрахувати струми у гілках схеми у кілоамперах.

⇒ *Здійснити перевірку результатів по балансу струмів*: сума задавальних струмів повинна дорівнювати струму балансуючого вузла зі зворотним знаком. Струм балансуючого вузла дорівнює сумі алгебри струмів гілок, пов'язаних із вузлом B з урахуванням їхнього напрямку.

5 РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕНОГО РЕЖИМУ СЕС НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета самостійної роботи. Моделювання встановлених режимів СЕС на основі нелінійних рівнянь стану в середовищі Mathcad.

5.1 Короткі теоретичні відомості

Нелінійні рівняння стану дозволяють зробити розрахунок встановленого режиму при поданні навантаження і генерації потужності за допомогою нелінійних джерел струму [2].

$$j_K(\dot{U}) = \frac{S_K^*(\dot{U})}{\sqrt{3}U_K^*}, \quad (5.1)$$

де $J_K(U)$ – нелінійне джерело струму; S_K^* – потужність трьох фаз вузла; U_K^* – пов'язаний комплекс міжфазної напруги вузла до.

Як вихідні дані використовується $S_H = \text{const}$, $S_T = \text{const}$.

Існують дві форми подання нелінійних рівнянь вузлових напруг.

Модель 3. Рівняння вузлових напруг у формі балансу струмів

$$\dot{Y}_y \dot{U} = \sqrt{3} \cdot j(\dot{U}) - \dot{Y}_6 U_6. \quad (5.2)$$

Наприклад, для тривузлової схеми:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{13}\dot{U}_3 = \frac{S_1^*}{U_1^*} - \dot{Y}_{16}U_6 \\ \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{U}_3 = \frac{S_2^*}{U_2^*} - \dot{Y}_{26}U_6, \\ \dot{Y}_{31}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{33}\dot{U}_3 = \frac{S_3^*}{U_3^*} - \dot{Y}_{36}U_6, \end{cases}$$

де $Y_{i6} = -Y_{i1} - Y_{i2} - Y_{i3}$.

Модель 4. Рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності

$$U^*_{\text{diag}} (\dot{Y}_y \dot{U} + \dot{Y}_6 U_6) = S^* . \quad (5.3)$$

Наприклад, для тривузлової схеми:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^* (\dot{Y}_{11} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{12} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{13} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{16} U_6) = S_1^* , \\ \dot{U}_2^* (\dot{Y}_{21} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{22} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{23} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{26} U_6) = S_2^* , \\ \dot{U}_3^* (\dot{Y}_{31} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{32} \dot{U}_2 + \dot{Y}_{33} \dot{U}_3 + \dot{Y}_{36} U_6) = S_3^* . \end{cases}$$

5.2 Завдання для самостійної роботи

Здійснити розрахунок встановленого режиму на основі нелінійної моделі: рівняння вузлових напруг у формі балансу потужності. Вихідні дані щодо варіантів наведені в додатку Г.

Алгоритм розрахунку

1. Встановити індексацію масивів з одиниці (за замовчуванням індекси елементів масивів починаються з нуля) $ORIGIN := 1$.
2. Під час виконання роботи використовувати можливості роботи *Mathcad* з одиницями виміру.

$$MVA := 10^3 \cdot kV \cdot amp$$

$$Mwatt := MVA$$

$$Mvar := MVA .$$

3. Ввести вихідні дані – погонні параметри ЛЕП (використовувати можливості *Mathcad* роботи з одиницями виміру):

$r_0(\text{ohm/km})$; $x_0(\text{ohm/km})$; $b_0(\text{siemens/km})$ – погонні параметри ЛЕП;

$l(\text{km})$ – Довжина ЛЕП; $P_H(\text{Mwatt})$; $Q_H(\text{Mvar})$ – потужність навантаження;

$U_0 = 222 \text{ kV}$ – Базисна напруга ; $U_{\text{ном}} = 220 \text{ kV}$ – Номінальна напруга.

4. Розрахувати параметри ЛЕП:

$$\vec{R} := (r0 \cdot l) \quad \vec{X} := (x0 \cdot l) \quad \vec{B} := (i \cdot b0 \cdot l)$$

де $\rightarrow$ – векторна операція – дія провадиться над усіма складовими вектора.

$$Z := R + i \cdot X$$

$S := -S_n$ сполучений вектор потужності навантаження

$$S_n := P_n + i \cdot Q_n$$

5. Сформувати матрицю вузлових провідностей.

Скласти та запровадити матрицю інцидентів 1-го роду $\mathbf{M}$.

Розрахувати матрицю провідностей гілок у *siemens*.

$$i := 1 \dots 5 \quad Y_{b_i, i} := \frac{1}{Z_i}$$

Розрахувати матрицю вузлових провідностей у *siemens*

$$Y_y := M Y_b M^T$$

Розрахувати ємнісні провідності поперечних гілок і додати їх до власних діагональних провідностей вузлів матриці Y_y .

Наприклад, перший вузол розрахункової схеми пов'язаний з гілками 3 та 5 (рис. 5.1):

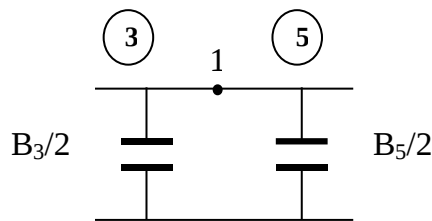


Рисунок 5.1 – Фрагмент розрахункової схеми

$$\text{Для вузла 1: } Y_{y1,1} := Y_{y1,1} + \frac{B_3 + B_5}{2}$$

Додати стовпець матриці вузлових провідностей, що відповідає балансуєчому вузлу.

Наприклад, для розрахункової схеми вигляду (рис. 5.2).

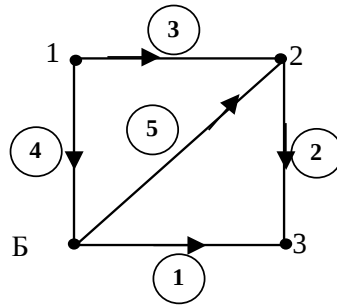


Рисунок 5.2 – Розрахункова схема

$$Y_{y_{1,4}} := -\frac{1}{Z_4} \quad Y_{y_{2,4}} := -\frac{1}{Z_5} \quad Y_{y_{3,4}} := -\frac{1}{Z_1}.$$

6. Розрахувати значення вузлових напруг з використанням нелінійних рівнянь вузлових напруг у формі балансу потужності.

Приклад із програми в середовищі Mathcad:

Початкове наближення

$$U1 := (1.0 - i \cdot 0.15) \cdot U_{non}$$

$$U2 := U1$$

$$U3 := U1$$

Вирішальний блок

Given

$$U1 \cdot \left(\overline{Y_{y_{1,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{1,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{1,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{1,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_1$$

$$U2 \cdot \left(\overline{Y_{y_{2,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{2,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{2,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{2,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_2$$

$$U3 \cdot \left(\overline{Y_{y_{3,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{3,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{3,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{3,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_3$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} := \text{Minerr} (U_1, U_2, U_3).$$

Функція *Minerr* дозволяє визначити можливе рішення із мінімальною помилкою. Позначення $\bar{Y}_{y_{1,1}}$ – пов'язане комплексне значення вузлової провідності.

7. Розрахувати значення параметрів встановленого режиму.

Модуль напруги (kV) і фазу напруги в градусах (deg).

У програмі **Mathcad**: модуль визначається операцією $|U_1|$, фаза – $\arg(U_1)$.

Значення напруги на початку і в кінці кожної гілки.

Приклад для схеми (рис. 5.2) із програми у середовищі **Mathcad**:

$$U_i := \begin{pmatrix} U_0 \\ U_2 \\ U_1 \\ U_1 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad U_k := \begin{pmatrix} U_3 \\ U_3 \\ U_2 \\ U_0 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

Значення струмів у гілках схеми *amp*, використовувати векторну операцію:

$$\overrightarrow{I} := \left(\frac{U_i - U_k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z} \right)$$

Значення потоків потужності на початку та в кінці кожної гілки:

$$\Rightarrow \text{на початку гілки } i - S_{i \text{ нач}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ нач}} \cdot \overrightarrow{I} - |U_{i \text{ нач}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

З використанням векторних операцій із програми в **Mathcad**:

$$\overrightarrow{S_i} := (\sqrt{3} \cdot \overrightarrow{U_i} \cdot \overrightarrow{I}) - \left[(|U_i|)^2 \frac{B}{2} \right];$$

$$\Rightarrow \text{наприкінці гілки } i - S_{i \text{ кон}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ кон}} \cdot \overrightarrow{I}^* + |U_{i \text{ кон}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

У середовищі **Mathcad** за допомогою векторних операцій подання аналогічне.

Значення втрат потужності у гілках схеми:

$$\Delta P = \text{Re}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}),$$

$$\Delta Q = \text{Im}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}).$$

8. Здійснити перевірку результатів щодо балансу потужності: баланс потужності у схемі повинен відповідати потужності балансуючого вузла. Потужність балансуючого вузла дорівнює сумі алгебри потоків потужності гілок, пов'язаних з вузлом Б з урахуванням їхнього напрямку.

Приклад для схеми (рис. 5.2) із програми у середовищі **Mathcad**:

– баланс потужності у схемі:

$$\sum_{i=1}^3 P_{H_i} + \sum dP + i \left(\sum_{i=1}^3 Q_{H_i} + \sum dQ \right) ;$$

– потужність балансуючого вузла: $S_{H5} + S_{H1} - S_{K4}$.

6 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ВСТАНОВЛЕНИХ РЕЖИМІВ СЕП

Мета роботи. Застосування зосереджених математичних моделей макрорівня аналізу статичної стійкості енергосистем.

6.1 Короткі теоретичні відомості

Під час проєктування та експлуатації електроенергетичних систем вирішується завдання аналізу статичної стійкості.

Під стійкістю розуміється [1, 7] здатність системи повертатися у вихідний або близький до вихідного стан рівноваги після малого збурювального впливу. Такого типу стійкість називається статичною чи стійкістю в «малому» і є необхідною умовою працездатності будь-якої технічної системи.

Під час аналізу електричної системи *стану рівноваги* відповідає *нормальний встановлений режим*. Як малі збурювальні впливи можна розглядати, наприклад, підключення або відключення споживачів, які призводять до зміни параметрів системи в часі і виникнення перехідних процесів.

Аналіз статичної стійкості, заснований на методі малих коливань [4, 6], включає такі етапи.

1. *Допускається мале збурення* щодо вихідного стану рівноваги. Під впливом малого збурення в електричній системі виникають перехідні процеси, що описуються за допомогою звичайних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами.

2. Складаються *диференціальні рівняння перехідного процесу*. Для широкого класу технічних систем під час аналізу перехідних процесів використовуються системи диференціальних рівнянь вигляду [1]:

$$\sum_{i=1}^n \left(a_{ij} \frac{d^2 x_i}{dt^2} + b_{ij} \frac{dx_i}{dt} + c_{ij} x_i \right) = F_j(t), \quad (6.1)$$

де $j = 1 \dots n$; a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} – постійні коефіцієнти; $x_i(t)$ – змінні, що характеризують реакцію системи на мале збурення; $F_j(t)$ – зовнішні сили, що відображають зміну умов роботи системи.

Реакція системи на збурювальну дію $x_i(t)$ може бути подана як сукупність вимушеної та вільної $x_{\text{вим } i}(t)$ складових $x_{\text{св } i}(t)$.

Положення рівноваги є асимптотично стійким, якщо виконується умова згасання у часі вільних коливань

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{\text{св } i}(t) = 0. \quad (6.2)$$

3. *Аналіз характеру перехідних процесів.* Диференціальні рівняння, що описують перехідні процеси в технічних системах, зазвичай не лінійні внаслідок нелінійності фізичних закономірностей, які пов'язують параметри електричної системи. Для спрощення аналізу за малих відхилень усі нелінійні функції лінеаризуються. Вважаючи, що збурювальний вплив незначний в часі і відхилення параметрів режиму від вихідних значень $\Delta x_i(t)$ малі, можна перейти до диференціальних рівнянь, лінійних щодо $\Delta x_i(t)$. Для аналізу зміни у часі вільної складової $\Delta x_i(t)$ у випадку необхідно вирішити диференціальне рівняння n ступеня:

$$a_0 \frac{d^n \Delta x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} \Delta x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n \Delta x = 0. \quad (6.3)$$

Використовуючи операторний метод, можна перейти від диференціального рівняння (6.3) до характеристичного рівняння

$$D(p) = a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (6.4)$$

Подальше дослідження перехідних процесів, що виникають в електричній системі, визначається видом коренів характеристичного рівняння (6.4).

На основі *теорему Ляпунова* положення рівноваги є статично стійким, якщо всі корені характеристичного рівняння (6.4) мають негативну реальну частину.

Можливі *два підходи* до вирішення поставленого завдання:

1. За ступеня характеристичного рівняння $n = 2$ визначається корінь рівняння (6.4) і стійкість системи аналізується на основі теореми Ляпунова, далі визначається характер зміни в часі вільної складової $\Delta x_i(t)$.

2. За ступеня характеристичного рівняння $n \geq 3$ про стійкість системи судять без безпосереднього вирішення характеристичного рівняння (6.4), використовуючи *критерії стійкості*.

Критерії стійкості. Аналіз статичної стійкості електричних систем шляхом прямого відшукування коренів характеристичного рівняння пов'язаний з практичними труднощами, оскільки відсутні аналітичні вирази для коренів рівнянь вище четвертого порядку. Вони мають негативну реальну частину.

Визначення. Умови, які дозволяють судити про наявність негативної реальної частини всіх коренів характеристичного рівняння без його безпосереднього вирішення, називаються *критеріями стійкості*. Критерії стійкості поділяються на алгебраїчні та частотні.

Алгебраїчний критерій Гурвіца

Для використання критерію Гурвіца складається *визначник Гурвіца* за такими правилами:

- по головній діагоналі розташовуються коефіцієнти рівняння (6.4) у порядку зростання індексів починаючи з a_1 ;
- рядково розташовуються коефіцієнти лише з парними чи лише з непарними індексами, зліва від діагоналі індекси зменшуються, а справа – збільшуються;
- всі відсутні коефіцієнти замінюються нулями.

Наприклад, для характеристичного рівняння $n = 3$ визначник Гурвіца має вигляд:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}. \quad (6.5)$$

Потім виділяються мінори щодо головної діагоналі визначника Гурвіца Δ_3 і застосовується **критерій Гурвіца**: для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб $a_0 > 0$ всі головні діагональні мінори визначника Гурвіца були позитивні.

Умови стійкості для Δ_3 :

$$a_0 > 0,$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0,$$

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0,$$

$$\Delta_3 = a_1 a_2 a_3 - a_3^2 a_0 = a_3 \Delta_2 > 0.$$

Частотний критерій стійкості Михайлова

В основу критерію Михайлова покладено принцип аргумента [1], відомий з теорії функцій комплексного змінного.

Для застосування критерію Михайлова необхідно замінити $p = j\omega$, де ω – частота вільних коливань, і підставити вираз (6.4). Наприклад, для характеристичного рівняння $n = 3$:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^3 + a_1(j\omega)^2 + a_2(j\omega) + a_3 = -a_0 j\omega^3 - a_1\omega^2 + a_2 j\omega + a_3 =$$

$$= U(\omega) + jV(\omega),$$

$$U(\omega) = -a_1\omega^2 + a_3, \quad (6.6)$$

$$V(\omega) = -a_0\omega^3 + a_2\omega = \omega(-a_0\omega^2 + a_2).$$

Вектор $D(j\omega)$, зображений в декартових координатах на площині, при зміні $0 < \omega < \infty$ обертається і кінцем вектора описує криву, яка називається *годограф* характеристичного рівняння.

Практичне формулювання критерію Михайлова: система буде стійка, якщо при зростанні $0 < \omega < \infty$ годограф, починаючись на позитивній частині речової осі, проходить послідовно в позитивному напрямку n квадрантів, де n ступінь характеристичного рівняння. Таке переміщення годографа відповідає повороту характеристичного вектора багаточлена $D(j\omega)$ на кут $n \cdot \frac{\pi}{2}$.

З використанням практичного формулювання критерію Михайлова можна побудувати годографи стійких систем, які мають жорстку конфігурацію залежно від рівня характеристичного рівняння (рис. 6.1).

Отже, змінюючи частоту вільних коливань $0 < \omega < \infty$, необхідно побудувати годограф Михайлова і його зміни, зробити висновок про статичної стійкості системи з урахуванням ступеня характеристичного рівняння.

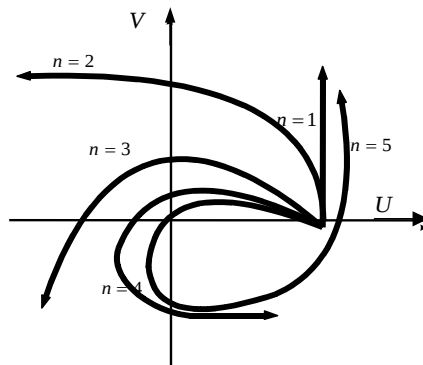


Рисунок 6.1 – Годографи стійких систем

Є можливість аналізу стійкості системи за критерієм Михайлова без побудови годографа. Для того щоб система була стійка, необхідно і достатньо, щоб виконувались такі умови:

$$U(\omega=0) = a_n > 0;$$

$$\frac{\partial V}{\partial \omega}(\omega=0) = a_{n-1} > 0; \quad (6.7)$$

корінь рівнянь $U(\omega) = 0$ $V(\omega) = 0$ повинні бути переміжними (що чергуються на числовій осі).

6.2 Завдання для самостійної роботи

Здійснити аналіз статичної стійкості системи, для якої розрахований встановлений режим у самостійній роботі № 4, на основі лінійного рівняння вузлових напруг. *Mathcad*.

Аналіз статичної стійкості системи проведемо за відсутності навантаження у вузлах та підключенні до вузла 5 синхронного неявнополюсного генератора. Еквівалентна схема наведена на рисунку 6.2.

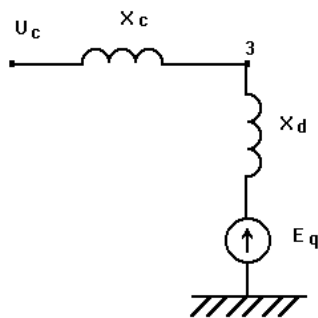


Рисунок 6.2 – Еквівалентна схема

Алгоритм розрахунку

1. Введення вихідних даних.

Ввести додаткові вихідні дані (значення параметрів наведено у дод. В):

E_q – синхронна ЕРС;

X_d – індуктивний опір;

U_c – напруга системи;

T_j – постійна інерції, с;

P_d – коефіцієнт демпфірування;

δ - кут між векторами U_c та E_q

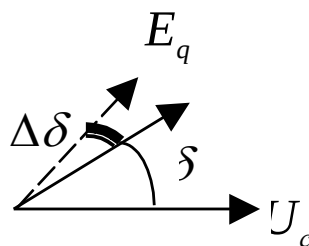


Рисунок 6.3 – Векторна діаграма

Для переведення у відносні одиниці ввести базові параметри

$$S_{\delta} = S_{\Gamma \text{ ном}}, \quad U_{\delta} = U_{\Gamma \text{ ном}};$$

– перевести їх у відносні одиниці

$$T_j(o.e.) = T_j(c)\omega_0 = T_j(c) \cdot 314; \quad (6.8)$$

– розрахувати значення еквівалентного опору системи x_c , яке відповідає діагональному елементу матриці вузлових опорів Z_y

$$Z_y := Y_y^{-1}. \quad (6.9)$$

Оскільки синхронна машина підключена до вузла 5, то $x = Z_{y5.5}$;

– перевести еквівалентний опір у відносні одиниці:

$$x_c(o.e.) = x_c(\text{Ом}) \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}. \quad (6.10)$$

2. Аналіз статичної стійкості за коренем характеристичного рівняння.

Якщо не враховувати перехідні процеси в обмотці збудження генератора, але врахувати моменти, що демпфують, диференціальне рівняння відносно $\Delta\delta$ має вигляд [1, 7]:

$$T_j \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_d \frac{d \Delta\delta}{dt} + c_1 \Delta\delta = 0. \quad (6.11)$$

Використовуючи операторний метод $\frac{d \Delta\delta}{dt} = p$, перейти до характеристичного рівняння

$$T_j p^2 + P_d p + c_1 = 0. \quad (6.12)$$

Розрахувати коефіцієнт c_1 рівняння (6.12), виходячи із співвідношення [4]

$$c_1 = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \cos \delta, \quad (6.13)$$

де значення $x_{d\Sigma}$ визначається за формулою:

$$x_{d\Sigma} = x_c + x_d. \quad (6.14)$$

Визначити значення коренів характеристичного рівняння (6.12) p_1, p_2 на основі *теорему Ляпунова*, зробити висновок про стійкість системи.

Побудувати графік перехідного процесу за виразами:

якщо корінь $p_1 = \alpha_1, p_2 = \alpha_2$ – дійсне, то $\Delta\delta(t) = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$;

якщо корінь комплексно-сполучене ($p_{1,2} = \alpha \pm j\beta$), то

$$\Delta\delta(t) = 2C e^{\alpha t} \sin(\beta t + \varphi) \text{ де } C = \sqrt{A^2 + B^2}, \varphi = \arctg \frac{A}{B}.$$

3. Аналіз статичної стійкості за алгебраїчним критерієм Гурвіца.

Якщо врахувати як демпфірувальні моменти, а й перехідні процеси в обмотці збудження генератора, то в цьому випадку характеристичне рівняння матиме третій порядок [1, 7]

$$D(p) = a_0 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0. \quad (6.15)$$

Розрахувати коефіцієнти рівняння (6.15) виходячи із співвідношень [4]

$$a_0 = T_j T_d'; \quad a_1 = T_j + P_d T_d'; \quad a_2 = c_2 T_d' + P_d; \quad a_3 = c_1.$$

де T_d' – перехідна стала часу генератора по поздовжній осі.

Значення коефіцієнта c_1 обчислюється по (7.12), а для визначення c_2 використовується вираз [1, 7].

$$c_2 = c_1 + \frac{x_d - x_d'}{x_{d\Sigma} x_{d\Sigma}'} U_c^2 \sin^2 \delta, \quad (6.16)$$

де x_d' – перехідний реактивний опір генератора по поздовжній осі

$$x_{d\Sigma}' = x_d' + x_c. \quad (6.17)$$

Перехідна постійна часу генератора T_d' розраховується з виразу

$$T_d' = \frac{x_{d\Sigma}'}{x_{d\Sigma}} T_{d0}, \quad (6.18)$$

Скласти визначник Гурвіца та розрахувати мінори визначника щодо головної діагоналі.

Приклад розрахунку визначника *із програми у середовищі **Mathcad***:

$$\Delta_3 := \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

Зробити висновок про стійкість системи за критерієм Гурвіца.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних і енергетичних системах [Електрон. ресурс]: конспект лекцій для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» / О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 87 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/60078/1/2021%20печ%20103Л%20%20Прикладне%20програмне%20забезпечення%20конспект%20українск.pdf>, вільний (дата звернення 14.02.2025). – Назва з екрана.
2. Лозинський А. О. Розв’язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB : навч. посіб. / А. О. Лозинський, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – 2-ге вид., доповн. – Львів : «Магнолія 2006», 2015. – 335 с.
3. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / [О. В. Кириленко та ін.] ; за ред. М. С. Сегеди. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 608 с.
4. Методичні вказівки до практичних робіт з курсу «Відновлювані джерела енергії» / М. Г. Тарасенко, В. І. Гетманюк. – Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. – 65 с.

5. Методичні рекомендації до практичних занять «Прикладне програмне забезпечення для дослідження процесів в електротехнічних та енергетичних системах» (для студентів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») [Електрон. ресурс] / О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 53 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/67837/1/2022%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7.%20226%D0%9C%20%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80%D0%84%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9E.%20%D0%91.%2C%20%D0%93%D0%BB%D1%94%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%9C.%20%D0%9B.pdf> , вільний (дата звернення 21.02.2025). – Назва з екрана.

ДОДАТОК А

Дані для розрахунків

Таблиця А.1 – Опори для розрахунку

Номер варіанта	R_1	R_2	R_3	U	Номер схеми
1	10	15	20	220	П1.1
2	8	16	5	32	П1.2
3	9	14	19	220	П1.1
4	7	15	4	32	П1.2
5	11	16	21	220	П1.1
6	10	18	7	32	П1.2
7	10	17	12	220	П1.1
8	5	8	15	32	П1.2
9	12	17	22	220	П1.1
10	6	14	3	32	П1.2

Таблиця А.2 – Опори та ЕРС за варіантами

Номер варіанта	R_1	R_2	R_3	E_1	E_3	НОМЕР схеми
1	7	4	8	20	15	П1.3
2	2	6	3	12	15	П1.4
3	6	3	7	20	15	П1.3
4	4	8	5	12	15	П1.4
5	8	5	9	20	15	П1.3
6	3	7	4	12	15	П1.4
7	5	2	6	20	15	П1.3
8	3	2	7	12	15	П1.4
9	9	6	10	20	15	П1.3
10	4	5	8	12	15	П1.4

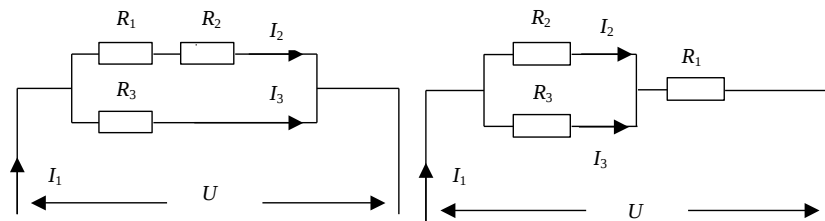


Рисунок А.1

Рисунок А.2

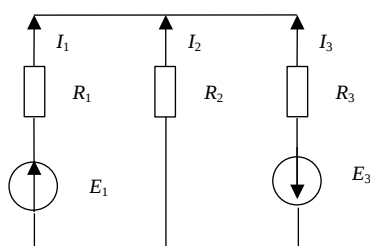


Рисунок А.3

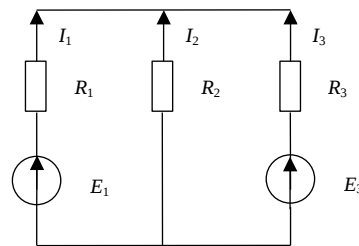


Рисунок А.4

Схеми для вибору за варіантом

$$f(t) = \frac{k \cdot \exp(0.11t + 2)}{(13+t)} \sin(t) \quad f1(t) = \frac{k \cdot \exp(0.11t + 2)}{(10+t)} \sin(t)$$

$$f(x, y) = \sin(x^2 + y^2)$$

Таблиця А.3 – Добовий графік навантажень

Варіант № 1

Година	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Р, МВт	112	154	136	174	205	275	190	254	269	210	173	157	148
Варіант № 2													
Година	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Р, МВт	80	87	82	103	127	134	115	140	143	124	109	93	89

ДОДАТОК Б

Вихідні дані для практичних робіт 2 та 3 за варіантами

Номер варіанта	Марка дроту	Довжина, км	Погонні параметри фази ЛЕП				$U_{\text{ном}}$, кВ	Напруга на початку лінії U_1 кВ		Потужність навантаження		Допустимий струм, $I_{\text{дол}}$, А
			r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	g_0 , мкСм/км	b_0 , мкСм/км		у режимі хх	у режимі навантаження	P_2 , МВт	Q_2 , Мвар	
1	3×АС300/66	800	0,034	0,31	0,015	3,97	500	490	520	850	100	2 040
2	3×АС330/43	750	0,029	0,308	0,025	3,6	500	500	510	650	100	2 190
3	3×АС300/66	820	0,034	0,31	0,015	3,97	500	500	524	880	50	2 040
4	3×АС400/51	900	0,025	0,306	0,027	3,62	500	510	520	760	20	2 475
5	3×АС500/54	550	0,02	0,304	0,034	3,64	500	500	510	900	20	2 835
6	3×АС240/56	650	0,024	0,308	0,045	3,76	750	755	760	1 200	500	3 050
7	3×АС300/66	800	0,021	0,288	0,043	4,11	750	755	760	2 000	100	3 400
8	3×АС400/51	700	0,015	0,286	0,041	4,13	750	755	760	2 000	110	4 125
9	3×АС400/93	800	0,019	0,289	0,039	4,13	750	758	760	1 900	160	3 400
10	3×АС500/54	670	0,015	0,303	0,044	3,9	750	750	770	1 800	180	3 780
11	3×АС300/66	670	0,034	0,31	0,015	3,97	500	500	520	900	70	2 040

ДОДАТОК В

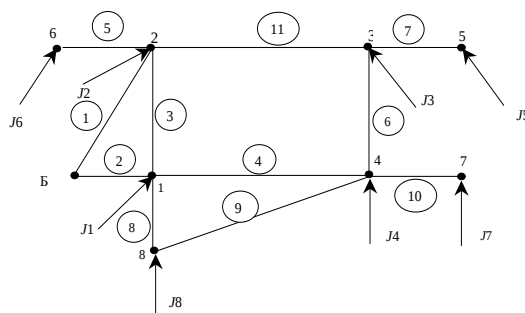


Рисунок В.1 – Принципова схема

Таблиця В.3 – Дані для вибору за варіантами

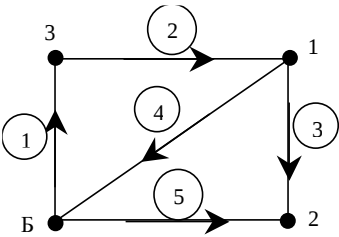
Ч. ч.	Опір гілок, Ом											Задають струми, як								δ
	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9	Z 10	Z 11	J 1	J 2	J 3	J 4	J 5	J 6	J 7	J 8	
1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.2	0.4	0.7	0.9	0.1	3	4	6	8	9	11	6	9	$\pi/3$
2	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2	0.4	0.6	0.9	0.1	3	5	6	7	9	11	5	9	$\pi/4$
3	0.3	0.4	0.8	0.9	0.5	0.7	0.6	0.3	0.7	0.2	0.1	2	3	5	8	6	3	7	1	$\pi/6$
4	0.2	0.5	0.7	0.9	0.6	0.4	0.3	0.6	0.9	0.3	0.8	3	2	5	7	3	4	7	6	$\pi/3$
5	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.8	0.2	0.7	2	3	6	8	4	9	6	1	$\pi/6$
6	0.5	0.3	0.6	0.9	0.7	0.8	0.5	0.4	0.6	0.4	0.2	3	5	4	8	6	5	9	6	$\pi/4$
7	0.2	0.3	0.4	0.8	0.3	0.5	0.8	0.5	0.6	0.9	0.2	8	3	4	6	5	9	7	2	$\pi/6$
8	0.3	0.5	0.4	0.5	0.6	0.9	0.8	0.5	0.7	0.8	0.7	3	8	6	4	9	10	6	8	$\pi/3$
9	0.1	0.5	0.3	0.5	0.4	0.1	0.2	0.3	0.7	0.6	0.1	2	4	3	5	6	9	7	10	$\pi/4$
10	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.2	0.3	0.4	0.9	0.6	0.7	3	5	4	5	6	8	9	4	$\pi/6$

$$U_G = 10,5 \text{ кВ}, S_G = 7 \text{ МВА}, E_q = 1.07, U_c = 1, P_d = 60, T_j = 14 \text{ с}, x_d = 1.7, x'_d = 0.172, T_{d0} = 7.26.$$

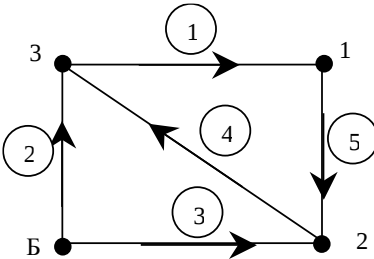
ДОДАТОК Г

Варіанти розрахункових схем та параметрів

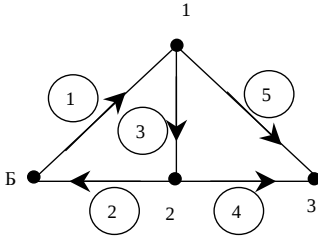
Варіант 1

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.125 \\ 0.09 \\ 0.085 \\ 0.085 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.43 \\ 0.42 \\ 0.429 \\ 0.423 \\ 0.425 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.57 \\ 2.51 \\ 2.564 \\ 2.528 \\ 2.54 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 90 \\ 85 \\ 130 \\ 125 \\ 140 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 80 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 45 \\ 70 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

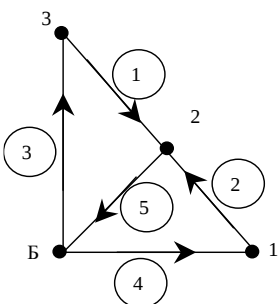
Варіант 2

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.125 \\ 0.039 \\ 0.075 \\ 0.095 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.44 \\ 0.43 \\ 0.425 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.749 \\ 2.63 \\ 2.56 \\ 2.54 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 100 \\ 185 \\ 120 \\ 85 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 80 \\ 180 \\ 100 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 75 \\ 60 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 3

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.12 \\ 0.069 \\ 0.085 \\ 0.15 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.36 \\ 0.34 \\ 0.45 \\ 0.42 \\ 0.43 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.152 \\ 2.032 \\ 2.69 \\ 2.51 \\ 2.57 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 90 \\ 85 \\ 125 \\ 185 \\ 130 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 100 \\ 160 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 85 \\ 40 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 4

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.11 \\ 0.059 \\ 0.35 \\ 0.25 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.34 \\ 0.42 \\ 0.41 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.749 \\ 2.032 \\ 2.51 \\ 2.451 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 98 \\ 95 \\ 135 \\ 150 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 80 \\ 130 \\ 190 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 85 \\ 80 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 5

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.11 \\ 0.045 \\ 0.25 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.35 \\ 0.47 \\ 0.41 \\ 0.4 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.39 \\ 2.092 \\ 2.809 \\ 2.451 \\ 2.391 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 96 \\ 121 \\ 130 \\ 75 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 75 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 35 \\ 60 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 6

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.13 \\ 0.2 \\ 0.21 \\ 0.12 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.42 \\ 0.43 \\ 0.39 \\ 0.4 \\ 0.25 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.51 \\ 2.57 \\ 2.331 \\ 2.391 \\ 1.494 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km}$
	$l = \begin{bmatrix} 90 \\ 187 \\ 110 \\ 57 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot km$ Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 90 \\ 120 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 65 \\ 55 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

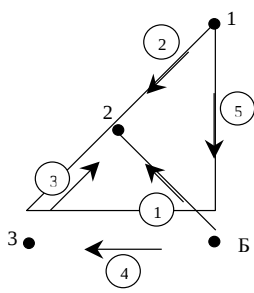
Варіант 7

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.11 \\ 0.12 \\ 0.382 \\ 0.25 \\ 0.12 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.45 \\ 0.39 \\ 0.39 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$ $b_0 = \begin{bmatrix} 2.391 \\ 2.69 \\ 2.331 \\ 2.331 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 85 \\ 180 \\ 120 \\ 87 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot km$ Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 70 \\ 180 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 90 \\ 65 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

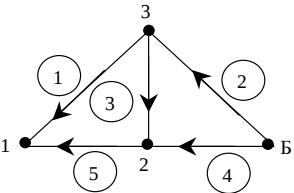
Варіант 8

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.15 \\ 0.38 \\ 0.12 \\ 0.14 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.22 \\ 0.4 \\ 0.4 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$ $b_0 = \begin{bmatrix} 2.092 \\ 1.315 \\ 2.391 \\ 2.391 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 115 \\ 80 \\ 50 \\ 77 \\ 92 \end{bmatrix} \cdot km$ Потужність навантаження вузлів: $P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 110 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 70 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 9

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.31 \\ 0.17 \\ 0.27 \\ 0.12 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$x_0 = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.4 \\ 0.37 \\ 0.5 \\ 0.6 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.692 \\ 2.391 \\ 2.211 \\ 2.989 \\ 3.586 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km}$
	$l = \begin{bmatrix} 95 \\ 86 \\ 67 \\ 89 \\ 119 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів:
	$P_H = \begin{bmatrix} 89 \\ 176 \\ 95 \end{bmatrix} \cdot Mwatt$
	$Q_H = \begin{bmatrix} 40 \\ 85 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Варіант 10

Розрахункова схема	Вихідні дані
	$r_0 = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.15 \\ 0.38 \\ 0.12 \\ 0.14 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$x_0 = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.22 \\ 0.4 \\ 0.4 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$
	$b_0 = \begin{bmatrix} 2.092 \\ 1.315 \\ 2.391 \\ 2.391 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km}$
	$l = \begin{bmatrix} 115 \\ 80 \\ 50 \\ 77 \\ 92 \end{bmatrix} \cdot km$
	Потужність навантаження вузлів:
	$P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 110 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot Mwatt$
	$Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 70 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot Mvar$

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації

до самостійної роботи

з навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі: **ЄГОРОВ** Олексій Борисович,
ГЛЄБОВА Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2025, поз. 296М

Підп. до друку 13.02.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,8.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.