

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електричні системи і мережі»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Укладачі: Т. Л. Кацадзе, О. М. Паненко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Математичні моделі електричних систем : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. Л. Кацадзе, О. М. Паненко. – Електронні текстові дані (1 файл: 951 кБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 63 с.

Рецензент *Дмитренко О. О.*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Баженов В. А.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 9 від 17.05.2022 р.)*

Навчальний посібник містить необхідний теоретичний матеріал до виконання лабораторних робіт з курсу «Математичні моделі електричних систем» здобувачами ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Матеріал навчального посібника сприяє закріпленню у студентів лекційного матеріалу з дисципліни «Математичні моделі електричних систем» і придбанню ними практичних умінь з формування та використання математичних моделей у задачах дослідження параметрів усталених режимів електричних систем.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лабораторна робота 1 ФУНКЦІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ	5
Стислі теоретичні відомості.....	5
Порядок виконання роботи.....	8
Лабораторна робота 2 ЗАСТУПНІ СХЕМИ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	10
Стислі теоретичні відомості.....	10
Порядок виконання роботи.....	13
Лабораторна робота 3 МАТРИЦІ ІНЦИДЕНЦІЙ.....	15
Стислі теоретичні відомості.....	15
Порядок виконання роботи.....	19
Лабораторна робота 4 СИСТЕМА АДРЕСНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ	21
Стислі теоретичні відомості.....	21
Порядок виконання роботи.....	25
Лабораторна робота 5 СЛАБКОЗАПОВНЕНІ МАТРИЦІ.....	26
Стислі теоретичні відомості.....	26
Порядок виконання роботи.....	30
Лабораторна робота 6 ІТЕРАЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ НАЙПРОСТІШОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	32
Стислі теоретичні відомості.....	32
Порядок виконання роботи.....	34
Лабораторна робота 7 РОЗРАХУНКИ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗІМКНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	35
Стислі теоретичні відомості.....	35
Порядок виконання роботи.....	39
Лабораторна робота 8 РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ЛІНІЙНИХ АЛГЕБРАЇЧНИХ РІВНЯНЬ МЕТОДОМ ГАУССА.....	41
Стислі теоретичні відомості.....	41
Порядок виконання роботи.....	48
Лабораторна робота 9 МЕТОД РОЗРІЗАННЯ КОНТУРІВ.....	51
Стислі теоретичні відомості.....	51
Порядок виконання роботи.....	55
Лабораторна робота 10 РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ ВУЗЛОВИХ РІВНЯНЬ МЕТОДОМ ЗЕЙДЕЛЯ.....	60
Стислі теоретичні відомості.....	60
Порядок виконання роботи.....	62
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63

ВСТУП

Навчальний посібник містить необхідний теоретичний матеріал до виконання лабораторних робіт з курсу «Математичні моделі електричних систем» здобувачами ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Виконання лабораторних робіт сприяє закріпленню у студентів лекційного матеріалу з дисципліни «Математичні моделі електричних систем» і придбанню ними практичних умінь з формування та використання математичних моделей у задачах дослідження параметрів ustalених режимів електричних систем. Тематика лабораторних робіт охоплює всі основні розділи курсу «Математичні моделі електричних систем».

Лабораторні роботи виконують студенти на комп'ютерах з використанням алгоритмічних мов програмування високого рівня, на кшталт Basic, Pascal, C#. Таким чином, виконання лабораторних робіт зумовлює використання студентами навичок, отриманих у процесі вивчення курсу «Основи обчислювальної техніки та програмування».

Кожну лабораторну роботу виконує студент самостійно, або в складі бригади (не більше 3–4 чоловік). Перед виконанням робіт студенти ознайомлюються з правилами з техніки безпеки та інструкцією по користуванню комп'ютерним класом, про що робиться запис у відповідному журналі.

Виконання лабораторних робіт вимагає ретельної попередньої підготовки, під час якої студент повинен ознайомитися з методичними вказівками та рекомендованою літературою, скласти блок-схему алгоритму, підготувати чернетки програмного модуля, виконати необхідні теоретичні розрахунки, підготувати звіт про виконання лабораторної роботи.

Звіт про лабораторну роботу повинен містити титульний лист із зазначенням теми лабораторної роботи та інформації про студента, що виконав роботу, необхідні теоретичні відомості з виконання лабораторної роботи, звіт про виконання завдання для самостійної роботи згідно варіанта, список використаної літератури. Звіт про виконану роботу подається керівнику до початку чергової роботи. Студенти, які не оформили звіт з попередньої роботи та не підготували звіт для наступної роботи, до виконання лабораторної роботи не допускаються.

Лабораторна робота №1

ФУНКЦІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ

Мета роботи: дослідження ефективності використання апарату теорії комплексної змінної в електротехнічних задачах, формування практичних умінь з використання апарату теорії функцій комплексної змінної.

Стислі теоретичні відомості

Одним з найбільш ефективних способів моделювання гармонічних коливань різної фізичної природи, до яких відносять змінний електричний струм, є спосіб, який ґрунтується на математичному апараті теорії комплексної змінної. Оскільки частота змінного електричного струму є загальною системною характеристикою, то всі фізичні параметри в електричній системі змінюються синфазно. Тобто, в кожний момент часу між будь-якими двома величинами, які характеризують режим роботи електричної системи, зберігається постійна різниця фаз гармонічних коливань. Ця обставина дозволяє перейти від нерухомої системи координат до рухомої, яка обертається з рівномірною швидкістю відповідно частоті змінного струму електричної системи. В такій системі координат усі фізичні характеристики усталеного режиму електричної системи характеризуються незмінними з часом амплітудним (діючим) значенням та фазою, які відповідають моменту часу $t = 0$.

Для подання фізичних величин, які змінюються гармонічно, найбільшого поширення отримав символічний метод, заснований на математичному апараті теорії комплексної змінної.

Комплексним називається двокомпонентне число

$$\underline{z} = x + jy,$$

де x, y – будь-які дійсні числа; j – уявна одиниця ($j = \sqrt{-1}$).

Дійсні числа x та y називаються відповідно дійсною та уявною частинами комплексного числа z :

$$x = \operatorname{Re}(\underline{z});$$

$$y = \operatorname{Im}(\underline{z}).$$

Два комплексних числа z_1 та z_2 вважаються рівними лише в тому випадку, коли рівні їх дійсні та уявні складові:

$$x_1 + jy_1 = x_2 + jy_2 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = x_2; \\ y_1 = y_2. \end{cases}$$

Оскільки дві точки, які визначаються своїми координатами у прямокутній декартовій системі координат збігаються лише в тому випадку,

коли вони водночас мають рівні абсциси та рівні ординати, то можна встановити взаємно-однозначну відповідність між точками площини і комплексними числами. Інакше кажучи, комплексне число $\underline{z} = x + jy$ відображають за допомогою точки, абсциса якої дорівнює x , а ордината – y , в прямокутній декартовій системі координат, як показано на рис. 1.1. Координатні вісі такої комплексної площини прийнято називати відповідно дійсною та уявною віссю.

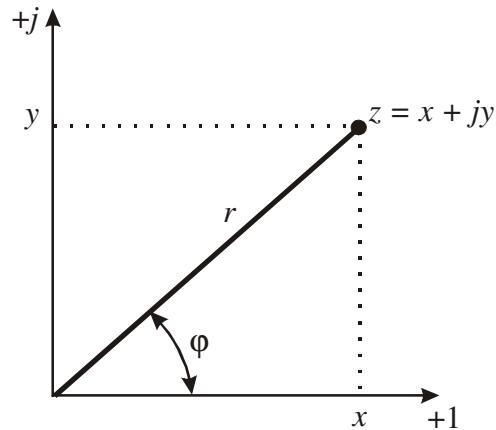


Рис. 1.1. Зображення комплексного числа на декартовій площині

Розташування точки на комплексній площині можна визначити також за допомогою полярної системи координат, тобто за допомогою довжини вектору r і величини кута φ , утвореного цим вектором з додатним напрямком дійсної вісі (рис. 1.1).

Числа r та φ відповідно називаються модулем та аргументом комплексного числа z :

$$r = |\underline{z}|;$$

$$\varphi = \arg(\underline{z}).$$

Між записом комплексного числа в декартовій і полярній системах координат існує однозначний взаємний зв'язок:

$$x = r \cdot \cos \varphi = |\underline{z}| \cdot \cos(\arg(\underline{z}));$$

$$y = r \cdot \sin \varphi = |\underline{z}| \cdot \sin(\arg(\underline{z}));$$

$$r = |\underline{z}| = \sqrt{x^2 + y^2};$$

$$\operatorname{tg}(\arg(\underline{z})) = \operatorname{tg}(\varphi) = y/x.$$

Зазначимо, що величина $\arg(\underline{z})$ багатозначна і має кратність 2π . Як головне зазвичай вибирають значення величини $\arg(\underline{z})$ в межах

$-\pi < \arg(z) \leq \pi$. Таким чином, будь-яке комплексне число можна представити в тригонометричній формі запису

$$\underline{z} = x + jy = r \cdot \cos \varphi + jr \cdot \sin \varphi = r \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

У свою чергу за допомогою формули Ейлера можна перейти від тригонометричної до показової форми запису комплексного числа

$$\underline{z} = x + jy = r \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = r \cdot e^{j\varphi}.$$

Два комплексних числа, які мають рівні дійсні частини, а уявні частини яких рівні по абсолютній величині, але протилежні за знаком називають взаємно спряженими. Модулі взаємо-спряжених чисел однакові, а аргументи відрізняються тільки знаком. Спряжені числа зображуються на комплексній площині точками, взаємо-симетричними відносно дійсної осі.

Алгебраїчні дії над комплексними числами провадяться за правилами додавання та множення алгебраїчних багаточленів з урахуванням того, що $j^2 = -1$.

$$(x_1 + jy_1) + (x_2 + jy_2) = (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2);$$

$$(x_1 + jy_1) - (x_2 + jy_2) = (x_1 - x_2) + j(y_1 - y_2);$$

$$(x_1 + jy_1) \cdot (x_2 + jy_2) = (x_1 \cdot x_2 - y_1 \cdot y_2) + j(x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_1);$$

$$\frac{(x_1 + jy_1)}{(x_2 + jy_2)} = \frac{(x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2) + j(x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2)}{x_2^2 + y_2^2}.$$

З наведених виразів випливає, що сума двох взаємо-спряжених комплексних чисел є дійсне число, рівне подвоєному значенню дійсної частини цих чисел. У свою чергу добутком комплексно спряжених чисел буде також дійсне число, рівне квадрату модуля цих чисел.

Якщо скористатися показовим записом комплексних чисел, то множення та ділення останніх визначається згідно виразам:

$$\underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 = r_1 \cdot r_2 \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)};$$

$$\frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

Із правила множення випливає правило піднесення до цілого додатного ступеню комплексного числа

$$\underline{z}^n = r^n \cdot e^{j(n \cdot \varphi)}.$$

Користуючись правилом ділення, неважко показати, що наведений вираз справедливий і для цілих від'ємних n .

Шляхом розв'язання зворотної задачі можна визначити корінь додатного цілого ступеня комплексного числа

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} \cdot e^{j \frac{\varphi + 2 \cdot k \cdot \pi}{n}},$$

де $k = 0, 1, \dots, n-1$...

Також можна визначити і інші функції комплексного змінного, правила обчислення яких зведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Функції комплексної змінної

Функція	Правило обчислення
<i>тригонометричні функції</i>	
$\cos(z)$	$\cos(x) \cdot \operatorname{ch}(y) - j \cdot \sin(x) \cdot \operatorname{sh}(y)$
$\sin(z)$	$\sin(x) \cdot \operatorname{ch}(y) + j \cdot \cos(x) \cdot \operatorname{sh}(y)$
$\operatorname{tg}(z)$	$\sin(z) / \cos(z)$
<i>гіперболічні функції</i>	
$\operatorname{cosh}(z)$	$\operatorname{cosh}(x) \cdot \cos(y) + j \cdot \sinh(x) \cdot \sin(y)$
$\sinh(z)$	$\sinh(x) \cdot \cos(y) + j \cdot \cosh(x) \cdot \sin(y)$
$\operatorname{tanh}(z)$	$\sinh(z) / \cosh(z)$

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схеми алгоритмів розрахунку алгебраїчних, тригонометричних та гіперболічних функцій комплексної змінної.
2. Розробити бібліотеку процедур та функцій комплексної змінної.
3. Розробити програму для вирішення задачі згідно варіанту табл. 1.2, з використанням бібліотеки функцій комплексної змінної.
4. Дослідити ефективність використання математичного апарату теорії комплексної змінної при моделюванні процесів передачі електричної енергії в системах змінного струму.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Хід і результати виконання кожного пункту викласти у звіті про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 1.2. Варіанти завдання

Варіант	Функція для розрахунку
0	$\underline{U}_1 = \cosh(\underline{\gamma}_0 l) \underline{U}_2 + \underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}_0 l) \cdot \underline{I}_2$
1	$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \sinh(\underline{\gamma}_0 l) + \cosh(\underline{\gamma}_0 l) \cdot \underline{I}_2$
2	$\underline{U}_2 = \cosh(\underline{\gamma}_0 l) \underline{U}_1 - \underline{Z}_c \operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 l) \cdot \underline{I}_1$
3	$\underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_c} \sinh(\underline{\gamma}_0 l) + \cosh(\underline{\gamma}_0 l) \cdot \underline{I}_1$
4	$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}$
5	$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$
6	$\underline{K}_Z = \frac{\sinh(\underline{\gamma}_0 l)}{\underline{\gamma}_0 l}$
7	$\underline{K}_Y = \frac{2 \tanh(\underline{\gamma}_0 l)}{\underline{\gamma}_0 l}$
8	$\underline{B} = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \sinh \sqrt{\underline{Z} \cdot \underline{Y}}$
9	$\underline{C} = \sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} \sinh \sqrt{\underline{Z} \cdot \underline{Y}}$

Лабораторна робота № 2 ЗАСТУПНІ СХЕМИ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Мета роботи: закріплення практичних умінь з формування математичних моделей елементів електричних мереж – ліній електропередавання та силових трансформаторів.

Стислі теоретичні відомості

Зазвичай під час розрахунку ustalених режимів електричної системи лінія електропередавання (ЛЕП) зображується П-подібною заступною схемою, представленою на рис. 2.1 а. В деяких електротехнічних задачах доцільно використовувати Т-подібну заступну схему лінії електропередавання, представлену на рис. 2.1 б. У будь-якому разі повздовжня гілка заступної схеми включає активний та індуктивний опори лінії, а поперечна гілка – активну та ємнісну провідності.

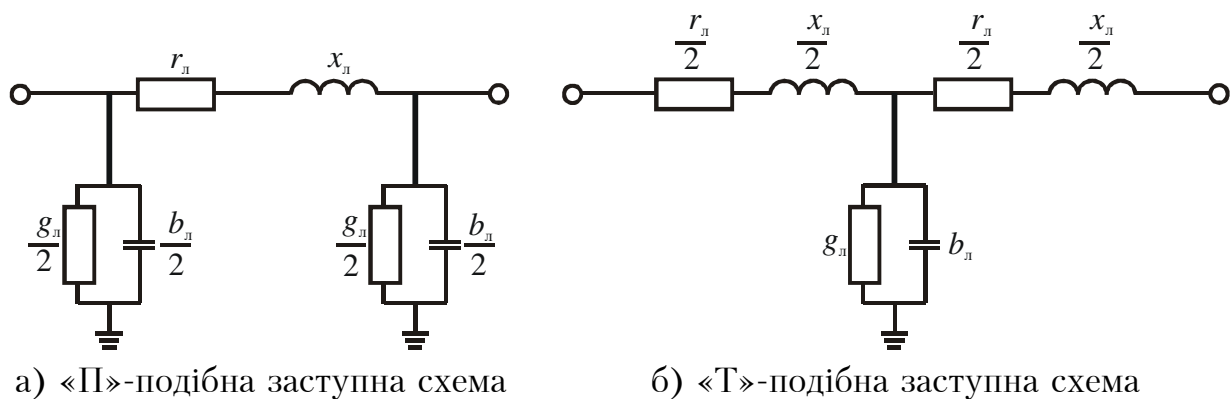


Рис. 2.1. Заступні схеми ліній електропередавання

Активний опір (резистанс) ЛЕП обумовлений джоулевими втратами електричної енергії на нагрівання проводів лінії при протіканні по них змінного струму навантаження. Внаслідок скін-ефекту активний опір ЛЕП дещо вище електричного опору постійному струму. Однак, для електричних систем промислової частоти 50 Гц таке збільшення опору сталелегалюмінієвих проводів ліній становить не більше 1–2%. Крім того, електричний опір проводів ЛЕП залежить від температури навколишнього середовища. За перепаду температури проводу від $+20^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$ зміна електричного опору сталелегалюмінієвих проводів може досягати 16%. У більшості випадків практичних розрахунків режимів ЛЕП та електричних систем зазначеними обставинами зазвичай нехтують і приймають активний опір лінії таким, що дорівнює електричному опору постійному струму за температури $+20^{\circ}\text{C}$.

Погонний резистанс повітряної лінії можна обчислити за формулою

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \quad (2.1)$$

де ρ – питомий опір F – розрахунковий переріз проводу, мм².

Індуктивний погонний опір (резистанс) однолінійної заступної схеми повітряної лінії, яка характеризується повним циклом транспозиції проводів, визначають за виразом

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{D_g}{R_{\text{eq}}} + 0,0157 \cdot \mu, \quad (2.2)$$

де $R_{\text{eq}} = \sqrt[n]{R \cdot \frac{a}{2 \sin \pi/n} \cdot n}$ – еквівалентний радіус пучка розщеплених проводів фази; R – радіус одиничного проводу; a – крок розщеплення; n – кількість проводів в конструкції розщепленої фази; $D_g = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$ – середньгеометрична відстань між фазними проводами повітряної лінії; μ – магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлено провід (для проводів з кольорових металів $\mu \approx 1$).

Погонна ємнісна провідність (сусцептанс) однолінійної заступної схеми лінії визначають за виразом

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_g}{R_{\text{eq}}}}. \quad (2.3)$$

Погонна активна провідність (кондуктанс) схеми однолінійної математичної моделі лінії обчислюють за виразом

$$g_0 = \frac{\Delta P_c \cdot 10^{-3}}{U_n^2}, \quad (2.4)$$

де ΔP_c – питомі втрати активної потужності на корону; U_n – номінальна напруга електропередачі.

Для визначення значень параметрів заступної схеми ЛЕП необхідно отримані погонні параметри помножити на довжину лінії:

$$\begin{aligned} r_{\text{л}} &= r_0 \cdot l; \\ x_{\text{л}} &= x_0 \cdot l; \\ g_{\text{л}} &= g_0 \cdot l; \\ b_{\text{л}} &= b_0 \cdot l. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Трансформатори в розрахунках режимів електричних систем представляють однолінійними Г-подібними заступними схемами, ка показано на рис. 2.2.

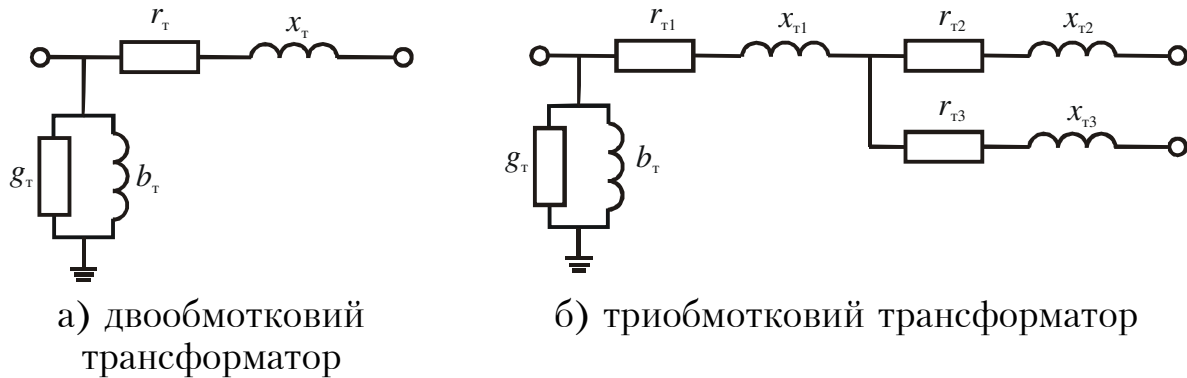


Рис. 2.2. Заступні схеми силових трансформаторів

Повздовжні елементи заступної схеми силового трансформатора складають активний та індуктивний опори обмоток, які визначають за втратами від протікання навантажувальних струмів по обмотках трансформатора (втрати в міді). Поперечні елементи заступної схеми трансформатора складають активна та індуктивна провідності контуру намагнічення, які відповідають втратам в сталі силового трансформатора.

Активний опір обмоток трансформатора визначають за виразами:
– для двообмоткового трансформатора

$$r_T = \frac{\Delta P_k U_n^2 10^{-3}}{S_n^2}; \quad (2.6)$$

– для триобмоткового трансформатора

$$r_{ТВ} = r_{ТС} = r_{ТН} = \frac{\Delta P_k U_n^2 10^{-3}}{2S_n^2}, \quad (2.7)$$

де ΔP_k – втрати активної потужності в досліді короткого замикання трансформатора; S_n – номінальна потужність трансформатора; U_n – номінальна напруга обмотки ВН трансформатора.

Індуктивний опір обмоток трансформатора обчислюють за виразами:
– для двообмоткового трансформатора

$$x_T = \frac{U_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}; \quad (2.8)$$

– для триобмоткового трансформатора

$$x_{ti} = \frac{U_{ki} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}; \quad (2.9)$$

$$U_{кв} = 0,5(U_{квс} + U_{квн} - U_{кчн});$$

$$U_{кч} = 0,5(U_{квс} + U_{кчн} - U_{квн});$$

$$U_{кчн} = 0,5(U_{квн} + U_{кчн} - U_{квс}),$$

де U_k, U_{ki} – напруга в досліді короткого замикання обмоток трансформатора; i – індекс обмоток (ВН, СН, НН).

Активну та індуктивну провідності дво- та триобмоткового трансформатора визначають за даними досліді неробочого ходу

$$g_{\tau} = \frac{\Delta P_o \cdot 10^{-3}}{U_n^2};$$

$$b_{\tau} = -\frac{i_o \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}. \quad (2.10)$$

де ΔP_o – втрати в досліді неробочого ходу; i_o – струм неробочого ходу трансформатора.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схеми алгоритмів розрахунку параметрів заступних схем ліній електропередавання та силових трансформаторів.
2. Розробити програмний модуль для розрахунку параметрів заступних схем елементів електричних мереж.
3. Реалізувати розрахунок параметрів заступних схем ліній електропередавання та трансформаторів, наведених в табл. 2.1 і табл. 2.2 відповідно.
4. Дослідити умови урахування зарядної ємнісної потужності та втрат активної потужності на корону під час формування математичної моделі лінії електропередавання.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 2.1. Варіанти для визначення параметрів заступних схем ліній електропередавання

Варіант	Напруга передачі, кВ	Марка проводу	Довжина ділянки, км	Діаметр, мм	Електрич. опір. пост. струму при 20°C, Ом/км	Кіл-ть проводів у розщепленій фазі	Шаг розщеплення, мм	Втрати на корону, кВт/км	Розташування проводів на опорах	Відстань між сусідніми фазами, м
0	110	АС 70/11	40	11,4	0,420	1	–	–	трикутн.	5,4
1	220	АС 240/32	80	21,6	0,118	1	–	–	трикутн.	9,0
2	330	АС 300/39	120	24,0	0,098	2	400	2,4	горизонт.	7,0
3	500	АС 400/51	180	27,5	0,075	3	400	6,2	горизонт.	13,0
4	750	АС 500/64	350	30,6	0,060	4	500	16,6	горизонт.	18,5
5	110	АС 185/43	35	19,6	0,156	1	–	–	трикутн.	6,0
6	220	АС 240/56	75	22,4	0,120	1	–	–	трикутн.	7,0
7	330	АС 400/51	125	27,5	0,075	2	500	2,6	горизонт.	8,4
8	500	АС 330/43	200	25,2	0,089	3	600	8,0	горизонт.	13,0
9	750	АС 400/51	400	27,5	0,075	5	500	10,8	горизонт.	18,5

Таблиця 2.2. Варіанти для визначення параметрів заступних схем силових трансформаторів

Варіант	Тип трансформатора	S_n , МВА	U_n , кВ	U_k (в-с), %	U_k (в-н), %	U_k (с-н), %	ΔP_k , кВт	ΔP_{σ} , кВт	i_{σ} , %
0	ТДТН-25000/110	25	115	10,5	17	6	145	36	1,0
1	ТДТН-40000/220	40	230	22,0	12,5	9,5	240	66	1,1
2	АТДЦТН-200000/330	200	330	10	34	22,5	600	180	0,5
3	АТДЦТН-250000/500	250	500	13	33	18,5	640	230	0,45
4	АОДЦТН-333000/750	333	$750/\sqrt{3}$	10	28	17	580	250	0,35
5	ТДТН-63000/110	63	115	11	17	10,5	310	70	0,85
6	ТДТН-125000/220	125	230	11	31	19	290	85	0,5
7	АТДЦН-250000/330	250	330	10,5	54	42	660	165	0,5
8	АОДЦТН-267000/500	267	$500/\sqrt{3}$	11,5	37	23	490	150	0,35
9	АОДЦТН-417000/750	417	$750/\sqrt{3}$	11,5	81	68	700	280	0,2

Лабораторна робота №3 МАТРИЦІ ІНЦИДЕНЦІЙ

Мета роботи: дослідження ефективності використання апарату теорії графів та матриць інциденції, при моделюванні конфігурації електричної мережі енергосистеми.

Стислі теоретичні відомості

Конфігурація електричної системи будь-якого ступеню складності та замкнутості в задачах розрахунку режимних параметрів усталеного режиму може бути представлена за допомогою математичного апарату теорії графів. При цьому досліджуються геометричні властивості електричної мережі без урахування її фізичних властивостей.

Кожному вузлу електричної мережі ставиться в однозначну відповідність певна вершина, а кожній гілці (лінії електропередачі або трансформаторного зв'язку) – ребра графа. Гілки утворюють ланцюги (шляхи графа), які, в загальному випадку, можуть бути замкненими, тобто утворювати контури. Слід відзначити, що всі фізичні величини, які характеризують стан гілок (струми, ЕРС, падіння напруги, потоки потужності), мають певний напрямок. Тому доцільно кожній гілці графа надати деякий, зазвичай довільно обраний, напрямок. Таким чином, схема заміщення електричної системи зображується зв'язним орієнтованим графом, ребрами якого є гілки, а вершинами – вузли системи.

При дослідженні топологічних властивостей електричної системи граф останньої доцільно розділяти на дерево та хорди.

Деревом називається найменший зв'язний підграф, який містить усю сукупність вершин графа. Інакше кажучи, до складу дерева входять гілки, які забезпечують зв'язок усіх вузлових точок схеми, але при цьому не утворюють жодного замкненого контуру. Очевидно, що кількість гілок, які входять до складу дерева на одиницю менше загальної кількості вузлів схеми, тобто дорівнює кількості незалежних вузлів схеми.

Решта частина схеми, яка містить гілки, включення яких до складу графа призводить до створення замкнених контурів, називається *хордами*. Очевидно, що кількість *незалежних контурів* у схемі електричної системи чисельно дорівнює кількості хорд і може бути визначена за виразом

$$D_k = N - M,$$

де N , M – загальна кількість гілок та незалежних вузлів у схемі електричної системи відповідно.

Інакше кажучи, до складу незалежного контуру може входити тільки одна хорда. Всі інші замкнені контури у графі мережі є залежними і можуть бути отримані шляхом об'єднання незалежних контурів. Доціль-

но додатним напрямком обходу контуру приймати напрямок, який збігається з напрямком відповідної хорди.

Перетином графа називається така мінімальна сукупність гілок схеми, виключення яких буде приводити до порушення зв'язності графа, тобто розподіленню графа на два не зв'язних підграфа. При цьому *базисним перетином* називається такий перетин, до складу якого входить тільки одна гілка дерева. Усі інші перетини можна одержати шляхом комбінації системи базисних перетинів. Очевидно, що загальна кількість базисних перетинів графа L чисельно дорівнює кількості незалежних вузлів у схемі M

$$L = M.$$

Доцільно додатним напрямком базисного перетину приймати напрямок, який збігається з напрямком відповідної гілки дерева графа.

Потрібно зазначити, що розподіл графа схеми електричної системи на дерево та хорди є умовним і може здійснюватися цілком довільно. Очевидно, що зі зростанням складності та зв'язності електричної системи кількість ймовірних варіантів такого розподілення буде зростати, а, отже, одна й та ж схема при різних підходах до формування дерева й хорд графа може мати різний склад незалежних контурів і базисних перетинів.

Розподіл схеми на дерево та хорди дозволяє суттєво спростити вирішення низки задач по дослідженню режимів роботи електричної системи. Цей розподіл доцільно враховувати при формуванні списків вузлів та гілок. Спочатку слід розміщати у списку всі гілки, які входять до складу дерева, а потім – хорди. Також при формуванні списку гілок дерева схеми доцільно забезпечити збіг індексів гілок та віднесених до них вузлів, так як кількість вузлів дерева дорівнює кількості незалежних вузлів схеми. Такий підхід дозволяє суттєво спростити рішення задач, а також домогтися економії ресурсів ЕОМ, необхідних для зберігання відповідних структур даних.

Для зображення конфігурації орієнтованого графа в пам'яті ЕОМ використовуються спеціальні матриці, які відображають зв'язки між елементами схеми електричної мережі (матриці інциденцій):

1. Матриця з'єднань;
2. Матриця контурів;
3. Матриця перетинів.

Матриця з'єднань відображає зв'язок між гілками та вузлами схеми електричної системи та являє собою прямокутну матрицю, кількість рядків якої дорівнює кількості вершин графа M , а кількість стовпців – кількості ребер N :

$$\mathbf{M}_{\Sigma} = [m_{ij}],$$

де $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$.

Елементи матриці \mathbf{M}_Σ можуть приймати одне з трьох значень: $m_{ij} = +1$, якщо вузол i являється вершиною, що є початком гілки j ; $m_{ij} = -1$, якщо вузол i являється вершиною, що є кінцем гілки j ; $m_{ij} = 0$, якщо вузол i взагалі не є вершиною гілки j .

Кожний рядок матриці \mathbf{M}_Σ визначає сукупність гілок, кожна з яких зв'язана з відповідним вузлом схеми з урахуванням напрямку цих гілок. З іншого боку, кожен стовпець показує, які саме вузли є початком або кінцем даної гілки.

Очевидно, в кожному стовпці матриці \mathbf{M}_Σ може бути тільки одна додатна й одна від'ємна одиниця. Отже, сума всіх рядків першої матриці інциденцій повинна давати нульовий рядок:

$$\mathbf{n}_t \mathbf{M}_\Sigma = 0,$$

де \mathbf{n}_t – одиничний рядок.

Ця обставина дає змогу робити висновок про те, що в будь-якій схемі електричної мережі один вузол є залежним, зв'язки якого можуть бути визначені на основі параметрів інших, незалежних вузлів:

$$\mathbf{M}_6 = -\mathbf{n}_t \mathbf{M},$$

де \mathbf{M} – перша матриця інциденцій для схеми без рядка, який відповідає балансуєчому вузлу; \mathbf{M}_6 – вектор-рядок першої матриці інциденцій для балансуєчого вузла.

Іншими словами, будь-який рядок першої матриці \mathbf{M}_Σ може бути отриманий шляхом додавання по стовпцям усіх інших рядків та заміни знаків усіх елементів отриманого рядка на протилежні. Тому в практичних розрахунках достатньо користуватись матрицею \mathbf{M} , до складу якої не входить рядок, який відповідає балансуєчому пункту. За необхідності, на основі вищенаведених міркувань можна відновити повну схему електричної мережі.

При організації списків вузлів та гілок схеми електричної системи за наданими вище принципами, на головній діагоналі матриці зв'язку будуть розташовані одиниці (додатні або від'ємні, залежно від орієнтації гілок дерева схеми).

Матриця контурів визначає зв'язки між гілками схеми електричної мережі й незалежними контурами. Вона являє собою прямокутну матрицю, кількість рядків якої дорівнює кількості незалежних контурів графа D_k , а кількість стовпців – кількості гілок N

$$\mathbf{N} = [n_{ij}],$$

де $i = 1, 2, \dots, D_k$; $j = 1, 2, \dots, N$.

Елементи матриці \mathbf{N} можуть приймати одне з трьох значень: $n_{ij} = +1$, якщо гілка j входить в контур i й додатній напрямком гілки збігається з додатнім напрямком обходу контуру; $n_{ij} = -1$, якщо гілка j належить кон-

туру i та їх напрямки протилежні; $n_{ij} = 0$, якщо гілка j не належить контуру i .

Очевидно, кожний рядок матриці \mathbf{N} показує, які гілки входять до складу кожного незалежного контура і яку орієнтацію вони мають щодо напрямку додатного обходу контура. З іншого боку, елементи кожного стовпця другої матриці інциденцій відбивають незалежні контури, яким належить дана гілка і чи співпадає її орієнтація з напрямком цих контурів.

Якщо списки вузлів та гілок схеми електричної системи формувати на основі вказаних вище принципів, матрицю контурів можна умовно поділити на дві частини. Ліва підматриця відповідає гілкам дерева, а права, в свою чергу, хордам схеми електричної мережі. До того ж підматриця, відповідна хордам, буде являти собою квадратну одиничну матрицю.

Матриця перетинів визначає зв'язок між гілками схеми електричної системи та базисними перетинами і є прямокутною матрицею, кількість рядків якої дорівнює кількості базисних перетинів графа L , а кількість стовпців – кількості гілок N :

$$\mathbf{Q} = [q_{ij}],$$

де $i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, N$.

Елементи матриці \mathbf{Q} можуть приймати одне із трьох значень:

$q_{ij} = +1$, якщо гілка j належить перетину i та додатній напрямком гілки збігається з додатнім напрямком перетину; $q_{ij} = -1$, якщо гілка j належить перетину i та їх напрямки протилежні; $q_{ij} = 0$, якщо гілка j не належить перетину i .

Очевидно, кожен рядок матриці \mathbf{Q} показує гілки, які входять до складу кожного базисного перетину і яку орієнтацію стосовно додатного напрямку перетину. З іншого боку, кожен стовпець третьої матриці інциденцій показує, до складу яких базисних перетинів належить поточна гілка, і чи збігається її орієнтація з напрямком цих перетинів.

Якщо списки вузлів та гілок схеми електричної системи формувати на основі наведених вище принципів, матрицю перетинів також, як і матрицю контурів, умовно можна розподілити на дві частини. Ліва підматриця відповідає гілкам дерева, та права – хордам схеми електричної мережі. В даному випадку ліва підматриця, яка відповідає дереву схеми, буде являти собою квадратну одиничну матрицю.

Розглянута система трьох матриць інциденцій має властивість надмірності. Для однозначного визначення топологічних властивостей схеми електричної системи достатньо мати лише першу матрицю інциденцій – матрицю зв'язку гілок та вузлів. Решта матриць – контурів та перетинів може бути визначена на основі наступних співвідношень:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_d & \mathbf{M}_x \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_d & \mathbf{E} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{Q}_x \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{N}_d^T = -\mathbf{M}_d^{-1}\mathbf{M}_x;$$

$$\mathbf{Q}_x = -\mathbf{N}_d^T.$$

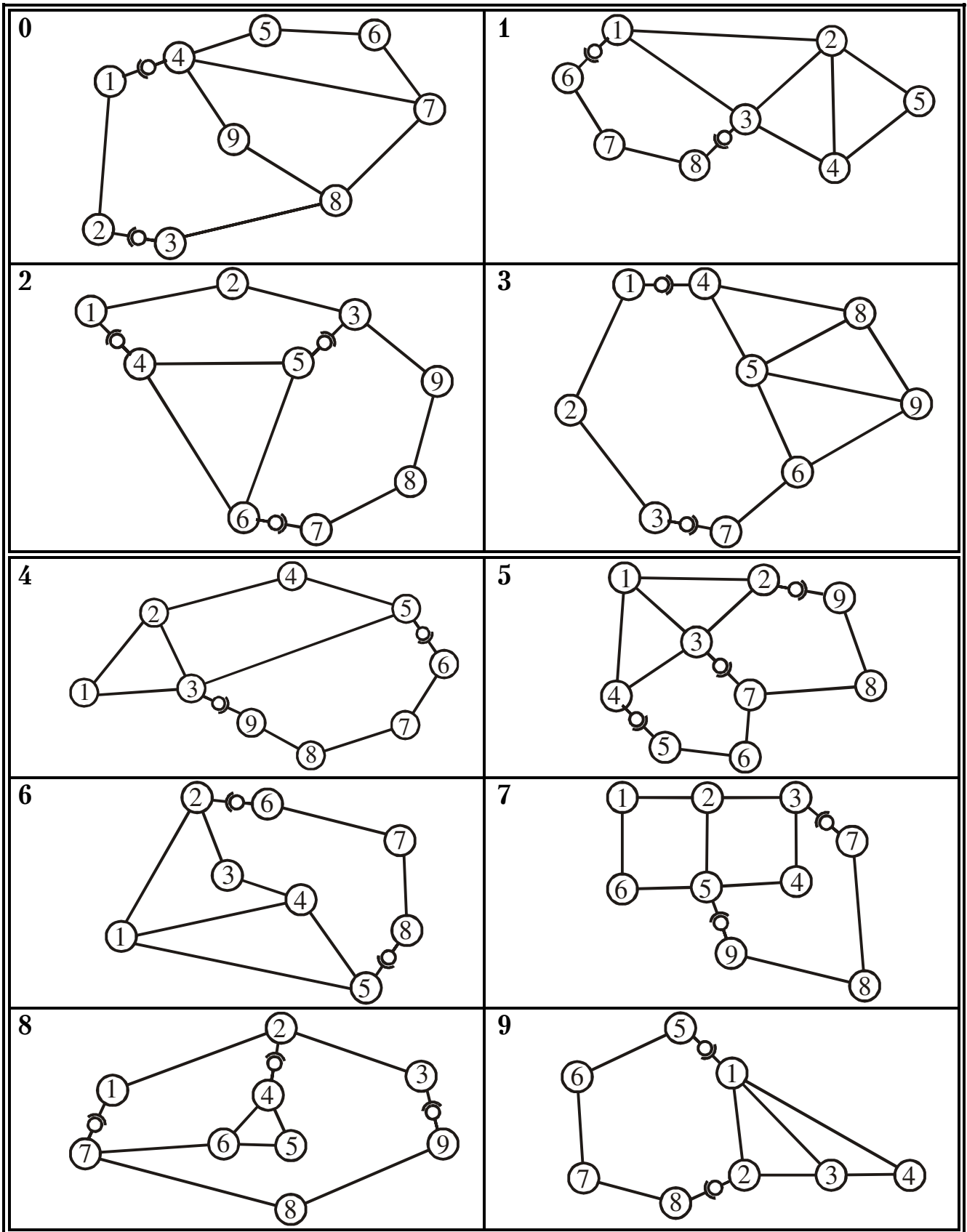
Тут індексами “д” та “х” позначені підматриці, відповідні дереву і хордам.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схеми алгоритмів формування матриць інциденцій для конфігурації електричної систем.
2. Розробити програмний модуль формування конфігураційної моделі електричної системи.
3. Реалізувати процедури формування першої та другої матриць інциденцій для схеми електричної мережі табл. 3. 1 відповідно до варіанту.
4. Дослідити залежність обсягів оперативної пам'яті ЕОМ для зберігання інформації про конфігурацію електричної системи від кількості вузлів та гілок в схемі. Побудувати графіки таких залежностей.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Хід і результати виконання кожного пункту викласти у звіті про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 3.1. Варіанти схем електричних мереж



Лабораторна робота №4 СИСТЕМА АДРЕСНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

Мета роботи: дослідження ефективності використання системи адресних відображень для формування конфігураційної моделі складнозамкненої електричної системи

Стислі теоретичні відомості

Під час вирішення задач оцінки режимних параметрів електричної системи будь-якого ступеню складності та замкненості структура останньої однозначно може бути представлена за допомогою орієнтованого графа, вершини якого відповідають вузловим точкам мережі, а ребра – гілкам. В пам'яті ЕОМ такий граф може відображатися за допомогою системи матриць інциденцій, які фіксують зв'язки між гілками та вузлами, а також між гілками та незалежними контурами. Слід зауважити, що такі матриці містять велику кількість нульових елементів, відносна кількість яких різко зростає зі збільшенням розмірності електричної системи. Іншими словами, матриці інциденцій відносять до класу слабкозаповнених матриць і для підвищення ефективності алгоритмів аналізу режимних параметрів електричної системи необхідно використовувати спеціальні методи зберігання та обробки розріджених матриць, які містять інформацію про топологічні властивості електричної мережі.

Реалізація таких методів ґрунтується на властивостях матриць інциденцій, а саме на тому, що елементи матриці можуть приймати одне з трьох припустимих значень – додатна і від'ємна одиниця та нуль. Найбільш розповсюджена методика зберігання в пам'яті ЕОМ даних про топологічні властивості електричних систем передбачає використання системи адресних відображень. Остання є трирівнева перехресна спискова структура, що зберігає інформацію про вузли і гілки електричної мережі.

Перші адресні відображення – це два довільно впорядковані масиви, які зберігають дані про вузли і гілки схеми електричної мережі відповідно. Кожен з масивів являє собою спискову структуру, що містить такі дані, як ідентифікатор вузла, рівень напруги, навантаження у вузлі, вузлова провідність, статична характеристика навантаження, статизм частотної характеристики навантаження тощо (для списку вузлів); ідентифікатори вузлів початку і кінця гілки, опір та поперечна провідність гілки, коефіцієнт трансформації трансформаторного зв'язку, струм, потік потужності, втрати потужності в гілці тощо (для списку гілок).

Так, наприклад, для фрагмента схеми електричної мережі Об'єднаної енергосистеми України, що зображена на рис. 4.1 та містить 14 вузлів і 15 гілок, перша система адресних відображень має у складі масиви, показані на рис. 4.2, де i та j – індекси масивів вузлів та гілок відповідно; N_i –

ідентифікатор i -го вузла у списку вузлів; N_{sj} , N_{ej} – ідентифікатори вузлів початку та кінця j -ої гілки у списку гілок відповідно. Зазначимо, що крім вказаної інформації в приведених масивах може міститись будь-яка інша інформація про вузли і гілки схеми електричної мережі.

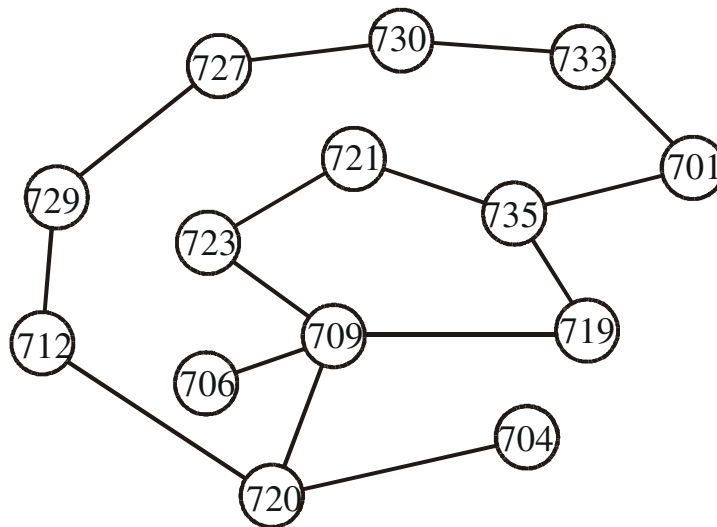


Рис. 4.1. Фрагмент електричної мережі ОЕС України

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
N_i	701	733	730	727	735	721	719	709	723	729	712	706	720	704	
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N_{sj}	701	733	730	727	701	735	735	721	709	709	709	729	712	709	704
N_{ej}	733	730	727	729	735	721	719	723	723	719	706	712	720	720	720

Рис. 4.2. Перша система адресних відображень схеми фрагменту електричної мережі ОЕС України

Очевидно, що розглянутий спосіб відображення даних про схему електричної мережі потребує мінімальних витрат пам'яті ЕОМ для зберігання інформації, оскільки дана структура даних не передбачає зберігання ніякої додаткової надлишкової інформації про електричну систему. Вказана обставина визначає необхідність реалізації додаткових процедур пошуку під час виконання розрахунку режимних параметрів електричної системи. Так, наприклад, згідно закону Ома струм в j -ій гілці визначається наступним чином:

$$I_j = \frac{U_{sj} - U_{ej}}{Z_j},$$

де U_{sj} , U_{ej} – рівні напруги у вузлах початку та кінця j -ої гілки.

Таким чином, для визначення струму j -ої гілки по ідентифікаторах відповідних вузлів необхідно знайти інформацію про рівні напруги в списку вузлів. Очевидно, це потребує додаткових витрат машинного часу на реалізацію такого пошуку, що зазвичай недопустимо при збільшенні розмірності схеми електричної мережі.

Цю негативну обставину можна компенсувати за рахунок реалізації такого пошуку на попередньому етапі обчислення та збереження результатів у відповідній структурі даних. Тоді, у випадку необхідності, програма буде звертатись до останніх, що суттєво зменшить витрати машинного часу на реалізацію розрахунків режимних параметрів електричної системи.

Другі адресні відображення передбачають зберігання в списку гілок додаткової інформації – покажчики на початкові та кінцеві вузли відповідних гілок у списку вузлів, як наведено на рис. 4.3. Тут f, k – індекси вузлів початку та кінця j -ої гілки у списку вузлів; m – загальна кількість вузлів в схемі електричної мережі. Для розглянутого прикладу фрагменту електричної мережі Національної енергосистеми України список гілок в цьому випадку буде мати вигляд, представлений на рис. 4.4.

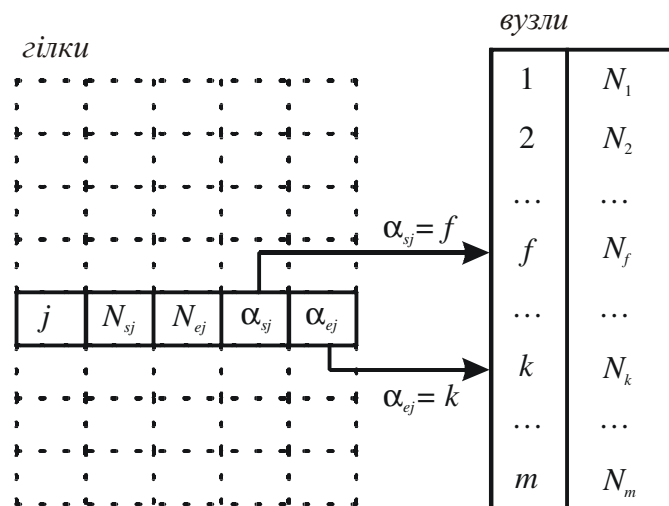


Рис. 4.3. Структура системи других адресних відображень

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N_{sj}	701	733	730	727	701	735	735	721	709	709	709	729	712	709	704
N_{ej}	733	730	727	729	735	721	719	723	723	719	706	712	720	720	720
α_{sj}	1	2	3	4	1	5	5	6	8	8	8	10	11	8	14
α_{ej}	2	3	4	10	5	6	7	9	9	7	12	11	13	13	13

Рис. 4.4. Список гілок фрагменту ОЕС України, сформований з урахуванням принципів других адресних відображень

При вирішенні низки практичних розрахункових задач, наприклад, при визначенні власних провідностей вузлів електричної мережі, необхідно розглядати “кущі”, створені кожним вузлом в графі схеми мережі.

Для вирішення подібних задач необхідна система *третіх адресних відображень*, де інформація про топологічні властивості системи міститься у двох масивах: α – впорядкований згідно “кущам” список індексів гілок та γ – масив адресних посилань кожного вузла на перший елемент відповідного “куща” в масиві α (рис. 4.5). Ознакою останнього елементу “куща” кожного вузла схеми електричної мережі є знак “–” у елементі масиву α .

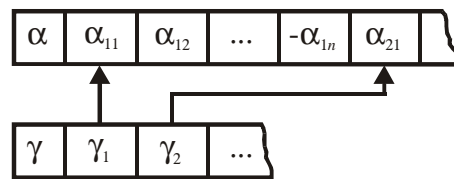


Рис. 4.5. Структурна схема системи третіх адресних відображень

Для розглянутого прикладу конфігурації фрагмента електричної мережі ОЕС України система третіх адресних відображень формується наступним чином. На попередньому етапі ініціюються порожні масиви α і γ . Розмірність масиву γ дорівнює кількості вузлів схеми, а розмірність масиву α – в два рази більша кількості гілок (кожна гілка входить в два куща, що створені вузлами початку та кінця гілки). Будемо розглядати послідовно всі вузли схеми електричної мережі разом зі створеними ними “кущами” згідно списку вузлів системи перших адресних відображень. Першим вузлом в даному списку є вузол 701, що є вершиною “куща”, в склад якого входять дві гілки – (701-733) і (701-735) – 1-ша та 5-та гілки в списку гілок. Відповідні індекси гілок заносяться в масив α : $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = -5$. Другому елементу α_2 присвоюється знак “–”, що свідчить про останній елемент поточного “куща”. В перший елемент масиву γ записують “1”, оскільки дані про “кущі” першого вузла містяться в масиві α , починаючи з першої комірки. Далі розглядається другий вузол електричної мережі, дані про “кущ” якого записують в масив α , починаючи з третього елементу. Тому в масив γ у другу комірку заносять “3”, що вказує на початок “куща” другого вузла, і так далі.

Система третіх адресних відображень розглянутого фрагменту електричної мережі ОЕС України подано на рис. 4.6.

Варто зазначити, що в практиці розрахунків режимів роботи електричних систем можуть використовувати й більш складні системи адресних відображень, які враховують зміну конфігурації схеми електричної мережі в процесі експлуатації електричної системи тощо.

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 1 & -5 & 1 & -2 & 2 & -3 & 3 & -4 & 5 & 6 & -7 & 6 & -8 & 7 & -10 \\ 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 \\ 9 & 10 & 11 & -14 & 8 & -9 & 4 & -12 & 12 & -13 & -11 & 13 & 14 & -15 & -15 \end{bmatrix}$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 12 & 14 & 16 & 20 & 22 & 24 & 26 & 27 & 30 \end{bmatrix}$$

Рис. 4.6. Система третіх адресних відображень для фрагменту електричної мережі ОЕС України

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схеми алгоритмів формування конфігураційної моделі електричної системи на базі адресних відображень.
2. Розробити програмний модуль формування конфігураційної моделі електричної системи.
3. Реалізувати процедури формування системи других та третіх адресних відображень для схеми згідно варіанта табл. 3.1.
4. Дослідити залежність обсягів оперативної пам'яті ЕОМ для зберігання інформації про конфігурацію електричної системи від кількості вузлів та гілок в схемі. Побудувати графіки таких залежностей. Порівняти з результатами, отриманими при виконанні лабораторної роботи 3.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Лабораторна робота №5 СЛАБКОЗАПОВНЕНІ МАТРИЦІ

Мета роботи: дослідити ефективність використання спеціальних моделей слабкозаповнених матриць при моделюванні електричних систем

Стислі теоретичні відомості

Вирішення широкого кола електротехнічних задач пов'язане з використанням матриць, структура яких відповідає топології електричної системи. До них належать матриці інцидентів, власних і взаємних провідностей, Якобі та інші. Важливою особливістю таких матриць є велика кількість нульових елементів, які в них містяться, причому зі збільшенням розмірності електричної системи ступінь розрідженості матриць збільшується.

У загальному випадку матриця, що містить відносно невелику кількість ненульових елементів називається розрідженою або слабкозаповненою. Практично матрицю розмірності $n \times n$ можна вважати слабкозаповненою, якщо кількість ненульових елементів має порядок n .

Великі розріджені матриці звичайно зберігаються в пам'яті ЕОМ в упакованому виді. Тобто, зберігаються тільки ненульові елементи разом з інформацією про їх розташування в матриці. Це дозволяє істотно скоротити ресурси ЕОМ за рахунок зберігання тільки значущих елементів і виключення тривіальних операцій з нулями в процесі обробки матриці.

Очевидно, використання спеціальних методів зберігання та обробки слабкозаповнених матриць буде ефективним лише у тому випадку, коли обсяги пам'яті ЕОМ, необхідні для зберігання упакованої матриці будуть істотно менше, ніж обсяги пам'яті для зберігання повної матриці, крім того, загальний машинний час, необхідний на упаковку, повинен бути меншим від часу, витраченого на виконання тривіальних операцій з нулями матриці.

Розглянемо найбільш ефективні схеми упаковки слабкозаповнених матриць, які отримали широке розповсюдження в сучасних програмних продуктах. Різні способи упаковки слабкозаповнених матриць розглянемо на прикладі матриці вузлових провідностей електричної системи, зображеної на рис. 5.1:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & y_{12} & y_{13} & y_{14} & 0 \\ y_{21} & 0 & 0 & 0 & y_{25} \\ y_{31} & 0 & 0 & 0 & y_{35} \\ y_{41} & 0 & 0 & 0 & y_{45} \\ 0 & y_{52} & y_{53} & y_{54} & 0 \end{bmatrix}$$

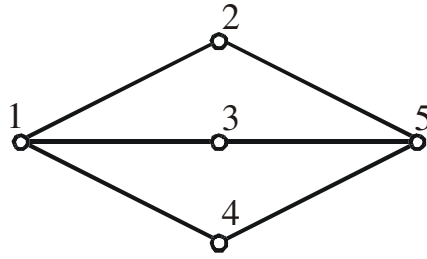


Рис. 5.1. Схема електричної мережі

Схема I. Кожному ненульовому елементу матриці відповідає запис із двох комірок даних. У першій комірці міститься номер рядка, а в другій – значення елемента. Нуль у першій комірці означає кінець поточного стовпця. Друга комірка у цьому випадку містить номер наступного стовпця матриці. Нулі в обох комірках вказують на кінець масиву, який містить дані матриці.

Розглянута матриця буде зберігатися у вигляді наступного масиву:

$[(0, 1); (2, y_{21}); (3, y_{31}); (4, y_{41}); (0, 2); (1, y_{12}); (5, y_{52}); (0, 3); (1, y_{13}); (5, y_{53}); (0, 4); (1, y_{14}); (5, y_{54}); (0, 5); (2, y_{25}); (3, y_{35}); (4, y_{45}); (0, 0)]$

Тут перша пара елементів $(0, 1)$ вказує на те, що далі будуть іти ненульові елементи першого стовпця матриці. Друга пара $(2, y_{21})$ вказує, що в другому рядку першого стовпця знаходиться ненульовий елемент, чисельно рівний y_{21} . Аналогічно, третя пара елементів $(3, y_{31})$ вказує на ненульовий елемент у третьому рядку першого стовпця y_{31} , і так далі. П'ята пара елементів $(0, 2)$ вказує на те, що далі ідуть дані значущих елементів другого стовпця. У свою чергу, остання, вісімнадцята пара елементів $(0, 0)$ вказує на кінець масиву даних упакованої матриці.

Схема II. Інформація про матрицю зберігається в трьох масивах: **VE** – значень ненульових елементів, **RI** – індексів рядків відповідних елементів матриці та **CIP** – покажчиків індексів стовпців.

Елемент RI_i – i -й елемент масиву **RI** – містить індекс рядка i -го елемента масиву **VE** – VE_i . Якщо перший ненульовий елемент j -го стовпця матриці розміщується в VE_k , то індекс k зберігається в j -м елементі масиву **CIP**, тобто $CIP_j = k$.

Матриця **Y** за розглянутою схемою буде зберігатися в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \mathbf{VE} &= [y_{21}; y_{31}; y_{41}; y_{12}; y_{52}; y_{13}; y_{53}; y_{14}; y_{54}; y_{25}; y_{35}; y_{45}]; \\ \mathbf{RI} &= [2; 3; 4; 1; 5; 1; 5; 1; 5; 2; 3; 4]; \\ \mathbf{CIP} &= [1; 4; 6; 8; 10]. \end{aligned}$$

Оскільки $CIP_1 = 1$, згідно з вищевикладеними принципами упаковки слабкозаповненої матриці, ненульові елементи першого стовпця зберігаються в масиві **VE**, починаючи з першого елемента; аналогічно, дані елементів другого стовпця зберігаються в масиві **VE** починаючи з 4-го еле-

мента ($CIP_2 = 4$); третього стовпця – починаючи з 6-го елемента ($CIP_6 = 6$) і так далі. В свою чергу, перший елемент масиву $\mathbf{VE} - VE_1 = y_{21}$ містить дані про ненульовий елемент другого рядка матриці, оскільки $RI_1 = 2$. Виходячи з аналогічних міркувань, оскільки $RI_4 = 1$, четвертий елемент масиву $VE_4 = y_{12}$ перебуває в першому рядку матриці \mathbf{Y} .

Схема III. Кожному ненульовому елементу матриці однозначно ставиться у відповідність ціле додатне число

$$\lambda(i, j) = i + (j - 1) \cdot n,$$

де i, j – рядок та стовпець, на перетині яких знаходиться поточний значущий елемент квадратної матриці розмірності n .

Зберігання значущих елементів забезпечується двома масивами: \mathbf{VE} – значень ненульових елементів та \mathbf{LD} , який містить значення $\lambda(i, j)$.

Матриця \mathbf{Y} буде представлена в наступному виді:

$$\begin{aligned} \mathbf{VE} &= [y_{21}; y_{31}; y_{41}; y_{12}; y_{52}; y_{13}; y_{53}; y_{14}; y_{54}; y_{25}; y_{35}; y_{45}]; \\ \mathbf{LD} &= [2; 3; 4; 6; 10; 11; 15; 16; 20; 22; 23; 24]. \end{aligned}$$

Вихідна матриця може бути відновлена в такий спосіб. Індекс стовпця, у якому знаходиться k -й елемент вектора \mathbf{VE} визначається як найменше ціле число, більше або рівне $\lambda(i, j)/n$. У свою чергу, індекс рядка може бути отриманий за виразом:

$$i = \lambda(i, j) - (j - 1) \cdot n.$$

Так, наприклад, 6-му елементу масиву \mathbf{VE} відповідає елемент вектора \mathbf{LD} $\lambda(i, j) = LD_6 = 11$. Тоді $\lambda(i, j)/n = 11/5$ і найменше ціле число, яке більше або дорівнює $11/5$ буде 3. Тобто відповідний ненульовий елемент знаходиться в третьому стовпці матриці.

У свою чергу, індекс рядка дорівнює

$$i = \lambda(i, j) - (j - 1) \cdot n = 11 - (2 - 1) \cdot 5 = 1.$$

Таким чином, розглянутий елемент y_{13} знаходиться в третьому стовпці і першому рядку матриці \mathbf{Y} .

Розглянуті схеми упаковки слабкозаповнених матриць відрізняються максимальним ступенем стислості інформації про матрицю. Однак ця обставина обумовлює додаткові витрати ресурсів ЕОМ при зміні структури матриці. Так, при внесенні нового ненульового елемента необхідно здійснювати зсув всіх наступних за ним елементів на один запис. Тому застосування зазначених схем упаковки прийнятно тільки для зберігання незмінних у процесі обробки, статичних матриць.

Багато алгоритмів перетворення матриць, наприклад, алгоритм методу Гаусса, породжують на різних етапах обчислень додаткові ненульові елементи. Тому при зберіганні в упакованій формі повинна бути перед-

бачена можливість додавання нових ненульових елементів у матрицю й навпаки, видалення (обнуління) існуючих елементів. Одним з найбільш ефективних методів зберігання ненульових елементів слабкозаповненої матриці є використання зв'язних списків.

Інформація про ненульові елементи матриці зберігається по стовпцях, елементу a_{ij} буде відповідати деякий запис j -го стовпця матриці. Кожному ненульовому елементу матриці відповідає в пам'яті ЕОМ запис. Останні являють собою впорядковані трійки значень (i, a, p) , де i – індекс рядка ненульового елемента, a – значення елемента a_{ij} , p – адреса наступного ненульового елемента j -го стовпця матриці. Значення p дорівнює нулю, якщо поточний запис відповідає останньому ненульовому елементу стовпця. Пам'ять для зберігання всієї матриці складається із двох областей – **BC**-пам'яті для зберігання початкових адрес стовпців матриці та **SI**-пам'яті для записів. Перша частина (**BP**) є масивом з n послідовно розташованих комірок, що містять адреси записів перших ненульових елементів відповідних стовпців. Друга частина (**SI**) складається із записів, пов'язаних з ненульовими елементами матриці.

Головною перевагою такої схеми зберігання є те, що немає необхідності впорядковувати інформацію про ненульові елементи матриці будь-яким чином. Більш того, область у пам'яті ЕОМ для зберігання таких записів необов'язково повинна бути суцільною, записи можуть бути розкидані по всій доступній оперативній пам'яті ЕОМ. Ця обставина дозволяє істотно спростити процедури додавання нових ненульових елементів та обнуління існуючих.

Розглянута в попередніх прикладах матриця **Y** буде упакована в наступній формі:

$$\mathbf{SI} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 & 1 & 4 & 2 & 5 & 3 & 5 & 4 & 5 \\ y_{12} & y_{21} & y_{13} & y_{31} & y_{14} & y_{41} & y_{25} & y_{52} & y_{35} & y_{53} & y_{45} & y_{54} \\ 8 & 4 & 10 & 6 & 12 & 0 & 9 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{BC} = [2 \ 1 \ 3 \ 5 \ 7]$$

Тут перший елемент масиву **BS** $BS_1 = 2$ свідчить про те, що перший стовець матриці **Y** зберігається в області **SI** починаючи із другого запису. Значення цього елемента $a_2 = y_{21}$ і розташовується він у другому рядку матриці ($i_2 = 2$). Наступний ненульовий елемент першого стовпця матриці зберігається в 4-му запису області **SI**, оскільки $p_2 = 4$. У свою чергу, третій ненульовий елемент першого стовпця зберігається в 6-му запису **SI** ($p_4 = 6$). Цей елемент є останнім у першому стовпці, оскільки $p_6 = 0$. На підставі аналогічних міркувань можна визначити склад елементів матриці, що перебувають в 2-му, 3-му та будь-якому іншому стовпці.

Припустимо, що в третій рядок четвертого стовпця матриці необхідно внести новий ненульовий елемент y_{34} . Перший вільний запис області **SI** – 13-я, тому новий елемент буде збережений в 13-му запису **SI**. Оче-

видно, що новий ненульовий елемент матриці розташовується між першим та другим ненульовими елементами четвертого стовпця матриці, які зберігаються в 5-му та 12-му запису **SI** відповідно. Тоді покажчик на наступний ненульовий елемент в 5-му запису **SI** повинен бути перенесений у новий 13-тий запис ($p_{13} = 12$), а сам повинен вказувати на новий елемент ($p_5 = 13$). У такий спосіб матриця **Y** буде упакована наступним чином:

$$\mathbf{SI} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 & 1 & 4 & 2 & 5 & 3 & 5 & 4 & 5 & 3 \\ y_{12} & y_{21} & y_{13} & y_{31} & y_{14} & y_{41} & y_{25} & y_{52} & y_{35} & y_{53} & y_{45} & y_{54} & y_{34} \\ 8 & 4 & 10 & 6 & 13 & 0 & 9 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{BC} = [2 \ 1 \ 3 \ 5 \ 7]$$

Аналогічно здійснюється й видалення існуючих ненульових елементів матриці. Припустимо, у процесі обробки матриці **Y** необхідно обнулити елемент, що знаходиться в першому рядку третього стовпця ($y_{13} = 0$). Очевидно, ненульові елементи третього стовпця матриці **Y** зберігаються в області **SI** починаючи з 3-го запису ($BC_3 = 3$), і перший з цих елементів знаходиться в першому рядку матриці ($i_3 = 1$). Оскільки елемент, що зберігається в даному записі обнуляється, першим ненульовим елементом третього стовпця буде наступний, тобто елемент, що зберігається в 10-му запису **SI** ($p_3 = 10$). Тому 3-й елемент масиву **BC** повинен вказувати на цей 10-й запис. У свою чергу 3-й запис області **SI** звільняється й може бути використаний, якщо буде потреба, для внесення нового ненульового елемента в матрицю. У такий спосіб матриця **Y** буде упакована наступним чином:

$$\mathbf{SI} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & - & 3 & 1 & 4 & 2 & 5 & 3 & 5 & 4 & 5 & 3 \\ y_{12} & y_{21} & - & y_{31} & y_{14} & y_{41} & y_{25} & y_{52} & y_{35} & y_{53} & y_{45} & y_{54} & y_{34} \\ 8 & 4 & - & 6 & 13 & 0 & 9 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{BC} = [2 \ 1 \ 10 \ 5 \ 7]$$

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схеми алгоритмів упаковки, відновлення та зміни слабкозаповненої матриці.
2. Розробити програмний модуль формування та обробки слабкозаповненої матриці власних і взаємних провідностей схеми електричної мережі.
3. Реалізувати процедури формування та обробки слабкозаповненої матриці власних і взаємних провідностей схеми електричної мережі згідно варіанта табл. 3.1. Параметри ділянок згідно з даними табл. 5.1. Параметри трансформаторних гілок згідно варіанта табл. 2.2.

4. Дослідити ефективність використання апарату слабкозаповнених матриць щодо обсягів оперативної пам'яті ЕОМ та часу обробки інформації, яка міститься у слабкозаповненої матриці. Побудувати відповідні графіки в залежності від розмірності неупакованої повної матриці.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 5.1. Параметри ділянок схеми електричної мережі

ділянка	опір, Ом	ділянка	опір, Ом
1-2	$9,95 + j16,92$	4-5	$12,17 + j20,54$
1-3	$4,98 + j8,46$	4-6	$7,77 + j10,99$
1-4	$9,42 + j12,87$	4-7	$10,36 + j13,61$
1-5	$15,7 + j21,45$	4-8	$6,86 + j8,86$
1-6	$7,47 + j12,69$	4-9	$7,54 + j16,26$
2-3	$6,28 + j8,58$	5-6	$6,38 + j8,64$
2-4	$9,56 + j16,21$	5-8	$7,24 + j10,76$
2-5	$6,18 + j8,62$	5-9	$16,36 + j20,56$
3-4	$12,56 + j17,1$	6-7	$7,42 + j11,93$
3-5	$6,52 + j8,88$	6-9	$10,26 + j15,11$
3-8	$6,68 + j8,67$	7-8	$6,83 + j8,38$
3-9	$9,24 + j10,17$	8-9	$9,46 + j10,75$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ІТЕРАЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ НАЙПРОСТІШОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи: дослідити збіжність ітераційного процесу при реалізації розрахункових моделей найпростіших електричних систем

Стислі теретичні відомості

Розглянемо найпростішу електричну систему номінальної напруги 35 кВ, до складу якої входить генератор, лінія електропередавання та електричне навантаження. Оскільки номінальна напруга електричної системи не перевищує 35 кВ, поперечними елементами заступної схеми можна знехтувати через несуттєву зарядну потужність лінії та відсутність втрат потужності на корону (див. рис. 6.1).

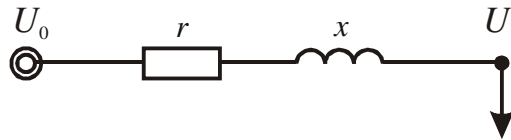


Рис. 6.1. Розрахункова схема найпростішої електричної системи

Спад напруги в розглянутій лінії електропередачі дорівнює

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{I} \cdot \underline{Z},$$

де \underline{I} – фазний струм у лінії; $\underline{Z} = r + jx$ – опір (імпеданс) ЛЕП.

Оскільки заступну схему ЛЕП складають тільки повздовжні елементи, струм по всій довжині лінії однаковий і дорівнює

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^{\text{п}}}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_0^*} = \frac{\underline{S}^{\text{к}}}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_1^*},$$

де \underline{U}_0^* , \underline{U}_1^* – спряжені комплекси напруги на шинах генератора та електроприймача; $\underline{S}^{\text{п}}$, $\underline{S}^{\text{к}}$ – потоки потужності на початку та наприкінці передачі відповідно, причому

$$\underline{S}^{\text{к}} = \underline{S}^{\text{п}} - \Delta \underline{S}, \quad (6.1)$$

де $\Delta \underline{S}$ – втрати потужності в лінії.

Останні обумовлені струмом, який протікає по електропередачі

$$\Delta \underline{S} = 3 \cdot I^2 \cdot \underline{Z}^* = \frac{P^{\text{п}2} + Q^{\text{п}2}}{U_0^2} (r - jx) = \frac{P^{\text{к}2} + Q^{\text{к}2}}{U_1^2} (r - jx). \quad (6.2)$$

Після нескладних перетворень можна отримати наступні вирази для розрахунку режиму напруги за умовами початку або кінця електропередачі:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_0 - \frac{P^{\text{п}}r - Q^{\text{п}}x}{U_0} - j \frac{P^{\text{п}}x + Q^{\text{п}}r}{U_0} = U_0 - \Delta U' - \Delta U''; \\ \underline{U}_0 &= U_1 + \frac{P^{\text{к}}r - Q^{\text{к}}x}{U_1} + j \frac{P^{\text{к}}x + Q^{\text{к}}r}{U_1} = U_1 + \Delta U' + \Delta U'', \end{aligned} \quad (6.3)$$

де $\Delta U' = \frac{P^{\text{п}}r - Q^{\text{п}}x}{U_0} = \frac{P^{\text{к}}r - Q^{\text{к}}x}{U_1}$, $\Delta U'' = \frac{P^{\text{п}}x + Q^{\text{п}}r}{U_0} = \frac{P^{\text{к}}x + Q^{\text{к}}r}{U_1}$ – дійсна (повздовжня) та уявна (поперечна) складові падіння напруги на ділянці лінії електропередачі.

У виразах (6.3) у першому випадку з віссю дійсних чисел був поєднаний вектор напруги на шинах генератора, а в другому – на шинах споживача.

Таким чином, на підставі виразів (6.3) можна однозначно визначити режимні характеристики найпростішої електричної системи.

В більшості практичних випадків постановка задачі визначення режимних характеристик електричної системи відрізняється від розглянутої. Зазвичай в якості вихідних даних задається рівень напруги на шинах джерела живлення та потужність навантаження споживача. Ця обставина вносить невизначеність у розв'язанні задачі розрахунку усталеного режиму. Дійсно, згідно з виразом (6.3) для визначення рівня напруги наприкінці ЛЕП необхідно знати величину потоку потужності на початку електропередачі. Остання, згідно з (6.1), відрізняється від потужності навантаження на величину втрат, які, у свою чергу, по виразу (6.2) залежать від невідомої напруги наприкінці передачі.

Однією з найпоширеніших методик вирішення даної задачі є спосіб, заснований на ітераційному уточненні величини втрат потужності в лінії. Останній реалізується на підставі послідовного виконання процедур наступного алгоритму.

1. Умовно припускають, що спад напруги в лінії дорівнює 0 і рівні напруги на початку та наприкінці передачі однакові: $\underline{U}_1 = U_0$.

2. За виразом (6.2) визначають втрати потужності в електропередачі та згідно (6.1) потік потужності на початку ділянки.

3. Згідно виразу (6.3) уточнюють напругу на шинах споживача.

4. Якщо зміна втрат потужності в лінії у порівнянні з попередньою ітерацією виявляється меншою певної наперед заданої інженерної точності $|\Delta \underline{S}^{(k)} - \Delta \underline{S}^{(k-1)}| \leq \varepsilon$, здійснюють перехід до процедури 5. В іншому разі управління передаються процедурі 2.

5. Виведення результатів розрахунку і вихід із програми.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схему алгоритму ітераційного розрахунку параметрів усталеного режиму найпростішої електричної системи.
2. Розробити програмний модуль ітераційного розрахунку параметрів усталеного режиму найпростішої електричної системи.
3. Реалізувати розрахунок усталеного режиму найпростішої електричної системи рис. 6.1. Параметри схеми заміщення – згідно даних варіанта табл. 6.1.
4. Дослідити збіжність ітераційного обчислювального процесу при зміні початкового наближення напруги навантажувального вузла, активної й реактивної потужності навантаження.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 6.1. Параметри ділянок схеми електричної мережі

Вар.	$Z_{01} = r_{01} + jx_{01}$	$\dot{S}_1 = P_1 - jQ_1$
0	$9,95 + j16,92$	$20 - j15$
1	$4,98 + j8,46$	$15 - j10$
2	$9,42 + j12,87$	$25 - j16$
3	$15,7 + j21,45$	$16 - j10$
4	$7,47 + j12,69$	$30 - j20$
5	$6,28 + j8,58$	$10 - j6$
6	$7,95 + j12,22$	$21 - j13$
7	$1,81 + j4,45$	$10 - j8$
8	$18,51 + j27,11$	$28 - j18$
9	$6,82 + j8,85$	$8 - j5$

Лабораторна робота №7

РОЗРАХУНКИ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗІМКНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Мета роботи: дослідити збіжність ітераційного розрахункового процесу повних та спрощених математичних моделей розімкнених електричних систем

Стислі теоретичні відомості

Розрахунки параметрів усталеного режиму розімкнених електричних систем можуть мати як самостійний інтерес, наприклад, при аналізі режимів місцевих електричних мереж, так і входять до складу рішення задачі дослідження режимів замкнених електричних систем із використанням контурних розрахункових моделей. У загальному випадку, в основі визначення режиму розімкнених електричних мереж лежать рівняння закону Ома, які дозволяють визначити рівень напруги на протилежному кінці ділянки мережі за відомим значенням потоку потужності по цій ділянці.

Величина потоку потужності по ділянці електричної мережі має три складові:

- струми навантаження споживачів;
- втрати потужності на всіх ділянках мережі, розташованих за розглянутою ділянкою щодо БП;
- зарядні потужності ЛЕП, розташованих за розглянутою ділянкою щодо БП.

Перша складова потоку потужності може бути знайдена на підставі першого закону Кірхгофа як сума потужностей навантажень всіх вузлів, які отримують живлення від розглянутої ділянки.

У свою чергу друга складова потоку потужності визначається величиною втрат потужності на всіх ділянках, по яких протікають струми навантаження вузлів схеми, які живляться від розглянутої ділянки.

Для кожної ділянки втрати потужності визначаються згідно з виразом

$$\Delta S_{ij} = \frac{P_{kij}^2 + Q_{kij}^2}{U_j^2} (r_{ij} - jx_{ij}), \quad (7.1)$$

де P_{kij} , Q_{kij} – активна й реактивна потужність, що протікає наприкінці ділянки $i-j$; U_j – рівень напруги наприкінці ділянки; $r_{ij} - jx_{ij} = \underline{Z}_{ij}^*$ – спряжена комплексна величина повного опору ділянки.

Складові потоку потужності від зарядної потужності ЛЕП визначають за першим законом Кірхгофа як потокорозподіл від додаткових на-

вантажень у вузлах схеми, обумовлених згідно «П»-подібної схеми заміщення лінії за виразом

$$Q_{Cj} = j \frac{1}{2} U_j^2 \sum_{i \in j} b_{ij}, \quad (7.2)$$

де Q_{Cj} – додаткове навантаження вузла j від зарядних потужностей ліній, суміжних з j -м вузлом; U_j – рівень напруги в j -му вузлі; b_{ij} – емнісна провідність гілки ij ; $i \in j$ означає, що підсумовування здійснюється по всіх гілках, суміжних з розглянутим j -м вузлом.

Як видно з виразів (7.1) і (7.2) друга й третя складові поточкорозподілу (від втрат потужності та від зарядних потужностей ЛЕП) визначаються на підставі даних режиму напруги у вузлах схеми. Останній, у свою чергу, залежить від результуючого поточкорозподілу по гілках схеми. Ця обставина визначає неможливість застосування прямих методів для визначення режимних параметрів розімкнених електричних систем. Для вирішення розглянутої задачі можливе використання тільки наближених ітераційних методів, метою яких є послідовне уточнення величини втрат потужності та зарядних потужностей ділянок схеми.

Для реалізації ітераційного уточнення режимних параметрів кожній ітерації обчислювального процесу використовують, так званий, метод «у два етапи». Відповідно до останнього, на першому етапі послідовно, починаючи з найбільш віддалених від балансуєчого пункту (БП) вузлів за першим законом Кірхгофа приблизно визначається поточкорозподіл по ділянках електричної мережі. Далі, на другому етапі, здійснюється прохід за схемою у зворотному напрямку від БП до найбільш віддалених вузлів. У результаті виконання цього етапу, за законом Ома здійснюється розрахунок уточнених значень рівнів напруги у вузлах схеми мережі. Розглянуті етапи обчислень повторюються циклічно до досягнення необхідної інженерної точності.

Таким чином, алгоритм розрахунку розімкненої електричної мережі складається з послідовного виконання наступних процедур:

1. Умовно припускається, що рівні напруги в усіх незалежних вузлах схеми дорівнюють номінальній напрузі мережі

$$U_j = U_n,$$

де $j = 1, 2, \dots, n$; n – кількість незалежних вузлів у схемі.

2. Для всіх незалежних вузлів схеми на підставі (7.2) визначається додаткове навантаження від зарядної потужності ЛЕП з урахуванням поточного ітераційного наближення рівня напруги в кожному вузлі. Визначається розрахункова потужність у вузлах схеми

$$S_{\text{роз}j} = S_{nj} + Q_{Cj} = S_{nj} + j \frac{1}{2} U_j^2 \sum_{i \in j} b_{ij}, \quad (7.3)$$

де S_{nj} – потужність навантаження j -го вузла.

3. Переглядаючи всі гілки схеми, починаючи з найбільш віддалених від БП, на підставі першого закону Кірхгофа визначається поточкорозподіл по ділянках схеми мережі. При цьому потік потужності наприкінці кожної ділянки визначається як сума потоків потужності на початку всіх ділянок, які отримують живлення від розглянутої гілки та розрахункової потужності вузла – кінця гілки схеми

$$\underline{S}_{k\ ij} = \underline{S}_{\text{роз } j} + \sum_{i \in j} \underline{S}_{\text{п } jk}.$$

Потік потужності на початку кожної ділянки відрізняється від потоку потужності наприкінці відповідної ділянки на величину втрат потужності

$$\underline{S}_{\text{п } ij} = \underline{S}_{k\ ij} + \Delta \underline{S}_{ij} = \underline{S}_{k\ ij} + \frac{P_{k\ ij}^2 + Q_{k\ ij}^2}{U_j^2} (r_{ij} - jx_{ij}).$$

4. Послідовно розглядають всі ділянки схеми, починаючи від БП, у напрямку до найбільш віддалених вузлів за законом Ома здійснюють уточнення рівнів напруги в усіх вузлах розімкненої схеми

$$\underline{U}_j = \underline{U}_i - \Delta \underline{U}_{ij} = \underline{U}_i - \frac{P_{\text{п } ij} r_{ij} - Q_{\text{п } ij} x_{ij}}{\underline{U}_i^*} - j \frac{P_{\text{п } ij} x_{ij} + Q_{\text{п } ij} r_{ij}}{\underline{U}_i^*} \quad (7.4)$$

5. Визначається величина сумарних втрат потужності на всіх ділянках схеми. Якщо величина останніх на поточній та попередній ітераціях відрізняється на величину, яка не перевищує заданої інженерної точності то здійснюється перехід до процедури 6. У протилежному випадку ітераційний процес повторюється, починаючи із процедури 2.

Контроль досягнення інженерної здійснюється за виразом

$$\left| \Delta \underline{S}_{\Sigma}^{(k)} - \Delta \underline{S}_{\Sigma}^{(k-1)} \right| \leq \varepsilon, \quad (7.5)$$

6. Визначається потужність БП схеми як сума потоків потужності на початку всіх головних ділянок схеми, а також сумарні втрати потужності в електричній мережі.

Таким чином, на підставі наведеного алгоритму можна з будь-яким ступенем точності визначити параметри усталеного режиму розімкненої електричної мережі.

Зазначимо, що в розрахунках режимних параметрів розімкнених електричних систем з метою спрощення можна прийняти ряд припущень.

Так, наприклад, вимоги інженерної точності дозволяють зневажити залежність величини зарядної потужності ЛЕП від дійсного режиму напруги в електричній системі. Ця обставина дозволяє визначати розрахункову потужність вузлів схеми лише один раз на попередньому етапі об-

числень, виходячи з величини номінальної напруги електричної системи. Вираз (7.3) при цьому набуває наступного вигляду

$$\underline{S}_{\text{роз } j} = \underline{S}_{\text{н } j} + j \frac{1}{2} U_n^2 \sum_{i \in j} b_{ij}. \quad (7.6)$$

Також, вимоги інженерної точності розрахунків режимних параметрів місцевих і районних розімкнених електричних систем дозволяють враховувати втрати потужності на ділянках схеми мережі у вигляді додаткових навантажень у вузлах схеми. У цьому випадку режим роботи електричної системи можна розглядати як накладення двох режимів – режиму струмів навантаження розрахункових потужностей вузлів схеми та режиму від додаткових навантажень від втрат потужності на ділянках схеми. У процесі ітераційного розрахунку послідовно уточнюється саме другий розглянутий режим у методі накладення. Алгоритм розрахунку режиму в цьому випадку складається з послідовного виконання наступних процедур.

1. Умовно припускається, що рівні напруги у всіх незалежних вузлах схеми дорівнюють номінальній напрузі мережі.

2. За виразом (7.6) визначаються розрахункові потужності всіх незалежних вузлів схеми.

3. Переглядаючи схему електричної мережі в напрямку від найбільш віддалених ділянок до БП, визначається попередній поточкорозподіл від розрахункових вузлових потужностей без урахування втрат потужності в елементах електричної системи. У цьому випадку потік потужності на кожній ділянці чисельно буде дорівнювати сумі всіх вузлових потужностей, які отримують живлення від розглянутої ділянки.

4. Для кожної з ділянок визначається наближене значення втрат потужності

$$\Delta \underline{S}_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_j^2} (r_{ij} - jx_{ij}).$$

Отримані в такий спосіб втрати потужності на ділянках електричної мережі, враховуються у вигляді додаткових навантажень вузлів згідно «П»-подібної схеми заміщення ЛЕП, як половини втрат потужності в суміжних з кожним вузлом лініях:

$$\underline{S}_{j \text{ доп}} = \frac{1}{2} \sum_{i \in j} \Delta \underline{S}_{ij}.$$

5. На підставі першого закону Кірхгофа також, як й у процедурі 3 визначається поточкорозподіл від додаткових навантажень у вузлах схеми електричної мережі. Отриманий додатковий поточкорозподіл накладається на визначений в процедурі 3 попередній поточкорозподіл, отриманий без обліку втрат потужності в схемі мережі.

6. У результаті прямого проходження за схемою електричної мережі від БП до найбільш віддалених вузлів, за законом Ома, згідно виразу (7.4), визначаються рівні напруги у вузлах схеми.

7. Розраховуються сумарні втрати потужності в електричній системі і контроль збіжності ітераційного процесу згідно виразу (7.5). Якщо критерій збіжності обчислювального процесу не виконується, управління передається процедурі 4 алгоритму та виконується наступна ітерація розрахункового процесу. У противному випадку виконується процедура 8.

8. Визначається потужність БП схеми як сума потоків потужності на початку всіх головних ділянок схеми.

Слід зауважити, що визначені в такий спосіб параметри усталеного режиму розімкненої електричної системи не враховують втрати потужності на ділянках схеми від протікання втрат потужності по цих ділянках.

Можна запропонувати ще один алгоритм розрахунку режимних параметрів розімкнених електричних систем, пов'язаний з лінеаризацією електричних навантажень у вузлах схеми. У цьому випадку на кожному кроці ітераційного процесу за поточним значенням рівнів напруги визначаються вузлові визначальні струми в усіх вузлах схеми. Далі, за першим законом Кірхгофа, визначається поточкорозподіл навантажувальних струмів по гілкам схеми та уточнюється режим напруги у всіх вузлах. Відзначимо, що розглянутий алгоритм розрахунку режимних параметрів відповідає неявному уточненню втрат потужності від протікання струмів навантаження по ділянкам схеми електричної мережі. Тому, критерієм завершення ітераційного процесу тут може виступати зміна величини струму на головній ділянці схеми на величину, меншу заданої інженерної точності.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схему алгоритму ітераційного розрахунку параметрів усталеного режиму розімкненої електричної системи.
2. Розробити й налагодити програмний модуль ітераційного розрахунку параметрів усталеного режиму розімкненої електричної системи.
3. Реалізувати розрахунок параметрів усталеного режиму розімкненої електричної мережі, схема якої представлена на рис. 7. 1. Параметри електричної системи згідно з даними варіанта табл. 7. 1.
4. Дослідити залежність збіжності ітераційного процесу від вибору початкових наближень рівнів напруги в вузлах розімкненої схеми при використанні повного та спрощеного алгоритму та побудувати відповідні графіки.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

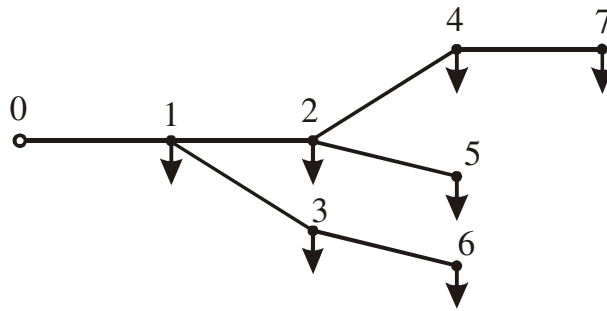


Рис. 7.1. Схема розімкненої електричної мережі

Таблиця 7.1. Параметри розрахункової схеми електричної мережі

	0	1	2	3	4
Z_{01}	$9,73 + j13,3$	$4,45 + j8,04$	$7,02 + j12,69$	$3,32 + j7,07$	$5,02 + j6,86$
Z_{12}	$2,93 + j6,24$	$5,65 + j7,72$	$3,04 + j5,05$	$4,71 + j6,44$	$2,34 + j4,99$
Z_{13}	$9,73 + j13,3$	$4,45 + j8,04$	$10,67 + j14,6$	$7,02 + j12,69$	$3,32 + j7,07$
Z_{24}	$5,02 + j6,86$	$2,93 + j6,24$	$5,65 + j7,72$	$3,04 + j5,05$	$3,51 + j6,35$
Z_{25}	$3,77 + j5,15$	$3,14 + j4,29$	$4,71 + j6,44$	$2,57 + j6,65$	$8,79 + j12,01$
Z_{36}	$1,95 + j4,16$	$6,28 + j8,58$	$2,34 + j4,23$	$6,59 + j9,01$	$12,56 + j17,2$
Z_{47}	$6,59 + j9,01$	$5,02 + j6,86$	$6,91 + j9,44$	$2,34 + j4,99$	$6,59 + j9,01$
S_1	$16 - j10$	$20 - j15$	$20 - j13$	$15 - j10$	$25 - j16$
S_2	$12 - j8$	$14 - j7$	$15 - j10$	$20 - j13$	$16 - j10$
S_3	$8 - j5$	$11 - j6$	$10 - j8$	$15 - j7$	$10 - j6$
S_4	$15 - j10$	$13 - j6$	$10 - j6$	$18 - j10$	$15 - j6$
S_5	$10 - j6$	$12 - j7$	$11 - j8$	$12 - j8$	$11 - j9$
S_6	$8 - j5$	$9 - j6$	$8 - j5$	$9 - j5$	$8 - j5$
S_7	$5 - j3$	$5 - j2$	$6 - j4$	$7 - j4$	$5 - j2$
	5	6	7	8	9
Z_{01}	$7,02 + j12,69$	$8,79 + j12,01$	$1,95 + j4,16$	$7,85 + j10,73$	$2,81 + j5,08$
Z_{12}	$5,85 + j10,58$	$4,68 + j8,46$	$8,16 + j11,15$	$1,95 + j4,16$	$6,28 + j8,58$
Z_{13}	$2,81 + j5,08$	$7,02 + j12,69$	$2,34 + j4,99$	$8,89 + j16,07$	$4,08 + j5,58$
Z_{24}	$1,87 + j3,38$	$2,81 + j5,08$	$8,42 + j15,23$	$2,81 + j5,08$	$7,85 + j10,73$
Z_{25}	$4,71 + j6,44$	$7,85 + j10,73$	$2,93 + j6,24$	$6,28 + j8,58$	$2,34 + j4,23$
Z_{36}	$14,13 + j19,3$	$3,77 + j5,15$	$7,85 + j10,73$	$5,02 + j6,86$	$8,89 + j16,07$
Z_{47}	$6,59 + j9,01$	$8,89 + j16,07$	$5,65 + j7,72$	$7,02 + j12,69$	$4,71 + j6,44$
S_1	$30 - j18$	$25 - j17$	$22 - j15$	$18 - j13$	$21 - j10$
S_2	$15 - j11$	$16 - j10$	$14 - j11$	$14 - j12$	$13 - j10$
S_3	$9 - j5$	$10 - j7$	$11 - j8$	$13 - j7$	$9 - j6$
S_4	$11 - j7$	$11 - j6$	$11 - j7$	$12 - j10$	$12 - j6$
S_5	$11 - j6$	$12 - j8$	$10 - j8$	$10 - j8$	$10 - j9$
S_6	$8 - j4$	$9 - j4$	$8 - j6$	$9 - j4$	$8 - j5$
S_7	$4 - j3$	$5 - j3$	$6 - j3$	$5 - j4$	$5 - j2$

Трикутна структура матриці коефіцієнтів СЛАР (8.3) дозволяє на етапі зворотного ходу отримати значення невідомих згідно з виразами:

$$\begin{aligned}x_n &= b_n^{(n-1)} / a_{nn}^{(n-1)} ; \\x_{n-1} &= \left(b_{n-1}^{(n-2)} - a_{(n-1)n}^{(n-2)} x_n \right) / a_{(n-1)(n-1)}^{(n-2)} ; \\&\dots \\x_1 &= \left(b_1 - a_{12} x_2 - \dots - a_{1n} x_n \right) / a_{11} .\end{aligned}$$

У загальному випадку зворотний хід методу Гауса визначається за виразом

$$x_k = \frac{b_k^{(k-1)} - \sum_{j=k+1}^n a_{kj}^{(k-1)} x_j}{a_{kk}^{(k-1)}} . \quad (8.4)$$

Таким чином, зворотний хід методу Гауса складається з послідовного виконання n кроків за виразом (8.4) у порядку, починаючи з останнього рівняння, тобто $k = n, n-1, \dots, 1$.

Отже, розв'язання СЛАР вигляду (8.1) зводиться до послідовної реалізації обчислень по виразах (8.2) і (8.4) для прямого і зворотного ходу відповідно. Відзначимо, що в процесі реалізації прямого ходу методу Гауса у виразах (8.2) індекс кроку k змінюється від 1 до $n-1$, при цьому на кожному кроці індекси елементів i та j змінюються в межах від $(k+1)$ до n у довільному порядку. У свою чергу, на етапі зворотного ходу у виразах (8.4) індекс кроку k змінюється у зворотному порядку від n до 1.

У ряді випадків рішення СЛАР застосовується модифікація методу Гауса, метод обчислень без зворотного ходу (метод Жордана-Гауса).

Такий обчислювальний процес методу Жордана-Гауса містить n кроків. Після виконання останнього кроку матриця коефіцієнтів СЛАР $\mathbf{A}^{(n)}$ буде перетворена до одиничної матриці, а вектор-стовпець вільних членів $\mathbf{b}^{(n)}$ буде розв'язком системи.

Реалізація методу Жордана-Гауса пов'язана з більшим обсягом обчислень, ніж по алгоритму методу Гауса зі зворотним ходом. Ця обставина обумовлює меншу ефективність методу Жордана-Гауса і, відповідно, відсутність самостійного практичного значення алгоритму.

Навпаки, істотне поширення одержала модифікація методу Гауса – LU -розкладання матриці коефіцієнтів. Основна ідея методу полягає в наступному.

Розв'язання серії СЛАР з однією й тією ж матрицею коефіцієнтів \mathbf{A} методом Гауса пов'язане з багаторазовими перетвореннями матриці коефіцієнтів СЛАР до верхньої трикутної матриці. Наприклад, реалізація контурної моделі розрахунків усталеного режиму роботи електричної системи пов'язана з багаторазовим розв'язанням системи контурних рів-

нянь. При цьому конфігурація електричної мережі лишається незмінною, що обумовлює незмінність матриці \mathbf{A} коефіцієнтів СЛАР. Ітераційний процес уточнення втрат потужності в електричній системі пов'язаний зі змінним у часі поточкорозподілом потужності в електричній системі по ділянках схеми, а, отже, з різними правими частинами систем контурних рівнянь. Таким чином, при розв'язанні серії СЛАР з однаковими матрицями коефіцієнтів методом Гауса виявляється необхідним здійснення багаторазових перетворень однієї й тієї ж матриці коефіцієнтів \mathbf{A} . Цієї негативної обставини можна уникнути, якщо скористатися заміною вихідної матриці \mathbf{A} на добуток двох трикутних матриць – верхньої \mathbf{U} і нижньої \mathbf{L}

$$\mathbf{A} = \mathbf{LU}.$$

При цьому на головній діагоналі \mathbf{L} -матриці завжди перебувають одиниці.

Тоді елементи матриць \mathbf{L} й \mathbf{U} можуть бути знайдені на підставі розв'язання матричного рівняння:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & & & \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \cdots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & u_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Виконавши перемноження матриць на підставі поелементного прирівнювання лівих і правих частин можна отримати систему з n^2 рівнянь:

$$\begin{aligned} u_{11} &= a_{11}; & l_{21}u_{11} &= a_{21}; & l_{n1}u_{11} &= a_{n1}; \\ u_{12} &= a_{12}; & l_{21}u_{12} + u_{22} &= a_{22}; & l_{n1}u_{12} + l_{n2}u_{22} &= a_{n2}; \\ \cdots & & \cdots & & \cdots & \\ u_{1n} &= a_{1n}; & l_{21}u_{1n} + u_{2n} &= a_{2n}; & l_{n1}u_{1n} + l_{n2}u_{2n} + \cdots + u_{nn} &= a_{nn}. \end{aligned}$$

Специфіка отриманої системи дозволяє знаходити невідомі елементи матриць \mathbf{L} й \mathbf{U} у наступному порядку.

З рівнянь, що відповідають першому рядку матриці \mathbf{A} маємо:

$$u_{1j} = a_{1j}, \text{ де } j = 1, 2, \dots, n.$$

З рівнянь, що відповідають першому стовпцю матриці \mathbf{A} , за винятком рівняння першого рядка:

$$l_{i1} = \frac{a_{i1}}{u_{11}}, \text{ де } i = 2, 3, \dots, n.$$

З рівнянь, які відповідають другому рядку матриці \mathbf{A} :

$$u_{2j} = a_{2j} - l_{21}u_{1j}, \text{ де } j = 2, 3, \dots, n.$$

З рівнянь, які відповідають другому стовпцю матриці A :

$$l_{i2} = \frac{a_{i2} - l_{i1}u_{12}}{u_{22}}, \text{ де } i = 3, \dots, n$$

І так далі. Останнім знаходиться елемент

$$u_{mm} = a_{mm} - \sum_{k=1}^{m-1} l_{mk}u_{kn}.$$

Очевидно, що всі елементи матриць L і U однозначно можуть бути обчислені з виразів:

$$u_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}u_{kj}, \text{ де } i \leq j; \quad (8.5)$$

$$l_{ij} = \frac{1}{u_{jj}} \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik}u_{kj} \right), \text{ де } i > j. \quad (8.6)$$

Ефективне використання виразів (8.5) і (8.6) може бути досягнуте за рахунок організації циклу таким чином, щоб спочатку обчислювалися елементи першого рядка матриці U , потім першого стовпця матриці L . Після цього обчислюються елементи другого рядка матриці U і другого стовпця матриці L і так далі.

Трикутна форма матриць розкладання L та U дозволяє організувати ефективно зберігання їх в єдиній області даних, що відповідає квадратній матриці розмірності $n \times n$ з алгоритмічним урахуванням одиничної головної діагоналі L -матриці.

Таким чином, СЛАР в результаті LU -розкладання може бути подано у вигляді

$$LU\mathbf{x} = \mathbf{b}.$$

Позначимо вектор-стовпець, обумовлений добутком U -матриці на вектор-стовпець вільних членів через \mathbf{y} . Тоді останнє рівняння може бути представлене у вигляді системи:

$$\begin{cases} L\mathbf{y} = \mathbf{b}; \\ U\mathbf{x} = \mathbf{y}. \end{cases}$$

Таким чином, розв'язання СЛАР із квадратною матрицею коефіцієнтів зводиться до послідовного розв'язання двох систем із трикутними матрицями коефіцієнтів.

Вирази для визначення значень елементів допоміжного вектора \mathbf{y} можуть бути отримані з першої системи рівнянь:

обумовлюють прямий хід методу Гауса, а елементи нижньої трикутної L -матриці – зворотний хід. Відзначимо, що обчислення на другому етапі здійснюються тільки лише з вільними членами СЛАР. Цю обставину можна ефективно використати при організації обчислень серії СЛАР з однаковими матрицями коефіцієнтів. У цьому випадку на попередньому етапі здійснюється розкладання матриці коефіцієнтів СЛАР на верхню та нижню трикутні матриці, а потім реалізується розв'язання серії систем лише із правими частинами СЛАР. Це дозволяє істотно скоротити обсяги обчислень при реалізації розрахунків серій СЛАР з однаковими матрицями коефіцієнтів.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схему алгоритму розв'язання СЛАР методом Гауса.
2. Розробити й налагодити програмний модуль розв'язання СЛАР.
3. Реалізувати розрахунок СЛАР з коефіцієнтами згідно варіанта по табл. 8. 1:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 = b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 = b_2; \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 = b_3; \\ a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 = b_4; \\ a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{55}x_5 = b_5. \end{cases}$$

4. Дослідити залежність витрат розрахункових ресурсів OEM (обсягів оперативної пам'яті та кількості елементарних алгебраїчних операцій) від розмірності СЛАР при використанні методу Гауса зі зворотним ходом та LU -розкладання.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 8.1. Варіанти коефіцієнтів СЛАР

	0	1	2	3	4
a_{11}	$9,95 + j16,92$	$4,98 + j8,46$	$9,42 + j12,87$	$15,7 + j21,45$	$7,47 + j12,69$
a_{12}	0	0	0	$6,28 + j8,58$	$9,56 + j16,21$
a_{13}	0	$6,18 + j8,62$	$12,56 + j17,1$	0	0
a_{14}	$6,52 + j8,88$	0	$6,68 + j8,67$	0	$9,24 + j10,17$
a_{15}	$7,47 + j12,69$	$9,95 + j16,92$	0	$12,1 + j20,54$	0
a_{21}	0	0	$9,56 + j16,21$	$7,77 + j10,99$	$6,86 + j8,86$
a_{22}	$6,68 + j8,67$	$10,36 + j13,6$	$7,54 + j16,26$	$9,95 + j16,92$	$6,18 + j8,62$
a_{23}	0	$9,24 + j10,17$	0	0	$6,38 + j8,64$
a_{24}	$9,42 + j12,87$	0	0	$10,36 + j13,6$	0
a_{25}	$7,77 + j10,99$	$16,36 + j20,5$	$15,7 + j21,45$	0	0
a_{31}	0	0	$7,24 + j10,76$	0	$7,42 + j11,93$
a_{32}	$4,98 + j8,46$	$12,56 + j17,1$	0	0	$9,42 + j12,87$
a_{33}	$16,36 + j20,5$	$9,56 + j16,21$	$9,24 + j10,17$	$6,86 + j8,86$	$6,68 + j8,67$
a_{34}	$6,28 + j8,58$	0	0	$10,26 + j15,1$	0
a_{35}	0	$6,52 + j8,88$	$4,98 + j8,46$	$6,38 + j8,64$	0
a_{41}	$7,24 + j10,76$	$7,54 + j16,26$	0	0	0
a_{42}	$15,7 + j21,45$	0	$7,42 + j11,93$	$7,47 + j12,69$	0
a_{43}	0	$6,83 + j8,38$	$9,46 + j10,75$	0	$9,95 + j16,92$
a_{44}	$9,95 + j16,92$	$6,28 + j8,58$	$6,86 + j8,86$	$4,45 + j8,04$	$7,02 + j12,69$
a_{45}	0	0	0	$7,02 + j12,69$	$3,32 + j7,07$
a_{51}	$10,26 + j15,1$	$4,45 + j8,04$	0	$4,98 + j8,46$	
a_{52}	$12,17 + j20,5$	0	0	0	$9,46 + j10,75$
a_{53}	0	0	$6,38 + j8,64$	$5,02 + j6,86$	0
a_{54}	0	$7,02 + j12,69$	$12,56 + j17,1$	0	$6,83 + j8,38$
a_{55}	$3,32 + j7,07$	$5,02 + j6,86$	$2,93 + j6,24$	$9,95 + j16,92$	0
b_1	$160 - j120$	$210 - j125$	$230 - j133$	$154 - j150$	$253 - j146$
b_2	$122 - j83$	$124 - j74$	$155 - j107$	$260 - j173$	$165 - j140$
b_3	$238 - j54$	$115 - j66$	$107 - j85$	$155 - j74$	$160 - j67$
b_4	$145 - j160$	$136 - j64$	$106 - j64$	$184 - j160$	$156 - j67$
b_5	$109 - j69$	$128 - j78$	$119 - j89$	$129 - j89$	$118 - j98$
МЕТОД	<i>Гаусса зі зворотним ходом</i>				

Таблиця 8.1. Продовження

	5	6	7	8	9
a_{11}	$9,56 + j16,21$	$6,18 + j8,62$	$6,52 + j8,88$	$7,77 + j10,99$	$5,02 + j6,86$
a_{12}	0	$7,24 + j10,76$	$16,36 + j20,5$	$7,42 + j11,93$	0
a_{13}	0	0	$7,02 + j12,69$	0	0
a_{14}	$7,54 + j16,26$	0	0	$6,52 + j8,88$	$6,68 + j8,67$
a_{15}	$9,95 + j16,92$	$9,42 + j12,87$	0	0	$3,32 + j7,07$
a_{21}	0	0	$15,7 + j21,45$	$16,36 + j20,5$	0
a_{22}	$6,83 + j8,38$	$6,38 + j8,64$	$9,24 + j10,17$	$6,83 + j8,38$	$2,93 + j6,24$
a_{23}	0	$7,47 + j12,69$	0	$9,95 + j16,92$	$4,98 + j8,46$
a_{24}	$6,68 + j8,67$	$9,46 + j10,75$	$6,18 + j8,62$	0	$5,65 + j7,72$
a_{25}	$12,17 + j20,5$	0	0	0	0
a_{31}	$6,38 + j8,64$	0	0	0	$16,36 + j20,5$
a_{32}	0	$6,86 + j8,86$	0	$7,24 + j10,76$	$15,7 + j21,45$
a_{33}	$6,86 + j8,86$	$6,28 + j8,58$	$10,26 + j15,1$	$12,17 + j20,4$	$6,52 + j8,88$
a_{34}	0	$7,42 + j11,93$	$2,93 + j6,24$	$7,54 + j16,26$	0
a_{35}	$10,36 + j13,6$	0	$6,83 + j8,38$	0	0
a_{41}	0	$10,26 + j15,1$	$9,42 + j12,87$	0	0
a_{42}	$7,77 + j10,99$	$4,45 + j8,04$	0	0	$4,45 + j8,04$
a_{43}	$12,56 + j17,1$	0	$3,32 + j7,07$	$4,45 + j8,04$	0
a_{44}	$9,46 + j10,75$	$9,95 + j16,92$	$5,02 + j6,86$	$9,46 + j10,75$	$6,18 + j8,62$
a_{45}	0	0	0	$10,36 + j13,6$	$7,24 + j10,76$
a_{51}	0	$7,77 + j10,99$	$9,56 + j16,21$	0	$7,54 + j16,26$
a_{52}	0	0	$5,65 + j7,72$	$3,04 + j5,05$	0
a_{53}	$7,42 + j11,93$	0	0	0	$10,36 + j13,6$
a_{55}	$9,24 + j10,17$	$7,47 + j12,69$	$12,56 + j17,1$	$6,28 + j8,58$	$9,95 + j16,92$
b_1	$350 - j148$	$255 - j147$	$225 - j155$	$184 - j143$	$215 - j150$
b_2	$154 - j151$	$165 - j140$	$143 - j151$	$145 - j152$	$135 - j140$
b_3	$94 - j54$	$105 - j74$	$115 - j84$	$136 - j76$	$96 - j64$
b_4	$151 - j76$	$161 - j65$	$161 - j75$	$162 - j150$	$152 - j66$
b_5	$151 - j65$	$126 - j85$	$106 - j86$	$105 - j83$	$103 - j96$
метод	<i>LU-розкладання</i>				

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9 МЕТОД РОЗРІЗАННЯ КОНТУРІВ

Мета роботи: дослідити ефективність використання методу розрізання контурів по вузлах та гілках в розрахункових моделях усталеного режиму замкнених електричних систем

Стислі теоретичні відомості

У практиці розрахунків усталених режимів замкнених електричних систем широке розповсюдження набула модифікація контурної розрахункової моделі, яка отримала назву “метод розрізання контурів”. Основна ідея методу полягає в еквівалентній заміні замкненої електричної мережі на розімкнену, режим якої цілком відповідає режиму вихідної електричної системи. При цьому можна розглядати два підходи до «розрізання» контурів.

При першому підході один з вузлів, що примикають до кожної хорди схеми електричної мережі, заміщається двома фіктивними вузлами, що не мають прямого електричного зв'язку. У цьому випадку критерієм еквівалентності режимів замкненої та розімкненої схем буде рівність векторів напруги в кожній парі фіктивних вузлів:

$$\underline{U}_{f'} = \underline{U}_{f''}. \quad (9.1)$$

Другий підхід до розрізання контурів заснований на еквівалентній заміні всіх хорд схеми електричної мережі (перемичок) на пари додаткових фіктивних навантажень у вузлах примикання перемичок таким чином, щоб різниця рівнів напруги в пунктах, до яких примикає кожна перемичка, у розімкненій схемі мережі повинна дорівнювати падінню напруги на цій перемичці:

$$\underline{U}_v^n - \underline{U}_v^k = \underline{I}_v \underline{Z}_v. \quad (9.2)$$

У будь-якому разі метою розрахунків є визначення фіктивних навантажень, що забезпечують режим роботи розімкненої схеми електричної мережі еквівалентний режиму вихідної замкненої мережі.

Зазначимо, що кількість пар фіктивних навантажень відповідає кількості хорд у схемі електричної мережі, а, отже, дорівнює кількості незалежних контурів.

Розглянемо вирішення задачі визначення режимних параметрів по першій схемі розрізання контурів по вузлам схеми.

На попередньому етапі навантаження вузлів, які розрізають, довільно розподіляється між фіктивними вузлами. Зазвичай такий розподіл здійснюється або навпіл, або таким чином, щоб все навантаження вузла, який розрізається, припадало на один з фіктивних:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{f'} &= \underline{S}_{f''} = 0,5\underline{S}_f; \text{ або} \\ \underline{S}_{f'} &= \underline{S}_f, \underline{S}_{f''} = 0. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Таким чином, отримана розімкнена схема, режим якої визначається за відомим алгоритмом.

Очевидно, що прийнятий попередній розподіл навантаження фіктивних вузлів не забезпечує рівності векторів напруги в них (9.1). Тобто, в кожній парі фіктивних вузлів буде спостерігатися нев'язка напруги, яка чисельно дорівнює

$$\underline{E}_k = \underline{U}_{f'} - \underline{U}_{f''}. \quad (9.4)$$

Нев'язки напруги при замиканні всіх контурів будуть викликати зрівняльні струми, які при відносно малої кількості контурів можуть бути визначені із системи контурних рівнянь. У розглянутому випадку останні мають вигляд

$$\underline{I}_k \underline{Z}_k + \sum \underline{I}_d \underline{Z}_{dk} = \underline{E}_k.$$

В процесі переходу до розімкненої схеми, кожен зрівняльний струм замінюється парою коригувальних струмів, рівних по величині та протилежних за знаком, які прикладають у відповідних розрізах. При запису „в потужностях”, фіктивні навантаження розрізаних вузлів на кожній ітерації уточнюються згідно з виразами:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{f'}^{(i)} &= \underline{S}_{f'}^{(i-1)} + \underline{I}_k U_n; \\ \underline{S}_{f''}^{(i)} &= \underline{S}_{f''}^{(i-1)} - \underline{I}_k U_n. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Далі знову розглядають розімкнену схему електричної мережі. Наведені процедури повторюються за ітераційною схемою кілька разів. Метою такого розрахунку є уточнення зрівняльних струмів і втрат потужності при протіканні зрівняльних струмів по ділянках схеми.

При досить великій розмірності схеми електричної системи використання прямих методів для визначення зрівняльних струмів виявляється вельми неефективним. Більш прийнятним буде залучення наближених методів до визначення зрівняльних струмів. Згідно останнім такі струми можуть бути визначені за виразом

$$\underline{I}_k = k_d \frac{\underline{E}_k}{\underline{Z}_k}, \quad (9.6)$$

де k_d – коефіцієнт гальмування ітераційного процесу, обумовлений одночасним впливом зрівняльних струмів на режим роботи електричної системи.

Алгоритм розрахунків у такий спосіб складається з послідовного виконання наступних процедур.

1. У схемі замкненої електричної мережі намічають вузли, по яких буде здійснюватися розрізання контурів. Такі вузли заміщають двома фіктивними вузлами, які не мають безпосереднього електричного зв'язку. Навантаження в кожному з фіктивних вузлів, згідно виразу (9.3), приймається рівним половині електричного навантаження дійсних вузлів.

2. По відомих алгоритмах здійснюється розрахунок режимних параметрів умовно розімкненої електричної мережі.

3. Для кожної пари фіктивних вузлів за виразом (9.4) визначають величину нев'язок напруги. Якщо для всіх пар фіктивних вузлів величина нев'язок напруги не перевищує інженерної точності розрахунків, режим роботи розімкненої схеми, отриманий у результаті виконання процедури 2 буде повністю еквівалентний режиму вихідної замкненої електричної системи. У протилежному випадку управління передається процедурі 4.

4. За виразом (9.6) визначають величину зрівняльних струмів для кожної пари фіктивних вузлів і за виразами (9.5) уточнюють величину навантажень у фіктивних вузлах схеми. Після цього виконують наступний цикл ітераційного розрахунку і управління передають процедурі 2 алгоритму.

Інший підхід до розрізання контурів, заснований на видаленні зі схеми електричної мережі хорд (або перемичок), є більш ефективним, оскільки пов'язаний з меншим обсягом обчислень еквівалентної розімкненої схеми, яка не включає у свій склад видалені перемички.

Розрахунки виконуються в цьому випадку в наступній послідовності.

На попередньому етапі для кожної перемички приймається деяке значення зрівняльного струму. Для простоти алгоритмізації обчислень зазвичай струми перемичок приймають рівними нулю.

Умовно зі всіх контурів схеми видаляють перемички, створюючи в результаті розімкнену схему електричної мережі. Для отриманої схеми по відомому алгоритму здійснюють розрахунок режимних параметрів умовно розімкненої схеми і для кожної перемички визначається різниця рівнів напруги на її кінцях

$$\Delta \underline{U}_v = \underline{U}_v^n - \underline{U}_v^k. \quad (9.7)$$

Очевидно, що визначена за виразом (9.7) різниця напруги на кінцях перемичок не буде відповідати падінню напруги від протікання попередньо заданого струму перемички, тобто не буде виконуватися умова (9.2). Нев'язка напруги при цьому може бути визначена за виразом

$$\underline{E}_k = \underline{U}_v^n - \underline{U}_v^k - \underline{I}_v \underline{Z}_v. \quad (9.8)$$

Така нев'язка напруги обумовить поправку до струму перемички

$$\Delta \underline{I}_v = k_d \frac{\underline{E}_k}{\underline{Z}_k}. \quad (9.9)$$

Таким чином, нове значення струму перемички на ітераційному процесі визначають згідно наступного виразу

$$\underline{I}_v^{(i)} = \underline{I}_v^{(i-1)} + \Delta \underline{I}_v = \underline{I}_v^{(i-1)} + k_d \frac{\underline{U}_v^{\text{н}} - \underline{U}_v^{\text{к}} - \underline{I}_v^{(i-1)} \underline{Z}_v}{\underline{Z}_k}. \quad (9.10)$$

Нове значення струму перемички вплине на зміну поточкорозподілу потужності в розімкненій схемі мережі. Для того, щоб урахувати це у вузлах, до яких примикає кожна перемичка, необхідно прикласти пару фіктивних навантажень, які відповідають току перемички і мають протилежний напрямок. При реалізації запису „в потужностях” такі фіктивні навантаження для v -ої перемички визначаються згідно виразів:

$$\begin{aligned} \underline{S}'^{\text{н}} &= \underline{I}_v \underline{U}_v^{*\text{н}}; \\ \underline{S}'^{\text{к}} &= -\underline{I}_v \underline{U}_v^{*\text{к}}. \end{aligned} \quad (9.11)$$

Далі ітераційний розрахунок повторюють. Знов розраховують режим розімкненої схеми, визначають нев'язку напруги, уточнюють струм перемички та визначають нове значення фіктивних додаткових навантажень в вузлах розмикання електричної мережі.

Критерієм завершення ітераційного процесу по кожній з наведених схем є рівність нулю (з певним ступенем інженерної точності) нев'язок напруги на всіх розрізах розглянутої схеми.

Узагальнений алгоритм визначення режимних параметрів складається у виконанні наступних процедур.

1. У замкненій вихідній схемі електричної мережі обирають місця розташування перемичок, видалення яких буде приводити до формування розімкненої зв'язної схеми електричної системи. Для кожної перемички умовно передбачають струм рівним нулю.

2. За відомими алгоритмами здійснюють розрахунок режимних параметрів розімкненої електричної мережі.

3. Для кожної перемички за виразом (9.8) визначають величину нев'язки напруги між різницею рівнів напруги на кінцях перемички та падінням напруги на самій перемичці. Якщо для всіх перемичок величина нев'язки напруги не перевершує інженерної точності розрахунків, режим роботи розімкненої схеми, отриманий у результаті виконання процедури 2, буде цілком еквівалентний режиму вихідної замкненої електричної системи. У протилежному випадку управління передають процедурі 4.

4. За виразом (9.9) визначають величину поправки до струму перемички, за виразом (9.10) – уточнені значення струмів перемичок і за виразом (9.11) – фіктивні додаткові навантаження у вузлах примикання кожної перемички. Після цього виконують наступний цикл ітераційного розрахунку і управління передають процедурі 2 алгоритму.

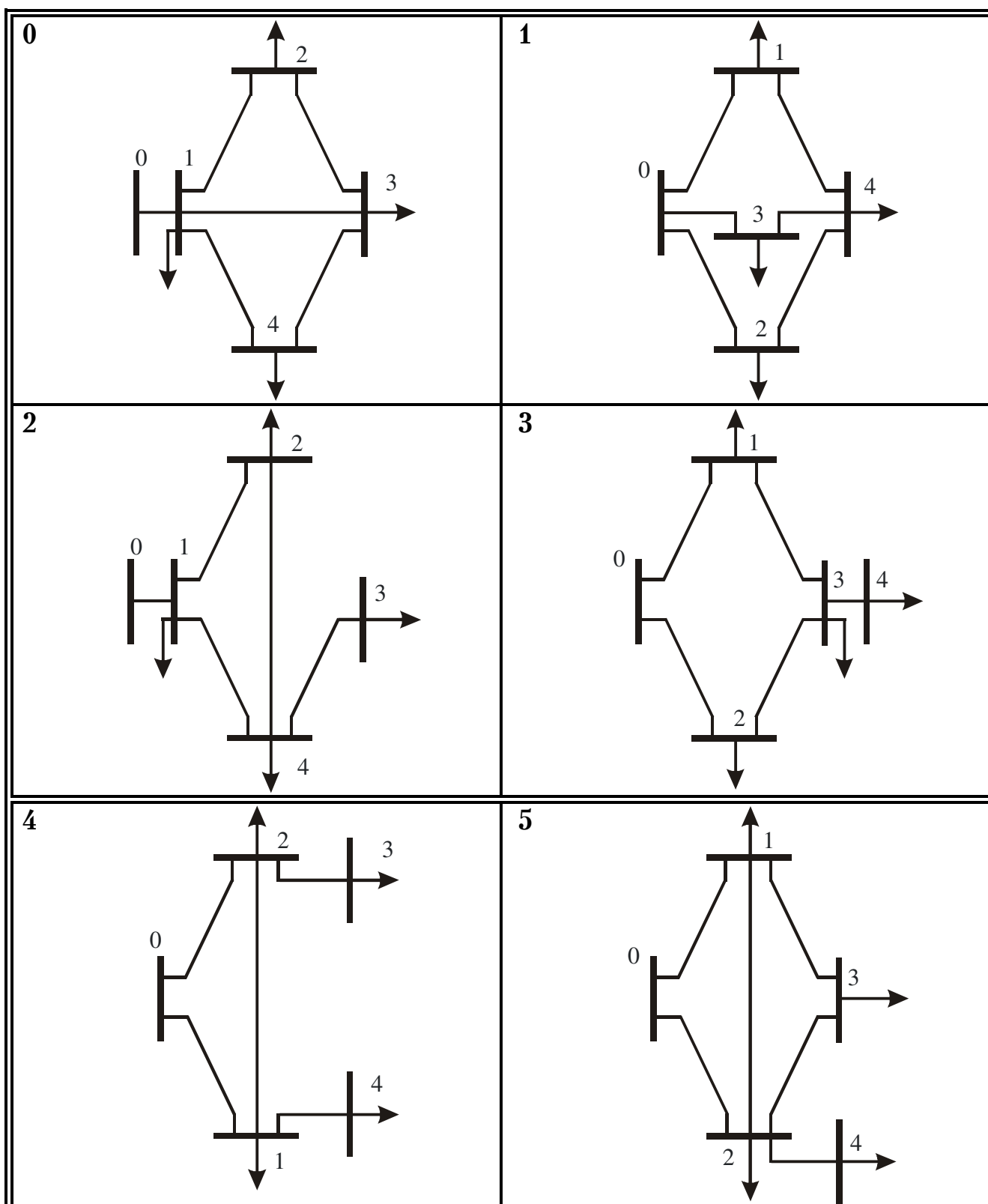
Зазначимо, що вирази (9.6) і (9.9) відповідають одній ітерації розв'язку системи контурних рівнянь по алгоритму простої ітерації з урахуванням коефіцієнта демпфірування k_d . Останній завжди перебуває в межах $0 \div 1$. Рекомендується зменшувати k_d у міру збільшення замкнутості мережі. При необхідності рекомендується виконати декілька кроків ітераційного уточнення зрівняльних струмів (струмів перемичок) за алгоритмом метода Зейделя з урахуванням взаємного впливу величин, які визначаються.

Таким чином, ітераційний розрахунок режиму роботи електричної мережі методом розрізання контурів складається з послідовного виконання двох вкладених ітераційних циклів. На зовнішньому циклі здійснюється послідовне уточнення струмів перемичок (зрівняльних струмів), а на внутрішньому циклі здійснюється розрахунок параметрів еквівалентної розімкненої схеми електричної мережі.

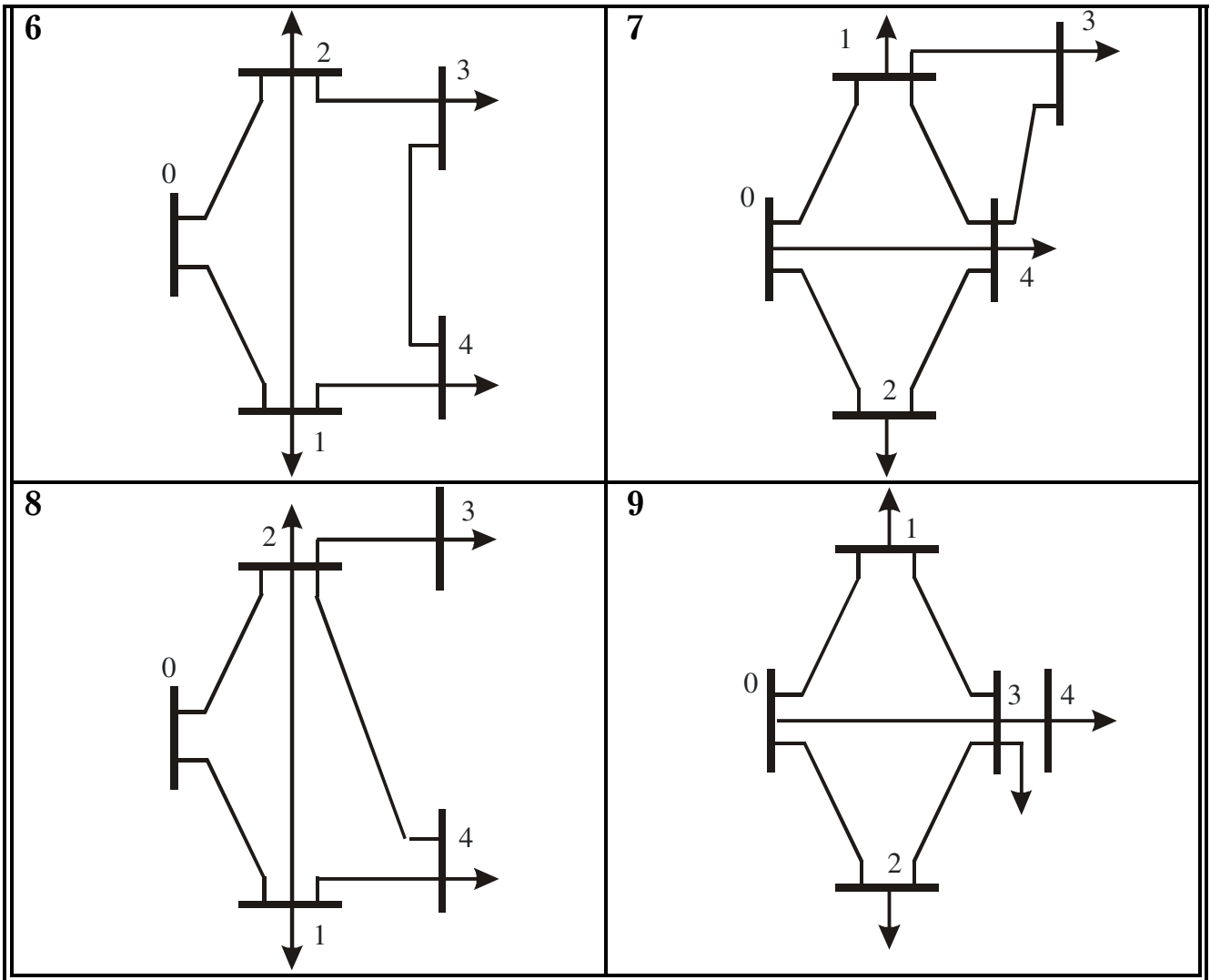
Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схему алгоритму методу розрізання контурів.
2. Розробити і налагодити програмний модуль розрахунку усталеного режиму методом розрізання контурів.
3. Реалізувати розрахунок усталеного режиму електричної мережі методом розрізання контурів згідно варіанта таблиць 9. 1, 9. 2 та 9. 3.
4. Дослідити збіжність ітераційного процесу методу розрізання контурів та порівняти модифікації методу при розрізанні по вузлах та гілках. Побудувати графіки збіжності ітераційного процесу.
5. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

Таблиця 9.1. Варіанти схем електричних мереж



Таблиця 9.1. Продовження



Таблиця 9.2. Дані про ділянки схеми електричної системи

		0	1	2	3	4
0-1	провід	АС-120	АС-120	АС-185	АС-185	АС-120
	l , км	25	15	30	20	50
0-2	провід	АС-185	АС-185	АС-120	АС-120	АС-120
	l , км	30	16	40	25	45
0-3	провід	АС-120	АС-95	АС-95	АС-95	АС-95
	l , км	22	13	20	18	34
0-4	провід	АС-95	АС-95	АС-95	АС-95	АС-120
	l , км	45	12	25	16	38
1-2	провід	АС-95	АС-120	АС-120	АС-120	АС-185
	l , км	13	8	36	12	25
1-3	провід	АС-120	АС-120	АС-95	АС-150	АС-95
	l , км	25	20	26	10	20
1-4	провід	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185	АС-120
	l , км	40	16	22	21	30
2-3	провід	АС-185	АС-185	АС-185	АС-120	АС-95
	l , км	34	10	15	11	28
2-4	провід	АС-185	АС-120	АС-120	АС-150	АС-185
	l , км	31	19	30	17	16
3-4	провід	АС-185	АС-120	АС-120	АС-150	АС-95
	l , км	31	19	30	17	16
		5	6	7	8	9
0-1	провід	АС-120	АС-120	АС-95	АС-150	АС-95
	l , км	50	22	44	30	22
0-2	провід	АС-120	АС-120	АС-120	АС-120	АС-120
	l , км	40	30	34	25	30
0-3	провід	АС-120	АС-95	АС-150	АС-55	АС-95
	l , км	45	21	55	20	18
0-4	провід	АС-120	АС-95	АС-120	АС-95	АС-95
	l , км	38	18	30	15	21
1-2	провід	АС-95	АС-150	АС-95	АС-120	АС-95
	l , км	25	15	20	10	15
1-3	провід	АС-120	АС-150	АС-120	АС-120	АС-120
	l , км	30	12	38	12	12

Таблиця 9.2. Продовження

		5	6	7	8	9
1-4	провід	АС-95	АС-150	АС-185	АС-120	АС-120
	l, км	28	10	25	12	10
2-3	провід	АС-185	АС-120	АС-185	АС-95	АС-150
	l, км	20	10	21	21	10
2-4	провід	АС-185	АС-120	АС-120	АС-185	АС-150
	l, км	18	13	15	12	15
3-4	провід	АС-95	АС-120	АС-185	АС-150	АС-150
	l, км	18	13	15	12	15

Таблиця 9.3. Дані про вузли електричної системи

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_n	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
$U_{6п}$	115	120	118	121	120	115	120	118	121	120
P_1	20	15	25	16	30	10	21	10	28	10
Q_1	-15	-10	-16	-10	-20	-6	-13	-6	-18	-6
P_2	16	12	20	8	10	15	20	18	15	15
Q_2	-10	-8	-13	-5	-8	-10	-13	-10	-10	-3
P_3	20	14	15	11	15	13	15	20	18	12
Q_3	-13	-7	-10	-6	-7	-6	-10	-15	-10	-7
P_4	25	16	20	15	12	12	16	15	11	15
Q_4	-16	-10	-13	-10	-8	-8	-10	-10	-6	-7

Лабораторна робота №10

РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ ВУЗЛОВИХ РІВНЯНЬ МЕТОДОМ ЗЕЙДЕЛЯ

Мета роботи: дослідження ефективності використання вузлових розрахункових моделей усталеного режиму замкнених електричних систем при розв'язанні системи нелінійних рівнянь методом Зейделя

Стислі теоретичні відомості

В основу вузлової розрахункової моделі усталеного режиму електричної системи покладені рівняння першого закону Кірхгофа, які відображають баланс струмів (потужностей) у вузлах схеми електричної мережі. Для довільного вузла схеми (рис.10.1) баланс струмів можна записати у вигляді

$$\sum_{j \in i} (\underline{U}_j - \underline{U}_i) \underline{y}_{ij} - \underline{U}_i \underline{y}_{i0} = \frac{\dot{S}_{ni} - \dot{S}_{ri}}{\underline{U}_i^*}, \quad (10.1)$$

де \underline{y}_{ij} – провідність між i -м та j -м вузлами; \dot{S}_{ni} – потужність електричного навантаження в i -му вузлі; \dot{S}_{ri} – потужність генераторів в i -му вузлі; $j \in i$ під знаком суми означає, що підсумовування здійснюється за усіма j -ми вузлами, суміжними з поточним вузлом i .

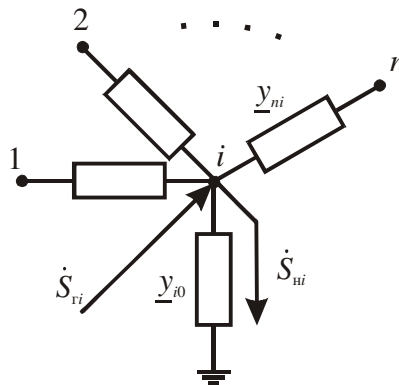


Рис. 10.1. Ілюстрація першого закону Кірхгофа для вузла схеми електричної мережі

Після елементарних перетворень вираз (10.1) набуває наступного вигляду

$$\underline{U}_i \underline{y}_{ii} + \sum_{i \in j} \underline{U}_j \underline{y}_{ij} = \frac{\dot{S}_i}{\underline{U}_i^*}, \quad (10.2)$$

де $\underline{y}_{ii} = -\left(\underline{y}_{i0} + \sum_{j \in i} \underline{y}_{ij}\right)$ – власна провідність i -го вузла; $\underline{S}_i = \underline{S}_{ni} - \underline{S}_{ri}$ – вузлова потужність i -го вузла.

Якщо рівняння (10.2) записати для усіх незалежних вузлів схеми електричної мережі, то отримана система однозначно визначить співвідношення між параметрами схеми заміщення електричної мережі, електричним навантаженням та режимом напруги у вузлах схеми.

Розв'язання такої системи дозволить визначити рівні напруги всіх незалежних вузлів схеми електричної мережі. Далі, виходячи з закону Ома, можна визначити струми, потоки потужностей на окремих ділянках та сумарні втрати потужності, тобто вирішити задачу визначення параметрів усталеного режиму електричної системи.

Зазначимо, що система рівнянь (10.2) є нелінійною, записаною у явному вигляді. Причому, ліві частини рівняння (10.2) є лінійними, а праві частини – нелійними. Фізично ця особливість системи вузлових рівнянь визначається тим, що всі параметри схеми заміщення електричної системи лінійні за винятком визначальних вузлових струмів. Останні відповідають нелінійним джерелам струму:

$$\underline{I}_i(U) = \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i^*}. \quad (10.3)$$

Іншими словами, повздовжня частина схеми заміщення лінійна, а поперечна – нелінійна.

Іноді використовується запис рівнянь вузлової розрахункової моделі у формі балансу потужностей. Такий запис може бути отриманий у разі множення рівняння (10.2) на спряжений комплекс напруги U_i^* :

$$U_i^2 \underline{y}_{ii} + U_i^* \sum_{j \in i} U_j \underline{y}_{ij} = \underline{S}_i. \quad (10.4)$$

Варто зазначити, що прямих методів розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь не існує і при вирішенні задачі визначення параметрів усталеного режиму можливе використання лише наближених ітераційних методів.

Систему нелінійних рівнянь усталеного режиму електричної системи (10.2) можна представити у вигляді

$$\underline{U}_i = -\frac{1}{\underline{y}_{ii}} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \underline{U}_j \underline{y}_{ij} - \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i^*} \right). \quad (10.5)$$

Рекурентний вираз (10.5) дозволяє організувати ітераційне уточнення режиму напруги у вузлах схеми.

Більш ефективною з погляду збіжності ітераційного обчислювального процесу є схема уточнення режиму напруги по методу Зейделя. В цьому випадку для визначення чергового наближення рівня напруги використовуються як попередні, так і вже знайдені на поточній ітерації рівні напруги у вузлах схеми. У цьому випадку вираз (10.5) набуває вигляду

$$\underline{U}_i^{(k)} = -\frac{1}{\underline{y}_{ii}} \left(\sum_{j=1}^{i-1} \underline{U}_j^{(k)} \underline{y}_{ij} + \sum_{j=i+1}^n \underline{U}_j^{(k-1)} \underline{y}_{ij} - \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i^*} \right). \quad (10.6)$$

Алгоритм розрахунку параметрів усталеного режиму в цьому випадку складається із послідовного виконання наступних процедур:

1. Для досліджуваної схеми електричної мережі визначаються значення власних та взаємних провідностей вузлів схеми.

2. Умовно припускають, що рівні напруги в усіх вузлах схеми дорівнюють номінальній напрузі електричної системи.

3. За виразом (10.6) організовується ітераційне уточнення рівня напруги в вузлах схеми. Ознакою закінчення ітераційного процесу є величина нев'язок струмів в усіх вузлах схеми, не більша за деяку наперед задану інженерну точність розрахунків

$$\max \left| \underline{U}_i^{(k)} \underline{y}_{ii} + \sum_{i \in j} \underline{U}_j^{(k)} \underline{y}_{ij} - \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i^{*(k)}} \right| \leq \varepsilon.$$

4. За законом Ома визначають токи, перетоки потужності та втрати потужності у гілках схеми.

5. Визначають потужність балансуєчого вузла та сумарні втрати потужності у схемі електричної мережі.

Порядок виконання роботи

1. Розробити блок-схему алгоритму розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь вузлової моделі усталеного режиму електричної системи методом Зейделя.
2. Розробити і налагодити програмний модуль розрахунку усталеного режиму методом Зейделя.
3. Реалізувати розрахунок усталеного режиму електричної мережі методом Зейделя згідно варіанту табл. 9. 1, 9. 2 та 9. 3.
4. Дослідити збіжність ітераційного процесу розрахунку режимних параметрів електричної системи.
5. Порівняти ефективність використання вузлових та контурних розрахункових моделей усталених режимів електричних систем.
6. Скласти звіт про виконання лабораторної роботи.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. [Текст] / С. Бернас, З. Цёк. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
2. Лежнюк П. Д. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах [Текст]: монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 120 с. – ISBN 978-966-641-390-4
3. Мельник В. П. Математичні моделі електроенергетичних систем / В. П. Мельник. – Київ: ІСДО, 1998. – 336 с.
4. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник [Текст] / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с. – ISBN 978-966-553-602-4.
5. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8.
6. Сулейманов В. М. Розрахунок і регулювання усталених режимів роботи електричних мереж енергосистем / В. М. Сулейманов. – Київ: НМК ВО, 1992. – 208 с
7. Холмский В. Г. Расчёт и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) [Текст] / В. Г. Холмский. – Москва: Высшая школа, 1975. – 280 с
8. Arrillaga J. Computer Analysis of Power Systems / Arrillaga J., Arnold C. P. – John Wiley & Sons, 1990. – 376 pp. – ISBN: 978-0-471-92760-0
9. Beaty H. W. Handbook of Electric Power Calculations / H. Wayne Beaty. – McGRAW-HILL, 2000. – 608 pp. – ISBN: 0-07-136298-3
10. Bergen A. R. Power Systems Analysis / A. R. Bergen, V. Vittal. – Prentice Hall, 1999. – 619 pp. – ISBN: 0-13-691990-1.
11. Das D. Electrical Power Systems / D. Das. – New Delhi: New Age International Publishers, 2006. – 470 pp. – ISBN: 978-81-224-2515-4.
12. Grigsby L. L. Power Systems / Leonard L. Grigsby. – CRC Press, 2012. – 556 pp. – ISBN: 978-1-4398-5633-8
13. Natarajan R. Computer-Aided Power System Analysis / Ramasamy Natarajan. – CRC Press, 2002. – 392 pp. – ISBN: 0-8247-0699-4
14. Wang X.-F. Modern Power Systems Analysis / X.-F. Wang, Y. Song, M. Irving. – Springer, 2008. – 561 pp. – ISBN: 978-1-4419-4451-1