

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання курсової роботи  
**«Оптимізація режиму трифазної системи електропостачання»**  
з навчальної дисципліни

**«СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»**

*(для здобувачів другого (магістерського)  
рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання  
зі спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2022**

Методичні рекомендації до виконання курсової роботи «Оптимізація режиму трифазної системи електропостачання» з навчальної дисципліни «Сучасні методи аналізу та оптимізації електротехнічних систем» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : В. М. Охріменко, В. А. Малярєнко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 42 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. В. М. Охріменко,  
д-р техн. наук, проф. В. А. Малярєнко

#### Рецензент

**В. Є. Плюгін**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 1 від 5 вересня 2022 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ .....	5
2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	6
2.1 Формування математичної моделі електротехнічної системи.....	6
2.1.1 Параметри схеми заміщення .....	7
2.1.2 Врахування ділянок з трансформацією .....	8
2.2 Основні поняття теорії графів .....	11
2.3 Формування розрахункової системи рівнянь .....	13
2.3.1 Формування узагальненої системи матричних рівнянь .....	13
2.3.2 Формування системи рівнянь вузлових напруг .....	13
2.3.3 Формування системи рівнянь контурних струмів .....	14
3 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	15
3.1 Вихідні дані для курсової роботи .....	16
3.2 Формування розрахункової схеми .....	17
3.3 Кодування розрахункової схеми .....	17
3.4 Визначення параметрів розрахункової схеми .....	18
3.5 Формування матриць інцидентності .....	19
3.6 Узагальнена система незалежних рівнянь .....	21
3.7 Перевірка балансу .....	22
4 ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ .....	23
4.1 Основні вимоги до оформлення пояснювальної записки .....	23
4.1.1 Структура пояснювальної записки .....	23
4.1.2 Вимоги до оформлення пояснювальної записки .....	25
4.2 Основні вимоги до оформлення презентації .....	27
4.3 Позначення документів курсової роботи.....	27
4.4 Захист курсової роботи .....	27
4.5 Оцінювання курсової роботи .....	28
6 СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	30
ДОДАТКИ .....	32

## ВСТУП

Методичні рекомендації призначені для виконання курсової роботи з дисципліни «Сучасні методи аналізу та оптимізації електротехнічних систем» здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка усіх форм навчання освітньо-професійних програм «Електротехнічні системи електропостачання» та «Магістральні електричні мережі: управління, експлуатація та розвиток». Для виконання курсової роботи навчальним планом передбачено 60 годин/2 кредити ЄКТС.

Мета виконання курсової роботи – допомогти здобувачам закріпити матеріал щодо застосування математичних методів аналізу та оптимізації електротехнічних систем для розв’язання прикладних задач у подальшому навчанні та майбутній діяльності, розуміння ролі оптимізаційних методів у функціонуванні енергетичних систем, пов’язати математику, як загальнотеоретичний курс, з її практичним застосуванням в роботі фахівця в галузі електроенергетики та надати конкретний математичний апарат для прикладних досліджень.

Курсова робота пов’язана з побудовою розрахункової схеми електричної системи шляхом створення її математичної моделі. Її виконання сприяє засвоєнню лекційного матеріалу, опанування навичками побудови математичних моделей електротехнічних систем, освоєнню основних методів дослідження й оптимізації режимів їхньої роботи.

Кожний здобувач отримує у викладача свій варіант завдання, оформлює завдання у роздрукованому вигляді на бланку «Завдання на курсову роботу» (дод. Б) де подає вихідну схему мережі за своїм варіантом та вихідні дані щодо параметрів схеми й режиму її роботи. На завданні ставлять свої підписи здобувач і керівник роботи

Методичні рекомендації містять загальну постановку завдання курсової роботи, необхідний теоретичний матеріал та приклад виконання конкретного варіанта роботи.

## 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Курсова робота (далі – КР) виконується з метою узагальнення теоретичних відомостей та практичних навичок, отриманих здобувачем під час лекційних та практичних занять. На виконання КР з навчальної дисципліни «Сучасні методи аналізу та оптимізації електротехнічних систем» у I семестрі здобувачеві відводиться 60 академічних годин.

КР виконується здобувачем самостійно. Роль викладача полягає в консультуванні з питань щодо виконання курсової роботи та контролю ходу і правильності виконання роботи.

На початку семестру здобувач має з'ясувати у викладача номер свого варіанту, уточнити вихідні дані та терміни виконання КР.

Календарний план виконання курсової роботи передбачає контроль і оцінювання результатів за змістовими модулями, перевірку викладачем виконаної роботи та її захист здобувачем.

При систематичному зриві здобувачем термінів виконання календарного плану керівник, у разі необхідності, звертається до завідувача кафедри або в деканат для прийняття відповідних заходів.

Вимоги до оформлення курсової роботи та порядок її захисту наведені у розділі 4 цих методичних рекомендацій.

## 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Формування математичної моделі електротехнічної системи

Наочним прикладом електротехнічної системи є електроенергетична система (далі – ЕЕС), яка складається з джерел, споживачів, ліній електропередачі, трансформаторів. Структуру ЕЕС та взаємозв'язок її елементів прийнято представляти графічно за допомогою принципової схеми. На рисунку 2.1 наведено приклад принципової схеми ділянки ЕЕС, яка містить дві електростанції, три навантаження, п'ять ліній електропередачі та чотири трансформатори.

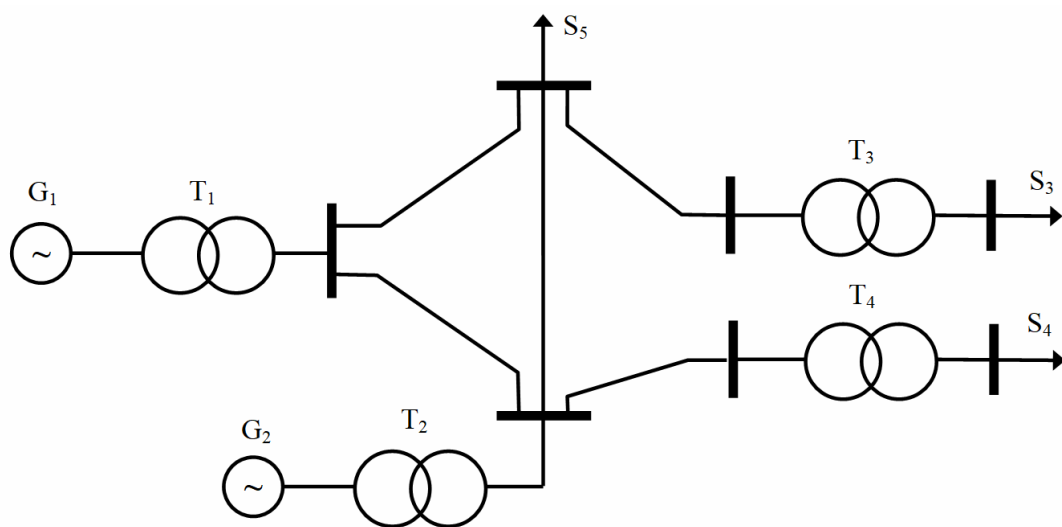


Рисунок 2.1 – Приклад фрагмента схеми електроенергетичної системи

При розгляді симетричних режимів системи трифазного змінного струму усі величини є комплексні. Для спрощення математичної моделі електричної мережі трифазного струму приймають припущення про симетричний режим роботи й схему заміщення подають для однієї фази. Для цього проводять заміну кожного елемента відповідною схемою заміщення.

Джерела електроенергії (генератори електростанцій, батареї статичних конденсаторів, синхронні компенсатори в схемах заміщення задають постійними активною та реактивною потужностями, або постійними активною потужністю і модулем напруги, або постійними модулем і кутом напруги.

Навантаження задають постійним за модулем і фазою струмом, або постійною потужністю, статичними характеристиками навантажень, постійною провідністю.

### 2.1.1 Параметри схеми заміщення

Для розрахунків усталеного режиму системи лінії електропередачі (ЛЕП) представляють П-подібною схемою заміщення (рис. 2.2, а).

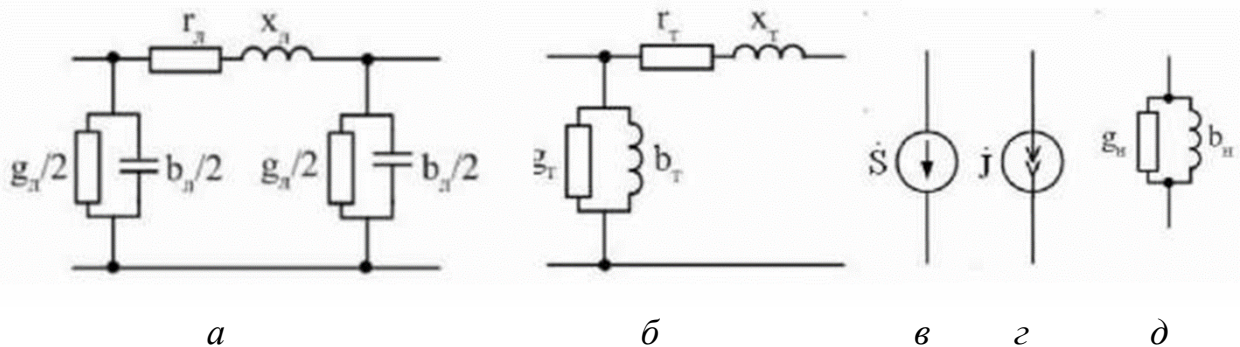


Рисунок 2.2 – Схеми заміщення елементів електричної мережі:  
 а – лінія електропередачі; б – двообмотковий трансформатор;  
 в – джерело потужності; г – джерело струму; д – навантаження

Схема заміщення ЛЕП складається із повздовжніх параметрів – активного і реактивного опорів ( $R_{л}$ ,  $X_{л}$ ) та поперечних параметрів – активної й реактивної провідностей ( $G_{л}$ ,  $B_{л}$ ). За довідковими даними, а саме – питомими опорами  $r_0$ ,  $x_0$  (Ом/км) та питомими провідностями  $g_0$ ,  $b_0$  (См/км), розраховують:

– активний  $R_{л}$  та реактивний  $X_{л}$  опори ділянки ЛЕП (Ом):

$$R_{л} = r_0 \cdot l; \quad X_{л} = x_0 \cdot l; \quad (2.1)$$

– активну та реактивну поперечні провідності лінії (См):

$$G_{л} = g_0 \cdot l; \quad B_{л} = b_0 \cdot l, \quad (2.2)$$

де  $l$  – довжина ділянки ЛЕП, км.

Необхідно враховувати клас напруги ЛЕП, за якої використовується провід. Для ЛЕП напругою 110 кВ і нижче можна знехтувати провідністю  $G_{л}$ , а для мережі 35 кВ і менше – можна не брати до уваги і провідність  $B_{л}$ . Розрахункові дані ПЛ 35–150 кВ зі сталелегатурними дротами АС за варіантами курсової роботи наведені у додатку К, таблиця К.1.

Для двообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів використовують Т-подібну схему заміщення (рис. 2.2, б). Її параметри розраховують на підставі довідкових даних за формулами:

– активний та реактивний опори:

$$R_T = \Delta P_T \cdot U_{ном}^2 / S_T^2; \quad X_T = U_P \cdot U_{ном}^2 \cdot 100 \cdot S_T; \quad (2.3)$$

– активну та реактивну поперечні провідності:

$$G_T = \Delta P_{XX} / U_{ном}^2; \quad B_T = I_{xx} \cdot S_T / 100 \cdot U_{ном}^2; \quad (2.4)$$

– коефіцієнт трансформації:

$$K_T = U_{ном} / U_{ном}^2, \quad (2.5)$$

де  $U_{ном}$ ,  $U_{ном}^H$  – номінальна напруга основного вводу обмоток високої і низької напруги трансформатора, кВ;

$U_P$  – реактивна складова спаду напруги в трансформаторі, %. При розрахунках параметрів мережі 35 кВ і вище, припускають, що  $U_P \approx U_K$ ;

$S_T$  – номінальна потужність трансформатора, МВА;

$\Delta P_{к.з}$ ,  $\Delta P_{х.х}$  – втрати потужності короткого замикання і холостого ходу, МВт;

$I_{х.х}$  – струм холостого ходу, %;

Довідкові дані трансформаторів за варіантами курсової роботи наведені у додатку К, таблиця К.2. При моделюванні визначаються й аналізуються такі параметри режиму трансформаторів:

– напруги на вході й виході трансформатора  $U_H$ ,  $U_B$ :

$$U_B = K_T \cdot U_H; \quad (2.6)$$

– струми в обмотках трансформатора:

$$I_B = (U_B - K_T \cdot U_H) Y_T; \quad I_H = K_T \cdot I_B, \quad (2.7)$$

– втрати потужності в обмотках трансформатора:

$$\Delta S_T = I_B^2 \cdot Z_T. \quad (2.8)$$

Розрахунок мережі різних номінальних напруг можна проводити двома способами.

### 2.1.2 Врахування ділянок з трансформацією

**Приведення мережі до однієї базисної напруги.** При цьому всі опори схеми заміщення приводять до однієї (базисної) напруги через коефіцієнти трансформації. Для знаходження розрахункових співвідношень для такого перерахунку звернемося до схеми рисунка 2.3.



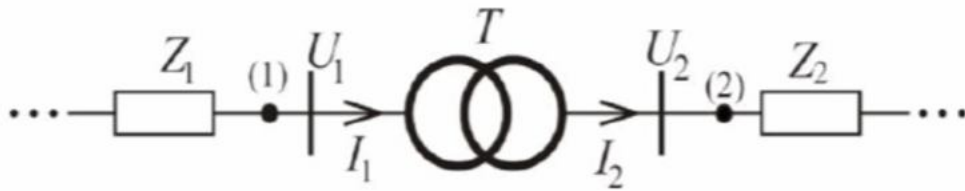


Рисунок 2.3 – Схема з'єднання трансформатора

На рисунку 2.3 трансформатор  $T$ , опори  $Z_1$  і  $Z_2$  підключені з боку первинної й вторинної обмоток трансформатора, вузли (1) і (2), що є конкретними ступенями трансформації системи. Кожен з цих ступенів може вважатися основним чи базисним. Це означає, що до нього, тобто базисного ступеня, можуть бути приведені (перераховані з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів) параметри будь-якого ступеня електричної системи. Отже, відомі нам параметри схеми для ступеня (2) можуть бути перераховані до ступеня (1), як базисного ступеня, і навпаки. Сенс операції приведення параметрів схеми до базисного ступеня полягає в тому, що вона дозволяє розрахунковим шляхом визначити справжнє значення струму саме цього ступеня. Що стосується струмів інших ступенів системи, то вони можуть бути перераховані з урахуванням наявних трансформаторів між цими ступенями й базисним ступенем, струм якого був визначений. Якщо в якості базисного приймемо ступінь (1). Коефіцієнт трансформації трансформатора при цьому визначається, як

$$K_T = U_1 / U_2 = I_2 / I_1. \quad (2.9)$$

Наприклад, при приведенні до  $U_{ном}^B$  приведені опори розраховуються за формулою

$$Z_{вх} = Z_H \cdot K_T^2, \quad (2.10)$$

де  $Z_{вх}$  – вхідний опір трансформатора при заданому його навантаженні  $Z_H$ .

Для розглянутого випадку функцію навантаження трансформатора виконує опір  $Z_2$ . Після приведення опорів до однієї напруги, мережу, що має один ступінь трансформації, можна розглядати як мережу однієї базисної напруги.

Розрахунок може бути виконаний в іменованих або у відносних одиницях.

Коефіцієнт трансформації враховується при складанні матриці вузлових провідностей з урахуванням коефіцієнта трансформації без приведення до

одного ступеня напруги.

В схему заміщення крім елементів схеми заміщення трансформатора вводяться ідеальні трансформатори. Розглянемо, як це врахувати, на прикладі поздовжньої гілки (рисунок 2.4) з провідністю  $Y_{ij}$  і ідеальним трансформатором з коефіцієнтом трансформації:

$$K_{Tij} = \frac{U'_i}{U_i}. \quad (2.11)$$

Режим цієї гілки може бути описаний системою вузлових рівнянь:

$$\begin{bmatrix} Y_{ij} & -Y_{ij} \\ -Y_{ij} & Y_{ij} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U'_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_i \\ I_j \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

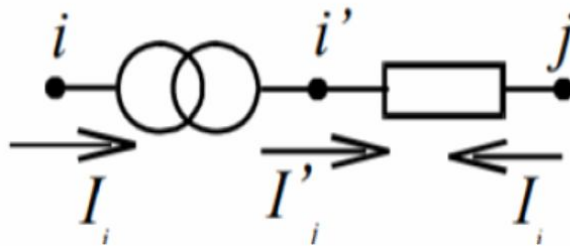


Рисунок 2.4 – Схема заміщення з ідеальним трансформатором

Зв'яжемо між собою змінні у вузлах з урахуванням того, що трансформатор ідеальний:

$$S_i = S'_i \text{ або } U_i \cdot I_i^* = U'_i \cdot I_i^*, \text{ звідки } I_i^* = \frac{U_i}{U'_i} \cdot I_i^* = I_i^* / k_{ij}.$$

$$\begin{bmatrix} Y_{ij} & -Y_{ij} \\ -Y_{ij} & Y_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{ij} \cdot U_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i / k_{ij} \\ I_j \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Перемноживши перше рівняння на  $k_{ij}$ , отримаємо:

$$\begin{bmatrix} Y_{ij} \cdot k_{ij}^2 & -Y_{ij} \cdot k_{ij} \\ -Y_{ij} \cdot k_{ij} & Y_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Таким чином, трансформаторні зв'язки можна врахувати зміною відповідних елементів матриці провідності.

Шунти трансформаторів та ЛЕП можна об'єднувати з шунтами джерел та споживачів електроенергії. Після об'єднання схем заміщення елементів у вихідній схемі електротехнічної системи отримуємо розрахункову схему.

Схеми заміщення сучасних електроенергетичних систем включають сотні вузлів та гілок. Для розрахунків їхніх режимів застосовують обчислювальні машини. Для запису рівнянь, які описують режим розрахункової схеми застосовують формалізований підхід, який базується на аналітичному опису конфігурації схем за допомогою теорії графів та матричної алгебри.

## 2.2 Основні поняття теорії графів

**Гілка** – це частина електричної мережі, у якій струм в деякий момент часу має теж саме значення. Якщо гілка містить послідовно з'єднані ЕРС та опір, вона – активна, якщо містить лише опір, це – пасивна гілка.

**Вузол** – це точка з'єднання трьох і більше гілок. Один з вузлів, зазвичай це точка приєднання потужного джерела електроенергії, обирається як балансувальний вузол з заданою напругою  $U_0$ .

Джерела струму задають спрощеним зображенням у вигляді стрілочки, яка показує, що в мережу «вливається» ззовні струм генерації або струм навантаження (з протилежним знаком). Такі струми називаються струмами ін'єкції (injection current) або струмами, що задаються.

Режимні параметри системи моделюють вектори  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{J}$ , які є векторами *незалежних змінних*. Напруги в вузлах, струми й напруги в поздовжніх гілках і ряд інших називаються *залежними змінними*:  $\mathbf{U}$  – вектор напруги в вузлах (вузлові напруги);  $\mathbf{I}$  – матриця струмів гілок;  $\Delta\mathbf{U}$  – вектор падіння напруги в гілках дерева (падіння напруги на опорах гілок).

Для аналітичного опису схеми з'єднань застосовують матриці інцидентності, елементи яких мають лише три значення 1, -1, 0.

**Перша матриця інцидентності** описує з'єднання гілок у вузлах. На перетині  $i$ -ого рядку та  $j$ -го стовпчику ставимо +1, якщо  $i$ -ий вузол є початковою вершиною  $j$ -ої гілки, ставимо -1, якщо  $i$ -ий вузол є кінцевою вершиною  $j$ -ої гілки, ставимо 0 якщо вузол  $i$  не з'єднаний з гілкою  $j$ .

$$\mathbf{M} = [M_{i,j}]. \quad (2.15)$$

**Друга матриця інцидентності** описує з'єднання гілок у контури. На

перетині  $k$ -ого рядку та  $i$ -го стовпчику ставимо  $+1$ , якщо  $i$ -а гілка входить у  $k$ -ий контур та збігається за напрямом, у протилежному випадку ставиться  $-1$ , та якщо гілка не входить у контур ставиться  $0$ .

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_{k,i}], \quad (2.16)$$

де  $k = 1, 2, \dots$  порядкові номери контурів.

**Матриця  $\mathbf{C}_a$**  – матриця коефіцієнтів розподілу вузлових струмів по дереву. Будується вона таким чином: на перетині  $i$ -ого рядку та  $j$ -го стовпчику ставимо  $+1$ , якщо у  $i$ -ій гілці протікає струм  $j$ -го вузла та збігається за направленням з напрямком гілки, якщо напрямок не збігається – ставимо  $-1$ , якщо вказаний струм у даній гілці не протікає –  $0$ .

При виключенні деяких гілок мережа перетворюється у розімкнену і схема поділяється на дерево та хорди. **Дерево** – розімкнена частина схеми, усі вузли якої мають зв'язок з балансувальним вузлом. **Хорди** – виключені гілки. Як результат поділення схеми на дерево та хорди матриці  $\mathbf{M}$  та  $\mathbf{N}$  поділяються на блоки:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}_\alpha \quad \mathbf{M}_\beta], \quad \mathbf{N} = [\mathbf{N}_\alpha \quad \mathbf{N}_\beta]. \quad (2.17)$$

Для розбиття матриць на блоки необхідно виконати умову, згідно з якою кожний контур включає лише одну хорду та стовпчики хорд повинні бути послідовними, крім того, напрямок струмів у хордах повинен збігатися з напрямком контурів.

Якщо ці умови виконані, контури називають базисними та  $\mathbf{N}_\beta = \mathbf{E}$  (одиничні матриці). Перевірка правильності запису матриць здійснюється з застосуванням топологічних властивостей графа і такий вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{N} \times \mathbf{M}^T = \mathbf{0}; \quad [\mathbf{N}_\alpha \quad \mathbf{N}_\beta] \begin{bmatrix} \mathbf{M}_\alpha \\ \mathbf{M}_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{N}_\alpha \mathbf{M}_\alpha^T + \mathbf{N}_\beta \mathbf{M}_\beta^T = \mathbf{0}; \\ \mathbf{N}_\alpha = -(\mathbf{M}_\alpha^T)^{-1} \mathbf{N}_\beta \mathbf{M}_\beta; \quad \mathbf{N}_\alpha = -(\mathbf{M}_\alpha^T)^{-1} \mathbf{M}_\beta; \quad \mathbf{N}_\alpha = -\mathbf{C}_a \mathbf{M}_\beta; \end{aligned} \quad (2.18)$$

де  $\mathbf{M}^T$  – транспонована матриця  $\mathbf{M}$ ;

$\mathbf{C}_a$  – матриця розподілу струмів, що задаються по гілках схеми.

Матриці  $\mathbf{M}$  та  $\mathbf{N}$  дозволяють записати у матричній формі рівняння стану електричної мережі.

## 2.3 Формування розрахункової системи рівнянь

### 2.3.1 Формування узагальненої системи матричних рівнянь

Узагальнена система, яка описує усталений режим, складається на основі взаємно незалежних рівнянь першого ( $\mathbf{M} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{J}$ ) та другого ( $\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}$ ) законів Кірхгофа має вигляд:

$$\begin{cases} \mathbf{M} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{J} \\ \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}_k \end{cases}, \text{ якщо } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z} \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{E}_k \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

тоді узагальнену систему можна перетворити в матричне рівняння, з якого легко знайти струми у гілках:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{F}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{F}. \quad (2.20)$$

Для випадку збігу базисного та балансувального вузлів рівняння, яке пов'язує падіння напруги у гілках та вузлові напруги виглядає так:

$$\mathbf{M}_T \cdot (\mathbf{U}_y - \mathbf{U}_0) = \mathbf{U}_v; \quad \mathbf{M}_T \cdot \Delta \mathbf{U} = \mathbf{U}_v; \quad \Delta \mathbf{U} = \mathbf{M}_T^{-1} \cdot \mathbf{U}_v. \quad (2.21)$$

Узагальнена система рівнянь має дуже великий розмір, тому для практичних розрахунків застосовують більш компактні моделі, що описують контурні струми та вузлові напруги.

### 2.3.2 Формування системи рівнянь вузлових напруг

Вузлова модель заснована на першому законі Кірхгофа. Враховуючи матрицю коефіцієнтів розподілу вузлових струмів по дереву  $\mathbf{C}$ , система рівнянь напруг у вузлах має вигляд

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 - \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_\alpha \\ \mathbf{C}_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Приймаючи до уваги, що  $\mathbf{C}_\beta = \mathbf{0}$ , а  $\mathbf{C}_\alpha = \mathbf{M}_\alpha^T \mathbf{M}_\alpha^{-1}$ , матриця струмів може бути записана таким чином:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{U}_0 - \mathbf{U}). \quad (2.23)$$

Далі знайдемо систему вузлових рівнянь:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{J} = 0, \mathbf{M} \cdot \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{U}_6 - \mathbf{U}) + \mathbf{J} = 0, \mathbf{Y}_y \cdot (\mathbf{U}_6 - \mathbf{U}) + \mathbf{J} = 0, \\ \mathbf{Y}_y \cdot \mathbf{U}_6 = \mathbf{J} - \mathbf{J}_6, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де  $\mathbf{Y}_Y = \mathbf{M} \cdot \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{M}^T$  матриця власних та взаємних провідностей вузлів, зокрема балансувального.

$\mathbf{J}_6 = \mathbf{Y}_Y \cdot \mathbf{U}_6$  додаткові струми, які відображають вплив балансувального вузла.

Якщо у схемі є активні гілки, система виглядає так:

$$\mathbf{Y}_y \cdot \mathbf{U} = \mathbf{J} - \mathbf{J}_6 - \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{E}. \quad (2.25)$$

### 2.3.3 Формування системи рівнянь контурних струмів

Контурна модель заснована на другому законі Кірхгофа:

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_b \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}_k; \quad \mathbf{I} = \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{I}_k. \quad (2.26)$$

де  $\mathbf{Z}_b$  – матриця опорів гілок.

Ці рівняння дають можливість зв'язати струми у гілках з контурними струмами. З'єднання цих рівнянь для базисної системи контурів:

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_b \cdot \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{I}_k = \mathbf{E}_k; \quad \mathbf{Z}_k = \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_b \cdot \mathbf{N}^T; \quad \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{I}_k = \mathbf{E}_k, \quad (2.27)$$

де  $\mathbf{Z}_k$  – квадратна матриця власних та взаємних опорів контурів.

Якщо, зробити припущення, що струми  $\mathbf{J}$  розподіляються по гілках дерева та те, що  $\mathbf{I}'$  та  $\mathbf{I}''$  – струми гілок при відсутності вузлових струмів та при їх наявності:

$$\mathbf{I}'' = \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{I}_k; \quad \mathbf{M} \cdot \mathbf{I}' = \mathbf{J}. \quad (2.28)$$

Для розімкнутої схеми (хорди відсутні), тому

$$\begin{aligned} (\mathbf{M}_\alpha \quad \mathbf{M}_\beta) \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_\alpha \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J}; \quad \mathbf{M}_\beta = \mathbf{0}; \quad \mathbf{I}'_\alpha = \mathbf{M}_\alpha^{-1} \mathbf{J}; \quad \mathbf{I}' = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{J}; \\ \mathbf{E}_k = \mathbf{N} \mathbf{Z}_b \mathbf{I} = \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b (\mathbf{I}' + \mathbf{I}'') = \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b \left( \begin{bmatrix} \mathbf{C}_0 \mathbf{J} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \mathbf{N}^T \mathbf{I}_k \right); \\ \mathbf{E}_k = \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b \times \begin{bmatrix} \mathbf{C}_0 \mathbf{J} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b \times \mathbf{N}^T \times \mathbf{I}_k; \quad \mathbf{Z}_k = \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b \times \mathbf{N}^T; \end{aligned} \quad (2.29)$$

то можна отримати вираз для контурних струмів, які дорівнюють струмам у хордах

$$\mathbf{I}_k = \mathbf{Z}_k^{-1} \left( \mathbf{E}_k - \mathbf{N} \times \mathbf{Z}_b \times \begin{bmatrix} \mathbf{C}_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \times \mathbf{J} \right) . \quad (2.30)$$

Якщо є інформація про контурні ЕРС, можна знайти контурні струми, які дорівнюють струмам у хордах –  $\mathbf{I}_b$ , а потім і струми гілок:

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{C}_0 \times (\mathbf{J} - \mathbf{M}_b \mathbf{I}_b) . \quad (2.31)$$

Якщо у схемі є задані струми навантаження та відсутні Е – джерела напруги, контурні струми визначаються таким чином:

$$\mathbf{I}_k = -\mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{J} = \mathbf{C}_k \cdot \mathbf{J}, \quad (2.32)$$

де  $\mathbf{C}_k = -\mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{C}_0$  .

Напруги у вузлах знайдемо з рівняння:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_b \cdot \mathbf{n} - \mathbf{C}_{at} \cdot \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{I}_a , \quad (2.33)$$

де  $\mathbf{U}_b$  – вектор-стовпчик напруги балансувального вузла,

$\mathbf{Z}_a$  – діагональна матриця опорів гілок дерева мережі,

$\mathbf{I}_a$  – струми цих гілок.

Ця система описує розрахункові схеми, де як зовнішні дії виступає лише ЕРС активних гілок.

### 3 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Алгоритм виконання курсової роботи передбачає наступну послідовність дій.

*Дія 1.* Погодити з викладачем свій варіант завдання на курсову роботу і накреслити вихідну схему електричної мережі.

*Дія 2.* Скласти розрахункову схему.

*Дія 3.* Виконати кодування розрахункової схеми. Обрати систему базисних контурів, пронумерувати вузли й гілки та обрати напрямки струмів у гілках.

*Дія 4.* Обчислити параметри елементів розрахункової схеми.

*Дія 5.* Сформувані матриці інцидентності  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$   $\mathbf{C}_a$ , поділити їх на блоки, перевірити правильність топологічної моделі.

*Дія 6.* Записати узагальнені системи рівнянь першого та другого законів Кірхгофа у матричному вигляді.

Дія 7. Сформувати вузлову або контурну модель електричної системи та провести розрахунок усталеного режиму.

Дія 8. Розрахувати баланс.

Дія 9. Дослідити зміну втрат у мережі в залежності від зміни навантаження у вузлі 2.

### 3.1 Вихідні дані для курсової роботи

Приклад вихідної схеми показаний на рисунку 3.1.

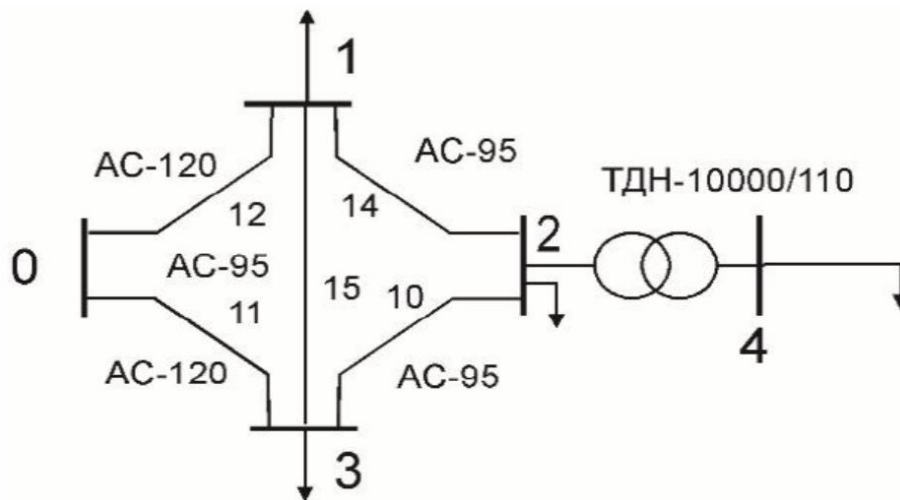


Рисунок 3.1 – Вихідна схема досліджуваної електротехнічної системи

Згідно зі своїм варіантом записати вихідні дані для розрахунків: параметри ЛЕП (додаток И, таблиця И.1) та параметри трансформаторів (таблиця К.2).

Схема на рисунку 3.1 має такі параметри схеми та режиму. Потужності у вузлах навантаження (МВА):  $S_1 = 5 + j2$ ;  $S_2 = 6 + j3$ ;  $S_3 = 4 + j2$ ;  $S_4 = 4 + j3$ . Опорний вузол – 0, напруга в опорному вузлі –  $U_0 = 114 + j0$  кВ.

Мережа має два класи напруги: 110 кВ – вузли 0, 1, 2 і 3; ділянки – 0-1, 1-2, 0-3, 1-3, 2-3; 35 кВ – вузол 4. Схема складається з п'ятих ЛЕП 110 кВ і одного понижувального трансформатора. ЛЕП виконані сталюалюмінієвими дротами марок АС-120 і АС-95, трансформатор ТДН-10000/110 потужністю 10 000 кВА, напруга обмотки ВН – 110 кВ, НН – 35 кВ.



### 3.2 Формування розрахункової схеми

Повна схема заміщення електричної мережі для розрахунків сталого режиму роботи складається зі схем заміщення її елементів, але враховуючи що напруга мережі нижче за 330 кВ, активну складову поперечної провідності можна не враховувати.

Джерела електроенергії розглядаються як джерела напруги, а споживачі – як задані струми навантаження.

Схема заміщення заданої електричної мережі показана на рисунку 3.2.

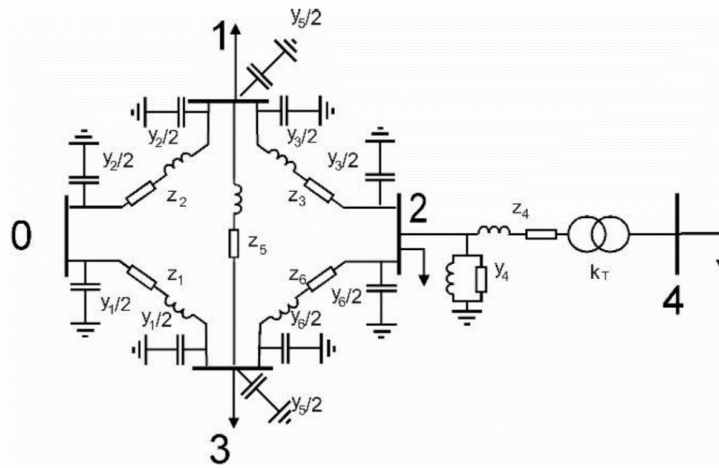


Рисунок 3.2 – Схема заміщення досліджуваної електричної мережі

### 3.3 Кодування розрахункової схеми

Далі на підставі отриманої схеми будуюмо граф. Обираємо один з можливих варіантів дерева графа та нумеруємо згідно з правилом спочатку гілки дерева (1, 2, 3, 4), потім хорди (5, 6). Задаємо напрямки струмів у гілках і напрямки обходу контурів. Маємо топологічну модель досліджуваної системи (рис. 3.3).

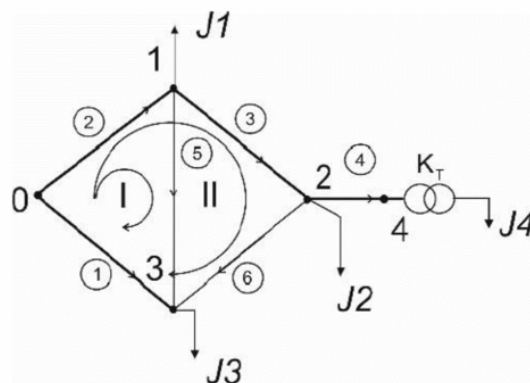


Рисунок 3.3 – Топологічна модель досліджуваної системи (орієнтований граф)

### 3.4 Визначення параметрів розрахункової схеми

Розрахуємо параметри: опори ділянок ЛЕП і трансформатора, коефіцієнт трансформації. Сформуємо вектори, які необхідні для розрахунку параметрів:

– вектор довжин ЛЕП (ребер графу)

$$\mathbf{L} = [12; 11; 14; 0; 15; 10],$$

четвертий елемент відноситься до трансформатора, заповнимо його пізніше;

– вектор питомих повздовжніх опорів ділянок

$$\mathbf{Z}_0 = [24,9+j42,3; 24,9+j42,3; 31,9+j42,9; 0; 31,9+j42,9; 31,9+j42,9];$$

– вектор питомих поперечних провідностей ділянок

$$\mathbf{Y}_0 = [j2,69e^{-4}; j2,69e^{-4}; j2,65e^{-4}; 0; j2,65e^{-4}; j2,65e^{-4}].$$

Далі, взявши до уваги формули (2.1) та (2.2), розраховуємо вектори повздовжніх опорів  $\mathbf{Z}_{лi}$  та поперечних провідностей  $\mathbf{Y}_{лi}$ :

$$Z_{лi} = (r_{oi} + jx_{oi})l_i/100; \quad Y_{лi} = (g_{oi} + jb_{oi})l_i/100. \quad (3.1)$$

Наприклад, для ділянки 0-1 (гілка 1), яка виконана проводом АС-120, маємо:

$$Z_{л1} = (24,9 + j42,3) \cdot 12/100 = 2,988 + j5,076;$$

$$Y_1 = j2,69 \cdot 10^{-4} \cdot 12/100 = j0,3228 \cdot 10^{-4}.$$

Гілки, які моделюють поперечні зв'язки кожної лінії з'єднані паралельно, тому їх можна об'єднати та врахувати як втрати або як додаткові струми (рис. 3.2):

$$J_1 = \frac{\dot{S}_1}{\dot{U}_1} + \frac{(Y_2 + Y_3 + Y_5)}{2} U_1; \quad J_2 = \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} + \left[ \frac{(Y_3 + Y_{65})}{2} + Y \right] U_2;$$

$$J_3 = \frac{\dot{S}_3}{\dot{U}_3} + \frac{(Y_1 + Y_6 + Y_5)}{2} U_3; \quad Y_4 = \frac{\dot{S}_4}{\dot{U}_4}. \quad (3.2)$$

Параметри трансформатора розраховуються за довідковими даними (додаток И, таблиця И.2):

$$S_H = 10 \text{ МВА}; U_{H.BH} = 115 \text{ кВ}; U_{H.HH} = 38,5 \text{ кВ}; U_K = 10,5 \% .$$

Номинальний коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$K_T = U_{H.BH} / U_{H.HH} = 115 / 38,5 = 2,987.$$

$$\Delta P_{K3} = 0,060 \text{ МВт}; \Delta P_{x.x.} = 0,014 \text{ МВт}; I_{x.x.} = 1,5 \% .$$

За формулами (2.3), (2.4):

$$R_T = \Delta P_{K3} \cdot U_{ном}^2 / S_{ном}^2 ; R_T = 0,06 \cdot 115^2 / 10^2 = 7,935 \text{ Ом};$$

$$X_T = (U_{x.x.} / 100) U_{ном}^2 / S_{ном}^2 ; X_T = (10,5 / 100) 115^2 / 10 = 138,8625 \text{ Ом};$$

$$g_T = \Delta P_{x.x.} / U_{ном}^2 ; g_T = 0,0814 / 115^2 = 6,1550 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_T = (I_{x.x.} \% / 100) S_{ном} / U_{ном}^2 ; b_T = (1,5 / 100) 10 / 115^2 = 1,1342 \cdot 10^{-5} \text{ См}.$$

Далі сформуємо вектори повздовжніх опорів та поперечних провідностей. Для цього на місце  $Z_{Л4}$  та  $Y_{Л4}$  підставимо  $Z_T$  та  $Y_T$ :

$$Z_{Л} = [2,99 + j5,08; 2,74 + j4,65; 4,0 + j6,01; 7,93 + j138,86; 4,71 + j6,43; 3,14 + j4,29];$$

$$Y_{Л,р} = [j0,3228 \cdot 10^{-4}; j0,2959 \cdot 10^{-4}; j0,3710 \cdot 10^{-4}; 0,0616 \cdot 10^{-4} + j0,1134 \cdot 10^{-4}; j0,3975; j0,2650 \cdot 10^{-4}].$$

Згідно з (3.2) отримаємо значення струмів у вузлах:

$$J_1 = \frac{\dot{S}_1}{\dot{U}_1} + \frac{(Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p5})}{2} U_1 ; \quad J_2 = \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} + \left( \frac{Y_{p3} + Y_{p6}}{2} + Y_{p4} \right) U_1$$

$$J_3 = \frac{\dot{S}_3}{\dot{U}_3} + \frac{(Y_{p1} + Y_{p6} + Y_{p5})}{2} U_3 ; \quad J_4 = \frac{\dot{S}_4}{\dot{U}_4} ;$$

$$J = [0,0273 - j0,0123; 0,0461 - j0,0134; 0,0364 - j0,0219; 0,0857 - j0,0571].$$

### 3.5 Формування матриць інцидентності

Згідно зі складеним орієнтованим графом (рис. 3.3) та алгоритмом формування матриць інцидентності (див. підрозділ 2.2), записуємо +1 у  $i$ -ий рядок, який відповідає вузлу « $i$ »: 1 якщо  $i$ -ий вузол є початковою вершиною гілки, -1 – якщо  $i$ -ий вузол є кінцевою вершиною гілки, 0 – якщо вузол  $j$  не з'єднаний з гілкою  $i$ .

Отримаємо матриці **M**:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{M}' = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Матриця  $\mathbf{M}'$  є частиною (submatrix) матриці  $\mathbf{M}$  (видалено рядок з опорним вузлом, останній, для отримання неособливої матриці). Якщо схема розділена на дерево і хорди, матриці інцидентності складаються з двох блоків, які стосуються хорд та гілок. З урахуванням трансформатора в 4-тій гілці, коефіцієнт на перетині відповідної гілки й рядка вузла, куди вона входить, замінюється на  $-K_T$ .

Поділимо матрицю  $\mathbf{M}$  на  $\mathbf{M}_\alpha$ , яка містить гілки дерева графа та  $\mathbf{M}_\beta$  – хорди графа:

$$\mathbf{M}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/K_T \end{bmatrix}; \mathbf{M}_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Друга матриця  $\mathbf{N}$  описує з'єднання гілок у контури. На перетині  $k$ -ого рядку та  $i$ -го стовпчику ставимо  $+1$ , якщо  $i$ -а гілка входить у контур та збігається за напрямом, у протилежному випадку ставиться  $-1$ , та якщо гілка не входить у контур -  $0$ . Якщо нумерація та напрямок обходу контурів є вірними, то  $\mathbf{N}$  є одиничною матрицею:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{N}_\alpha = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{N}_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Перевірити правильність запису можна таким чином:

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{M}^T = 0. \quad (3.6)$$

Обернення матриці  $\mathbf{M}_\alpha$  дозволяє отримати матрицю  $\mathbf{C}_0$  – матрицю розподілу струмів, що задаються по гілках схеми, а далі записати контурну матрицю  $\mathbf{N}$ . Таким чином це альтернативний спосіб перевірки.

$$\begin{bmatrix} N_\alpha & N_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_\alpha^T \\ M_\beta^T \end{bmatrix} = 0; \quad N_\alpha = -N_\beta \cdot M_\beta^T \cdot (M_\alpha^T)^{-1} = -N_\beta \cdot M_\beta^T \cdot C_0^T, \quad (3.7)$$

де  $C_\alpha = M_\alpha^{-1}$ , а  $N_\beta$  – одинична матриця.

Матриці повинні збігтися, що і спостерігаємо.

### 3.6 Узагальнена система незалежних рівнянь

Узагальнена система взаємно незалежних рівнянь першого та другого законів Кірхгофа має такий вигляд:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\mathbf{I} = \mathbf{J} \\ \mathbf{NZ}_b\mathbf{I} = \mathbf{E}_k \end{cases} \text{ або } \mathbf{A}\mathbf{I} = \mathbf{F}, \text{ де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{NZ}_b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{E}_k \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Перед створенням узагальненої системи необхідно врахувати у матриці  $\mathbf{M}$  коефіцієнт трансформації  $K_T : M(4,4) = K_T$ .

Струми у гілках дорівнюють:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_g &= \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{F} = \\ &= [0,0688 - j0,0501; 0,0669 - j0,0478; 0,0337 - j0,0197; \\ &0,0273 - j0,0182; 0,0059 - j0,0041; 0,0383 + j0,0214]. \end{aligned}$$

Перевірка цієї лінійної моделі:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{I} - \mathbf{J} = 0. \quad (3.9)$$

В цьому випадку маємо нев'язку, яка є практично нульовою.

$$(-0,0347 + j0,0347 - 0,2082 + j0,0694 - 0,1388 + j0,0694 + 0,0000 + j0,0000) \cdot e^{-16}.$$

Скориставшись формулою для вузлової провідності, знайдемо:

$$Y_u = M \cdot \text{inv}(\text{diag}(Z_v)) \cdot \text{transp}(M).$$

$$Y_u = \begin{bmatrix} 0,2472 - j0,3692 & -0,0794 + j0,1084 & -0,0741 + j0,1012 & 0,0000 + j0,0000 \\ -0,0794 + j0,1084 & 0,1909 - j0,2674 & -0,1111 + j0,1518 & -0,0012 + j0,0214 \\ -0,0741 + j0,1012 & -0,1111 + j0,1518 & 0,2713 - j0,3993 & 0,0000 + j0,0000 \\ 0,0000 + j0,0000 & -0,0012 + j0,214 & 0,0000 + j0,0000 & 0,0037 - j0,0640 \end{bmatrix}$$

Згідно (2.33)

$$\mathbf{U} = U_0 \cdot \mathbf{n} - C_{at} \cdot \mathbf{Z}_a \cdot \mathbf{I}_a,$$

або

$$U_{\pi} = \text{inv}(\text{transp}(M_a)) \cdot \text{diag}(Z_{va}) \cdot I_v;$$

$$U_u = Ub \cdot \text{ones}(4,1) - U_{vv}; \quad U_u(4) = U_k(4) / K_t;$$

$$U_u = \begin{bmatrix} 113,66 - j0,23 \\ 113,42 - j0,37 \\ 113,61 - j0,25 \\ 33,8 - j1,41 \end{bmatrix}.$$

Узагальнена система рівнянь має дуже великий розмір, тому для практичних розрахунків застосовують більш компактні контурну та вузлову моделі.

### 3.7 Перевірка балансу

Для перевірки виконується розрахунок балансу, для цього розраховуються потужності:

– генераторного вузла

$$S_0 = U_0 \cdot I_1^* + U_0 \cdot I_2^* + U_0^2 \cdot \sum(y_i / 2); \quad (3.9)$$

– потужності у вузлах навантажень

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{J}^*. \quad (3.10)$$

Втрати енергії у гілках та хордах

$$dS = \sum I_i^2 \cdot Z_{v_i}. \quad (3.11)$$

Як результат отримуємо:

$$S_0 = -15,39991 - j7,1628; \quad SN = 15,0792 + j7,1215;$$

$$dS = 0,2554 + j0,0538; \quad \delta = S_0 - (SN + dS) = -0,065 + j0,012.$$

У відсотковому відношенні ця різниця дорівнює 0,4 % від  $S_0$ . Отже, приблизний розрахунок задовольняє умови.

## 4 ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Виконання курсової роботи передбачає написання пояснювальної записки та оформлення презентації.

Пояснювальна записка формується у редакторі Word офісного пакета Microsoft Office. Обсяг пояснювальної записки становить 30–40 сторінок друкованого тексту формату А4 (297 × 210 мм), включаючи титульну сторінку, завдання, реферат, зміст, таблиці, рисунки та перелік посилань.

Презентація оформлюється у додатку PowerPoint офісного пакета Microsoft Office. Обсяг презентації складає 6–8 слайдів, включаючи титульну сторінку і висновки.

### 4.1 Основні вимоги до оформлення пояснювальної записки

#### 4.1.1 Структура пояснювальної записки

Пояснювальна записка має включати наступні елементи:

- титульна сторінка;
- реферат;
- зміст;
- перелік умовних позначень, символів і скорочень;
- вступ;
- основна частина;
- загальні висновки;
- перелік посилань.

В основній частині рекомендується розкрити такі питання:

#### *1. Актуальність питання та його зв'язок з прикладними задачами.*

Пункт присвячено обґрунтуванню актуальності розроблення теми курсової роботи. При цьому рекомендується спиратися на останні дослідження вітчизняних та закордонних науковців у визначеній галузі.

Також необхідно вказати, яким чином розроблення заданого завдання допоможе із розв'язанням практичних задач електроенергетичної галузі України.

#### *2. Критичний аналіз стану питання.*

У пункті подається короткий опис відомих способів моделювання, моделей тощо. При необхідності повинні наводитися описи методик, схеми пристроїв, діаграми, графіки, що пояснюють принцип їх роботи, структурні

схеми моделей, математичні залежності тощо. Стосовно кожного з відомих рішень повинні бути зроблені висновки відносно їх придатності для розв'язання питання. В результаті аналізу необхідно прийняти одне з рішень у якості базового або визначити, які елементи відомих рішень можуть бути застосовані під час досліджень.

При виконанні цього пункту рекомендується використовувати літературні джерела не старше 7–10 років, включаючи підручники і навчальні посібники, науково-технічні статті, рукописи, наукові монографії, описи патентів тощо. На всі літературні джерела мають бути посилання у переліку посилань.

### *3. Мета та задачі дослідження.*

Формулюється мета роботи та задачі, розв'язання яких приведе до досягнення мети.

### *4. Обґрунтування математичної моделі об'єкта досліджень.*

Для об'єкта дослідження необхідно скласти схему заміщення. Наводяться математичні залежності, що описують об'єкт дослідження відповідно до заступної схеми. Для кожної залежності мають бути розшифровані змінні, що використовуються. Необхідно пояснити сутність математичних залежностей. При обґрунтуванні математичної моделі необхідно спиратися на найновіші дослідження в заданому напрямку, наводити посилання на літературу, яка використовується. Також необхідно докладно обґрунтувати спрощення і припущення, що приймаються при побудові моделі.

### *5. Вибір метода ідентифікації та визначення значень параметрів моделі.*

Необхідно обрати метод визначення значень параметрів математичної моделі. В більшості випадків допускається скористатися відомим методом для обчислення значень параметрів заступної схеми, який необхідно докладно проаналізувати в пояснювальній записці. Також в тексті мають бути наведені докладні розрахунки з чітко визначеними результатами обчислень. При цьому бажано використовувати можливості табличного процесора Excel.

### *6. Подання результатів розрахунків режиму досліджуваної системи.*

Результати розрахунків параметрів моделі системи та параметрів режимів її роботи, як приклад повністю наводяться для однієї точки (вузла, гілки, параметра) і у повному обсязі подаються у вигляді таблиць.

### *7. Аналіз результатів та формулювання пропозицій щодо підвищення ефективності функціонування об'єкта дослідження.*

Отримані результати мають бути проаналізовані, на основі чого необхідно сформулювати практичні рекомендації з підвищення ефективності функціонування об'єкта дослідження.



#### 4.1.2 Вимоги до оформлення пояснювальної записки

Структура та оформлення пояснювальної мають відповідати нормам [8]. Текст пояснювальної записки має бути написаний чітко та грамотно з використанням текстового редактора Microsoft Word (шрифт Times New Roman, розмір 14, міжрядковий інтервал 1,5, відступ першого рядка – 1,25 см, відступи між абзацами відсутні). Друкується робота на одній стороні аркушів формату А4 (210 × 297 мм) з основним написом. У таблиці 4.1 роз'яснюється, які формати основного напису застосовуються для різних елементів пояснювальної записки. Зразки основних написів наведені у додатку Г.

Титульна сторінка КР оформлюється згідно з додатком А, завдання на КР – згідно з додатком Б, реферат – згідно з додатком В. Сторінки пояснювальної записки слід нумерувати арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації по всьому тексту.

Заголовки структурних елементів і розділів необхідно розміщувати посередині рядка і друкувати великими літерами без крапки в кінці. Заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів необхідно починати з абзацу. Не можна розміщувати заголовок у нижній частині аркуша, якщо після нього залишається тільки один рядок тексту. Скорочення й перенесення слів у заголовках не допускається.

Таблиця 4.1 – Застосування форматів основного напису при оформленні пояснювальної записки

Елемент пояснювальної записки	Розмір основного напису, мм
титульна сторінка	без основного напису
завдання	без основного напису
реферат	без основного напису
зміст	перша сторінка – 185 × 40, наступні – 185 × 15
перелік умовних позначень, символів і скорочень	185 × 15
вступ	185 × 15
основна частина	перша сторінка – 185 × 40, наступні – 185 × 15
загальні висновки	185 × 15
перелік посилань	185 × 15
додатки	185 × 15

Розділи, підрозділи, пункти та підпункти нумерують арабськими цифрами. Номер підрозділу складається з номера розділу та порядкового номера підрозділу, розділених крапкою, наприклад, 1.1, 1.2 і т. д. Номер пункту

складається з номера розділу, номера підрозділу (якщо він є) і порядкового номера пункту, розділених крапками. Назви таких структурних елементів як «РЕФЕРАТ», «ЗМІСТ», «ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ», «ВСТУП», «ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ», «ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ» не нумерують.

Ілюстрації й таблиці необхідно розміщувати безпосередньо після тексту, в якому вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. На всі ілюстрації та таблиці повинні бути посилання у тексті. Всі ілюстрації, які виносяться на захист, необхідно навести в основній частині КР чи в додатках. Креслення, рисунки, графіки, схеми, діаграми повинні відповідати вимогам чинних стандартів [10].

Назви рисунків і таблиць нумерують арабськими цифрами в межах кожного розділу, наприклад: «Рисунок 1.2 – Розрахункова схема електричної мережі» – другий рисунок першого розділу, «Таблиця 1.1 – Параметри вихідної схеми» – перша таблиця першого розділу тощо. Назви рисунків розміщують у центрі під рисунками, а назви таблиць – з лівого боку над таблицями з абзацним відступом. Посилання на рисунки та таблиці здійснюється наступним чином: «... на рис. 1.2 ...», «... у табл. 1.3 ...».

Формули та рівняння наводять посередині рядка, з відступом зверху та знизу одного рядка. Номер формули або рівняння складається з номера розділу та їх порядкового номера, розділених крапкою. Номер ставлять у дужках напроти формули у крайньому правому положенні рядка. Наприклад, (2.1) – перша формула другого розділу. Пояснення символів та числових коефіцієнтів у формулах слід наводити безпосередньо під формулою, у тій самій послідовності, у якій вони подані у формулі. Перший рядок пояснення починають словом «де» без двокрапки. Пояснення кожного символу необхідно починати з нового рядка.

Додатки розміщують у порядку посилань на них у тексті записки. Кожен додаток повинен починатися з нового аркуша. Позначають додатки відповідною літерою української абетки, крім **Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь**. Наприклад, додаток А, додаток Б і т. д. Єдиний додаток позначається як додаток А. Додатки повинні мати спільну з рештою матеріалів пояснювальної записки наскрізну нумерацію аркушів.

Перелік посилань на літературні джерела оформлюють відповідно до вимог стандарту [9] і наводять з нового аркуша в порядку їх згадування в тексті пояснювальної записки. Приклад оформлення переліку посилань наведено у додатку Д.

## 4.2 Основні вимоги до оформлення презентації

Презентація КР супроводжує публічну доповідь роботи та має ілюструвати мету, основний зміст і основні результати роботи. Виконується в програмі Microsoft Power Point.

Презентація має включати титульний аркуш, необхідні математичні залежності, схеми моделей, математичні рівняння, графіки, висновки що ілюструють доповідь.

## 4.3 Позначення документів курсової роботи

Позначення сторінок пояснювальної записки та аркушів формату А1 слід виконувати за такою схемою:

КР ОРТСЕ. 141. X. XX. XX. XX,  
*a b c d e f*

де *a* – абревіатура назви курсової роботи;

*b* – шифр спеціальності;

*c* – форма навчання (1 – денна, 3 – заочна);

*d* – рік розробки (останні дві цифри);

*e* – дві останні цифри номера залікової книжки;

*f* – шифр документа (вид та тип схеми, пояснювальна записка).

Види схем що позначаються такими літерами: Е – електричні; Г – гідравлічні; П – пневматичні; Х – газові (крім пневматичних); К – кінематичні; В – вакуумні; Р – енергетичні; С – комбіновані; Є – розподілу.

Типи схем цифрами: 1 – структурні; 2 – функціональні; 3 – принципів; 4 – з'єднань (монтажні); 5 – підключень; 6 – загальні; 7 – розташування; 0 – об'єднані.

Пояснювальна записка позначається ПЗ.

## 4.4 Захист курсової роботи

Курсова робота захищається перед комісією у складі двох викладачів кафедри. До захисту допускаються здобувачі, що виконали пояснювальну записку та графічну частину в повному обсязі відповідно до вимог. Графік захистів доводиться до відома здобувачів заздалегідь. На захист здобувач має

представити:

- залікову книжку;
- прошиту пояснювальну записку;
- презентацію роботи.

Для усної доповіді здобувачеві надається **до 5 хвилин**. Доповідь здобувача має складатися із трьох частин: вступу, основної частини й висновку.

У вступі відзначається актуальність теми роботи, дається загальна характеристика об'єкта дослідження, аналіз стану проблеми та формулюються основні задачі, які вирішувалися у роботі.

В основній частині доповіді в стислій формі необхідно викласти результати моделювання за основними розділами роботи. Основна частина доповіді супроводжується ілюстраціями наведеними у презентації.

У заключній частині доповіді подаються загальні висновки щодо підвищення ефективності функціонування об'єкта дослідження.

Після доповіді здобувач відповідає на запитання членів комісії.

Комісія оцінює виконану роботу на підставі представлених пояснювальної записки та презентації, доповіді та відповідей здобувача на запитання.

#### **4.5 Оцінювання курсової роботи**

Основними критеріями, що характеризують рівень компетентності здобувача при оцінюванні результатів виконання КР, є:

- виконання завдання на КР в повному обсязі;
- глибина і характер знань навчального матеріалу за змістом навчальної дисципліни, що міститься в основних та додаткових рекомендованих літературних джерелах;
- вміння аналізувати явища, які досліджувалися, у їх взаємозв'язку і розвитку;
- характер відповідей на поставлені питання (чіткість, лаконічність, логічність, послідовність тощо);
- вміння застосовувати теоретичні положення під час розв'язання практичних задач;
- вміння аналізувати правдивість одержаних результатів.

Розподіл балів при оцінюванні КР наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розподіл балів оцінювання виконання курсової роботи

Види роботи та засоби контролю	Розподіл балів
1	2
<i>Змістовий модуль 1</i>	20
1.1 Сформувати топологічну модель заданого варіанта структури електротехнічної системи. Перевірка топологічної моделі	10
1.2 Скласти та розв'язати рівняння сталого режиму електротехнічної системи. Перевірка коректності рівнянь і результатів розрахунку	10
<i>Змістовий модуль 2</i>	20
2.1 Скласти математичну модель оптимізації режиму електротехнічної системи. Перевірка адекватності математичної моделі	10
2.2 Розрахувати параметри системи за критерієм оптимальних режимів електротехнічної системи. Перевірка коректності розрахунку оптимальних параметрів системи	10
<i>Змістовий модуль 3</i>	20
3.1 Проаналізувати результати розрахунку сталого режиму за наявності вихідних параметрів електротехнічної системи. Перевірка повноти й коректності результатів аналізу	8
3.2 Проаналізувати результати розрахунку сталого режиму за наявності оптимальних параметрів електротехнічної системи. Перевірка повноти й коректності результатів аналізу	8
3.3 Порівняти результати розрахунків параметрів та режимів. Сформувати висновки щодо їх енергоефективності системи з оптимальними параметрами. Перевірка обґрунтованості висновків	4
<i>Підсумковий контроль – публічний захист курсової роботи</i>	40
ПК-1. Оформлення тексту розрахунково-пояснювальної записки згідно з вимогами	10
ПК-2. Оформлення ілюстрацій у розрахунково-пояснювальній записці	4
ПК-3. Презентація	10
ПК-4. Захист курсової роботи	16
<i>Всього за модулем виконання курсової роботи</i>	100

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

### Основні

1. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посіб. / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 183 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : [https://eprints.kname.edu.ua/55309/1/2019\\_49Н\\_ПЕЧ\\_НАВЧ\\_ПОСІБНИК\\_2019\\_09\\_23.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/55309/1/2019_49Н_ПЕЧ_НАВЧ_ПОСІБНИК_2019_09_23.pdf), вільний).

2. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, Т. А. Мазур. – Львів : Вид-во Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.

3. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики : навч. посіб. / В. С. Перхач, за ред. Г. І. Денисенка. – Львів : Вища школа, 1982. – 380 с.

4. Маліновський А. А. Математичні задачі систем енергозабезпечення та їх алгоритмізація : навч. посіб. / А. А. Маліновський, А. З. Музичак ; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 264 с.

5. Штельма О. М. Оптимізаційні методи та моделі : конспект лекцій / О. М. Штельма ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 43 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : [https://eprints.kname.edu.ua/56334/1/2020\\_печ\\_145Л\\_Лекции\\_ОММновіе.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/56334/1/2020_печ_145Л_Лекции_ОММновіе.pdf), вільний).

6. Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Застосування обчислювальної техніки в електроенергетиці» (для студентів 2 і 3 курсів денної та 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : І. Г. Абраменко, А. О. Карюк. – Харків : ХНУМГ, 2015. – 36 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : [https://eprints.kname.edu.ua/39244/1/\(2014\\_печ\\_193М\\_ПЗ\\_ЗОТЕ\).pdf](https://eprints.kname.edu.ua/39244/1/(2014_печ_193М_ПЗ_ЗОТЕ).pdf), вільний).

### Додаткові

7. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / Свами М., Тхуласираман К. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 455 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/206364/mod\\_resource/content/2/Grafy,%20sieti%20i%20alghoritmy%20-%20Svami%20M.,%20Tkhulasiraman%20K\\_.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/206364/mod_resource/content/2/Grafy,%20sieti%20i%20alghoritmy%20-%20Svami%20M.,%20Tkhulasiraman%20K_.pdf), вільний).

8. ДСТУ 3008–2015 Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання. – [Чинний від 2017–07–01]. – Київ : ДП «УкрНДЦ», 2016. – 26 с.

9. ДСТУ 8302:2015 Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 17 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : <https://library.khntusg.com/sites/default/files/2021-11/dstu-8302-2015.ua/.pdf>, вільний).

10. Методичні рекомендації до оформлення магістерської роботи (для магістрів денної та заочної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Д. М. Калюжний, П. П. Рожков, С. Е. Рожкова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 40 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : <https://eprints.kname.edu.ua/54058/1/2018 печ. 509М МВ до МАГ.pdf>, вільний).

ДОДАТОК А  
Зразок оформлення титульної сторінки курсової роботи

---

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

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та  
транспортної інфраструктури

Кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст

**Пояснювальна записка**

до курсової роботи «Оптимізація режиму трифазної  
системи електропостачання» з навчальної дисципліни  
«Сучасні методи аналізу та оптимізації електротехнічних систем»

Виконав: студент групи \_\_\_\_\_

Іванов І. І.

(підпис)

(ПП)

Керівник: доц. кафедри СЕтаЕМ

Петров П. П.

(підпис)

(ПП)

Харків – 202\_



**ДОДАТОК Б**  
**Зразок оформлення завдання на курсову роботу**

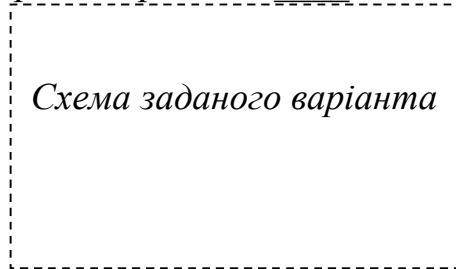
---

**ЗАВДАННЯ**  
на курсову роботу студенту

---

(ПІП студента)

1. Схема електричної мережі, варіант № \_\_\_\_\_ ,



2. Дані по ділянкам мережі, варіант № \_\_\_\_\_  
*Перелік даних.*

3. Дані по трансформаторам і навантаженням, варіант № \_\_\_\_\_  
*Перелік даних.*

4. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапу курсової роботи	Строк виконання етапу	Примітки

Студент \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )  
(підпис) (прізвище, ініціали)

ДОДАТОК В  
Зразок оформлення реферату курсової роботи

---

**РЕФЕРАТ**

Пояснювальна записка до курсової роботи: 35 сторінок, 12 рисунків, 5 таблиць, 6 посилань, 3 додатки.

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,  
МАТРИЦЯ ІНЦИДЕНТНОСТІ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ, СХЕМА  
ЗАМІЩЕННЯ, ТОПОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – електрична мережа за напругами 110 та 35 кВ у складі 4-х силових трансформаторів та 5-ти ЛЕП.

Мета роботи – дослідження режиму електричної мережі, визначення оптимального режиму за критерієм мінімальних втрат електричної енергії.

Методи дослідження – моделювання режиму роботи електричної мережі з використанням теорії графів, теорії матриць, закону Ома та законів Кірхгофа.

Для заданого варіанту вихідних даних складено схему заміщення, топологічну модель, розраховані параметри топологічної моделі. Розраховані параметри сталого режиму електричної мережі, визначені оптимальні параметри сталого режиму за критерієм мінімальних втрат електричної енергії.

ДОДАТОК Г  
Зразок форм основного напису

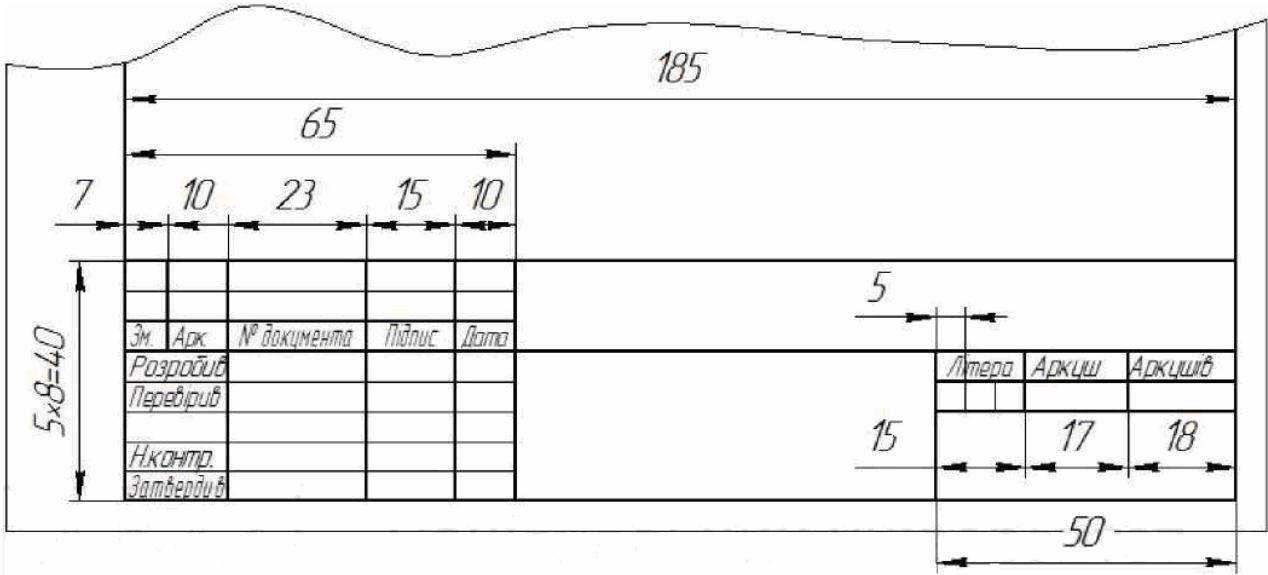


Рисунок Г.1 – Форма основного напису 185 × 40 мм

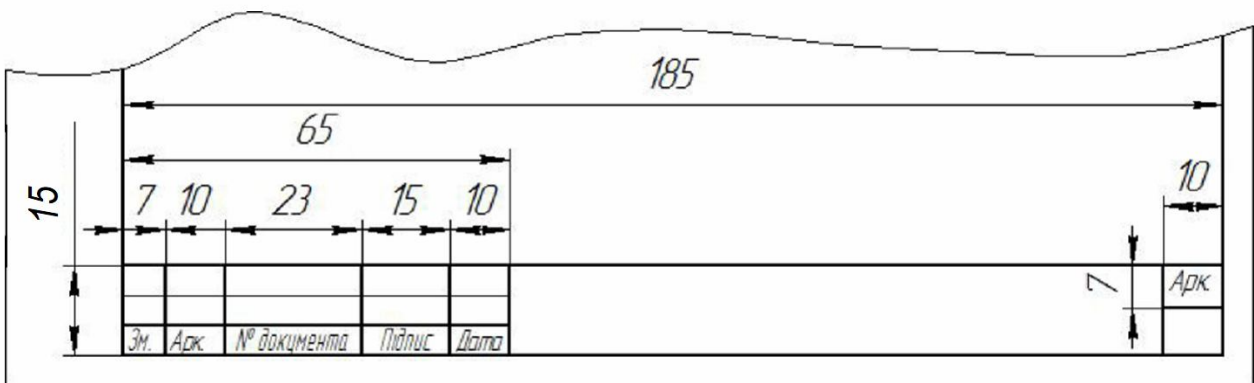


Рисунок Г.2 – Форма основного напису 185 × 15 мм

ДОДАТОК Д  
Приклад оформлення переліку посилань

---

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посіб. / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 183 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу : [https://eprints.kname.edu.ua/55309/1/2019\\_49H\\_PЕЧ\\_НАВЧ\\_ПОСІБНИК\\_2019\\_09\\_23.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/55309/1/2019_49H_PЕЧ_НАВЧ_ПОСІБНИК_2019_09_23.pdf), вільний).
2. Штельма О. М. Математичне моделювання і оптимізація : конспект лекцій / О. М. Штельма ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 56 с.
3. Маліновський А. А. Математичні задачі систем енергозабезпечення та їх алгоритмізація : навч. посіб. / А. А. Маліновський, А. З. Музичак ; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 264 с.
4. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики : навч. посіб. / В.С. Перхач, за ред. Г. І. Денисенка. – Львів : Вища школа, 1982. – 380 с. (Бібліотека ХНУМГ ім. О. М. Бекетова).
5. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов : учеб. пособ. для электроэнерг. спец. вузов / под ред. Веникова В.А. – М. : Высш. школа, 1973. – 318 с.

ДОДАТОК Ж

Вихідні дані за варіантами курсової роботи

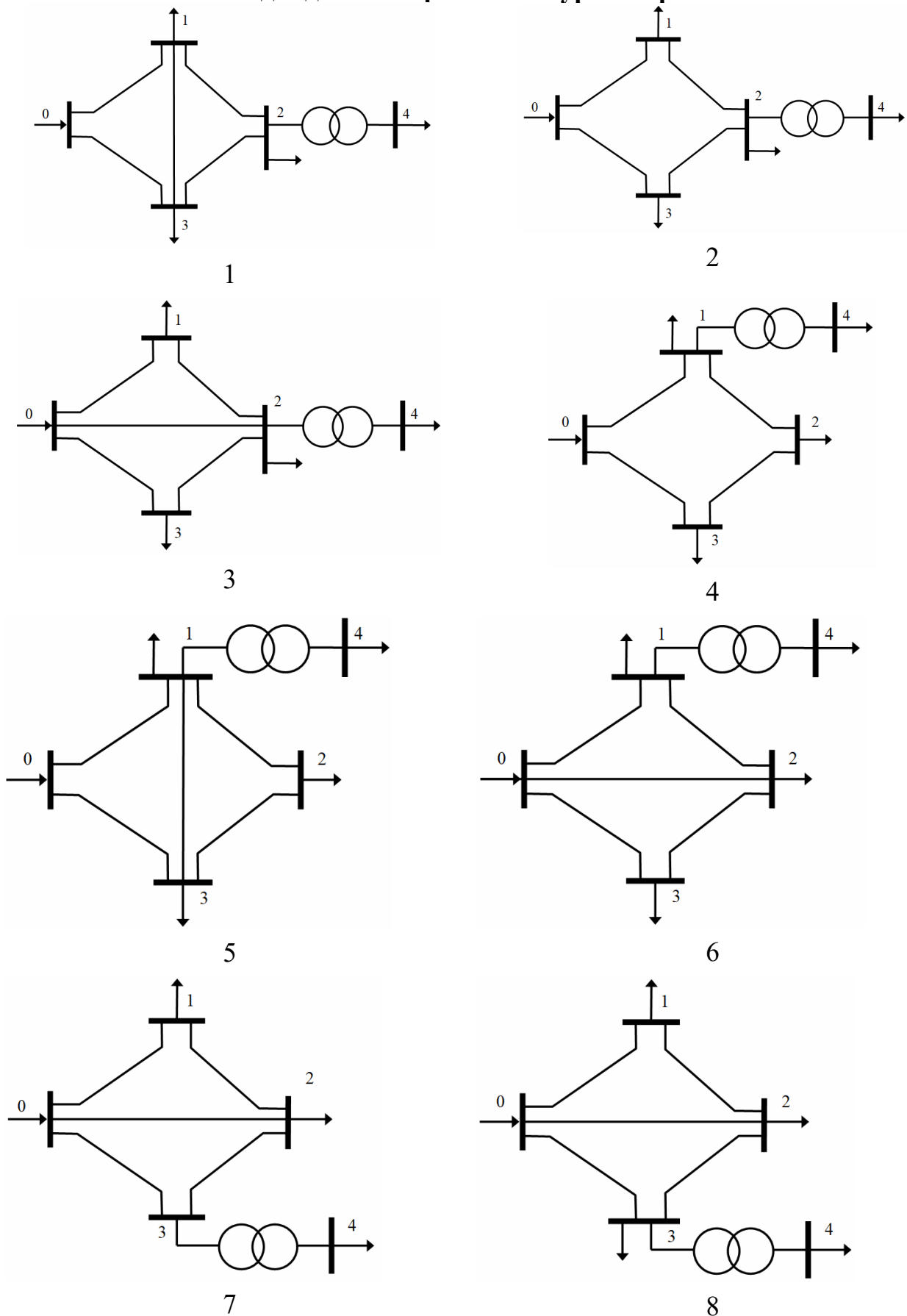
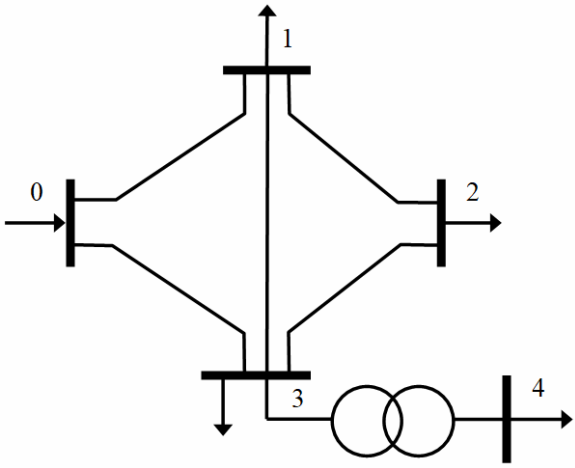
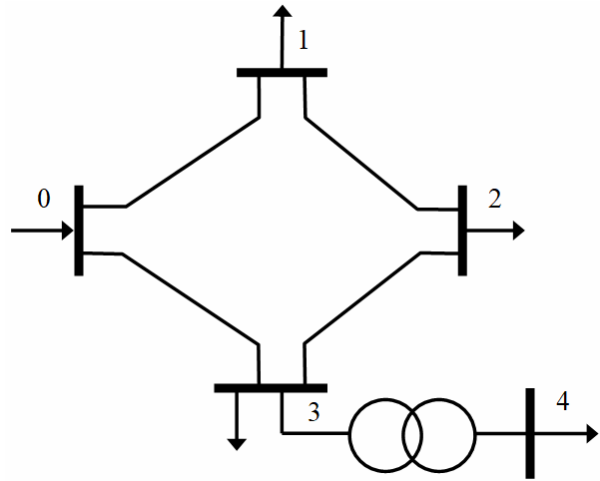


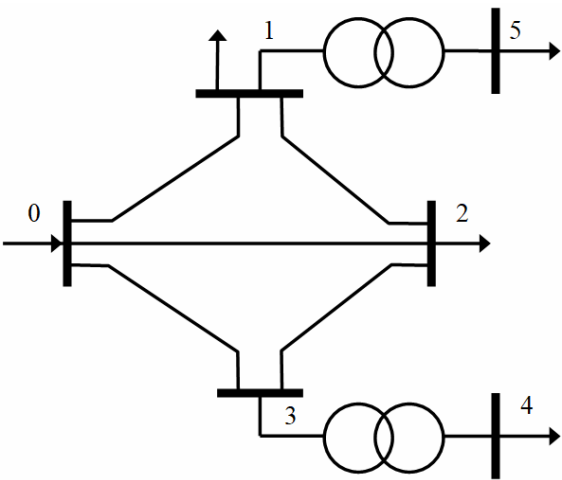
Рисунок Ж.1 – Варіанти схем електричних мереж



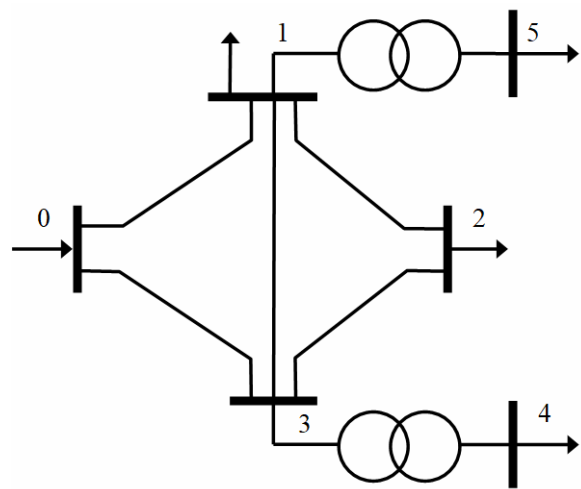
9



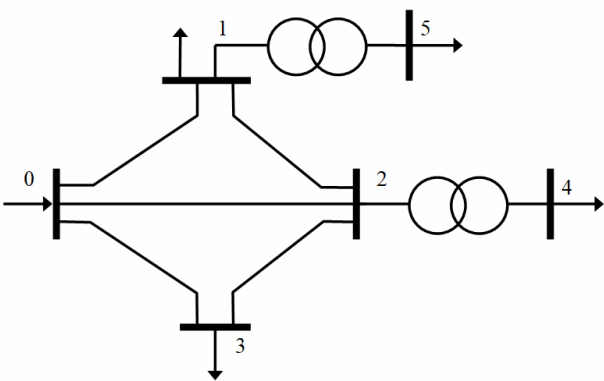
10



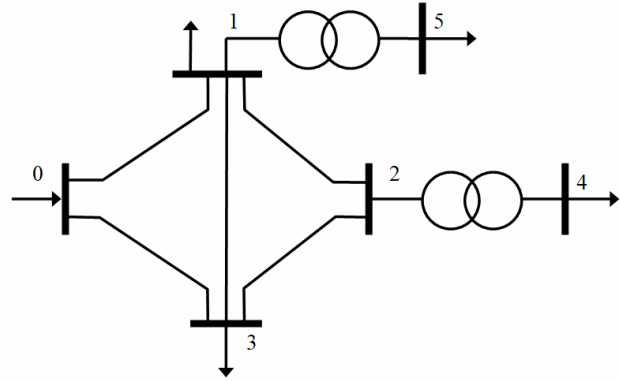
11



12



13



14

Продовження рисунка Ж.1

Таблиця Ж.1 – Вихідні дані по ділянках мережі

Варіант	Клас напруги ВН/НН, кВ	Напруга базисного вузла, кВ	Марка проводу/довжина ділянки, км					
			0-1	1-2	2-3	0-3	1-3	0-2
1	110/35	111	АС-95/14	АС-95/12	АС-120/8	АС-95/11	АС-95/8	–
2	110/35	114	АС-95/15	АС-120/12	АС-95/10	АС-95/8	–	–
3	110/35	112	АС-120/11	АС-95/10	АС-95/8	АС-95/17	–	АС-95/10
4	110/35	115	АС-95/8	АС-95/8	АС-95/8	АС-95/8	–	–
5	110/35	111	АС-95/9	АС-95/9	АС-95/9	АС-95/9	АС-120/12	–
6	110/35	112	АС-95/12	АС-95/18	АС-120/12	АС-95/8	–	АС-95/10
7	110/35	113	АС-95/15	АС-95/10	АС-120/12	АС-95/18	–	АС-95/12
8	110/35	114	АС-120/14	АС-120/14	120/14	120/14	–	АС-95/12
9	110/35	111	АС-95/8	АС-95/12	АС-95/12	АС-95/12	АС-95/14	–
10	110/35	115	АС-95/16	АС-120/15	АС-120/18	АС-95/9	–	–
11	110/35	112	АС-120/12	АС-95/12	АС-120/18	АС-95/20	–	АС-95/10
12	110/35	114	АС-95/10	АС-95/11	АС-120/15	АС-95/9	АС-95/13	–
13	110/35	111	АС-95/12	АС-120/11	АС-95/15	АС-95/12	–	АС-95/11
14	110/35	113	АС-95/12	АС-95/15	АС-95/10	АС-120/8	АС-95/10	–

Таблиця Ж.2 – Вихідні дані щодо трансформаторів та потужностей у вузлах схеми

Варіант	Тип трансформатора	Потужність у вузлах схеми, МВА				
		$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
1	ТМН- 2500/110	$5 + j3$	$4 + j3$	$4 + j2$	$7 + j5$	0
2	ТМН- 4000/110	$4 + j2$	$7 + j5$	$5 + j3$	$3 + j2$	0
3	ТМН- 6300/100	$7 + j5$	$8 + j6$	$4 + j2$	$3 + j2$	0
4	ТДН- 10000/110	$6 + j4$	$7 + j4$	$5 + j3$	$7 + j5$	0
5	ТДН- 16000/110	$8 + j6i$	$5 + j2$	$5 + j3$	$6 + j2$	0
6	ТРДН- 25000/110	$8 + j6$	$6 + j2$	$7 + j4$	$5 + j2$	0
7	ТДТН- 10000/110	$3 + j2$	$4 + j2$	$7 + j5$	$7 + j5$	$5 + j2$
8	ТДТН- 16000/110	$7 + j5$	$5 + j3$	$6 + j4$	$6 + j4$	0
9	ТМТН-6300/110	$6 + j2$	$5 + j3$	$8 + j6$	$8 + j6$	0
10	ТДН-10000/110	$5 + j2$	$7 + j4$	$8 + j6$	$8 + j6$	0
11	ТМН-25000/110	$3 + j2$	$4 + j2$	$7 + j5$	$7 + j5$	$4 + j2$
12	ТДН-10000/110	$4 + j2$	$7 + j5$	$7 + j5$	$5 + j3$	$7 + j4$
13	ТДН-16000/110	$5 + j3$	$6 + j4$	$6 + j2$	$5 + j3$	$5 + j2$
14	ТРДН-25000/110	$5 + j3$	$8 + j6$	$5 + j2$	$7 + j4$	$6 + j2$



## ДОДАТОК И

### Довідникові дані

Таблиця И.1 – Розрахункові дані ПЛ 35-150 кВ зі сталелегюмінієвими проводами АС (на 100 км)

Переріз провода, мм <sup>2</sup>	R <sub>0</sub> , Ом при +20° С	35 кВ		110 кВ			150 кВ		
		X <sub>0</sub> , Ом	B <sub>0</sub> , См 10 <sup>-4</sup>	X <sub>0</sub> , Ом	B <sub>0</sub> , См 10 <sup>-4</sup>	Q <sub>0</sub> , мвар	X <sub>0</sub> , Ом	B <sub>0</sub> , См 10 <sup>-4</sup>	Q <sub>0</sub> , мвар
35	77,3	44,5	2,59	–	–	–	–	–	–
50	59,2	43,3	2,65	–	–	–	–	–	–
70	42	42,0	2,73	–	–	–	–	–	–
95	31,4	41,1	2,81	42,9	2,65	3,5	–	–	–
120	24,9	40,3	2,85	42,3	2,69	3,6	43,9	2,61	6,5
150	19,5	39,8	2,90	41,6	2,74	3,65	43,2	2,67	6,7
185	15,6	38,4	2,96	40,9	2,82	3,7	42,4	2,71	6,8
240	12	–	–	40,1	2,85	3,75	41,6	2,75	6,9

Таблиця И.2 – Параметри силових трансформаторів

Тип тр-ра	S <sub>ном</sub> МВА	Межа регулю- вання	Каталожні дані						Розрахункові дані		
			U <sub>ном</sub> обмоток, кВ		U <sub>к</sub> , %	ΔP <sub>кз</sub> , кВт	ΔP <sub>х.х.</sub> , кВт	I <sub>х.х.</sub> , кВт	R <sub>тр</sub> , Ом	X <sub>тр</sub> , Ом	ΔQ <sub>х.х.</sub> , квар
			ВН	НН							
ТМН- 2500/110	2,5	±10×1,5% ±8×1,5%	110	6,6; 11; 22	10,5	22	5,0	1,5	42,6	508	37,5
ТМН- 6300/110	6,3	±9×1,78%	115	6,6; 11; 22; 38,5	10,5	50	11,5	0,8	14,7	220	50,4
ТДН- 10000/110	10	±9×1,78%				60	14	0,7	7,95	139	70
ТДН- 16000/110	16	±9×1,78%				85	19	0,7	4,38	86,7	112
ТРДН- 25000/110	25	±9×1,78%				115	10,5	120	27	0,7	2,54
ТРДН- 32000/110	32	±9×1,78%	115	6,3/6,6; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	120	30	0,7	2,5	43,5	240
ТРДН- 40000/110	40	±9×1,78%	115		10,5	172	36	0,7	1,44	34,8	260
ТРДЦН- 63000/110	63	±9×1,78%	115		10,5	260	59	0,6	0,87	22	410
ТРДЦН- 80000/110	80	±9×1,78%	121		10,5	310	70	0,6	0,6	17,4	480
ТД- 80000/110	80	±2×2,5%	121		6,3/10,5; 13,8/3,15	10,5	315	70	0,6	0,65	12,3
ТДЦ- 125000/110	125	±2×2,5%	121	10,5; 13,8	10,5	400	120	0,55	0,37	11,1	678
ТДЦ- 200000/110	200	±2×2,5%	121	13,8; 15; 15,75; 18	10,5	550	170	0,5	0,2	7,75	1000
ТДЦ- 250000/110	250	±2×2,5%	121	15,75;	10,5	640	200	0,5	0,15	6,1	1250

*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання курсової роботи

**«Оптимізація режиму трифазної системи електропостачання»**  
з навчальної дисципліни

**«СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання зі спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ОХРИМЕНКО** Вячеслав Миколайович,  
**МАЛЯРЕНКО** Віталій Андрійович

Відповідальний за випуск *В. Є. Плюгін*  
*За авторською редакцією*  
Комп'ютерне верстання *В. М. Охріменко*

План 2022, поз. 452М

---

Підп. до друку 02.11.2022. Формат 60 × 84/16.  
Електронне видання. Ум. друк. арк. 2,5

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: office@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
№ ДК 5328 від 11.04.2017