



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

РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ-1

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: В.В. Чижевський, О.С. Богомоллова

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Регулювання режимів електричних систем-1 : 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.: В.В. Чижевський, О.С. Богомоллова. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,33 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 64 с.

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

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

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)*

Навчальний посібник містить теоретичний матеріал, необхідний для виконання практичних робіт з кредитного модуля «Регулювання режимів електричних систем-1» здобувачами ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Також, матеріал навчального посібника може виявитися корисним під час виконання електричних розрахунків дальніх електропередач в процесі курсового та дипломного проектування студентами спеціальності.

© В. В. Чижевський, О. С. Богомоллова
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ ПОЛІНОМІВ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ - ЗА НАПРУГОЮ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ ЗА НАПРУГОЮ.....	13
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. РОЗРАХУНОК КОНФІГУРАЦІЇ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	22
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЖАНОГО РІВНЯ НАПРУГИ НА ШИНАХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЄМНІСНИХ УСТАНОВОК ПОЗДОВЖНЬОЇ ТА ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ.....	29
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. ЗАСТОСУВАННЯ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ З МЕТОЮ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	38
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЖАНОГО РІВНЯ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ РПН ТА ПБЗ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	49
ПРАКТИЧНА РОБОТА №7. РОЗРАХУНОК РЕГУЛЮВАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	54
ПРАКТИЧНА РОБОТА №8. ОЦІНКА НЕБАЛАНСУ НАПРУГИ ТА НАПРУГИ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	58
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64

ВСТУП

Навчальний посібник містить теоретичний матеріал, необхідний для опанування практичних задач з та виконання модульної контрольної роботи з «Регулювання режимів електричних систем-1» здобувачами ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Також, матеріал навчального посібника може виявитися корисним під час виконання курсового та дипломного проектування студентами спеціальності.

Навчальний посібник розроблено з метою формування у студентів знань щодо моделювання усталених режимів роботи електричних мереж, забезпеченню необхідного рівня напруги; принципам розробки заходів для зменшення втрат потужності і електроенергії; розробці заходів по забезпеченню якості електроенергії; проведенню аналізу режимів роботи електричних мереж і систем.

Отриманий в процесі виконання модульної контрольної роботи досвід розв'язання інженерних задач дозволить студенту в подальшому навчанні приймати самостійні творчі рішення в курсовому та дипломному проектуванні.

Розглянути задачі відповідають плану практичних робіт з «Регулювання режимів електричних систем-1», детально проілюстрований розв'язок задач та фактично являє собою готовий продукт для організації дистанційного навчання.

Матеріал навчального посібника може бути корисним для проведення практичних занять з дисципліни «Регулювання режимів електричних систем - 1» та, особливо, під час організації самостійної роботи студентів над теоретичним матеріалом дисципліни.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ ПОЛІНОМІВ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ - ЗА НАПРУГОЮ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

Характеристикою будь-якого електроприймача та споживачів електричної енергії загалом є споживана ними активна та реактивна потужність. Значення споживаної потужності залежить як від режиму роботи споживачів у часі, так і від параметрів режиму – напруги на затискачах споживача U та частоти напруги електропостачання f . [1]

Залежності активної та реактивної потужностей навантаження $P = \varphi(U)$ та $Q = \psi(U)$, що відповідають усталеним режимам, називають статичними характеристиками навантаження за напругою, а залежності цих потужностей від частоти $P = \varphi(f)$ та $Q = \psi(f)$ – статичними характеристиками навантаження за частотою. При зміні параметрів режиму змінюються активна і реактивна потужності навантажень, що в свою чергу впливає на рівні напруг і баланс потужностей в системі.

Статичні характеристики комплексного навантаження електричних мереж можна отримати розрахунковим шляхом або експериментально. Оскільки склад електроприймачів на кожному підприємстві різний, а від шин окремих підстанцій мережі можуть одночасно отримувати живлення декілька підприємств, то узагальнені статичні характеристики комплексного навантаження за напругою найбільш точно можна отримати експериментально, вимірюючи потужності P і Q у вузлах навантаження при різних рівнях напруги.

Отримані експериментальні дані містять регулярну та нерегулярну складові споживання потужності. Регулярна складова визначає справжнє зміна процесу споживання, а нерегулярна характеризує випадковий процес споживання, а водночас і можливі відхилення значень потужності.

Щодо завдання ідентифікації СХН нерегулярну складову можна охарактеризувати зміною значення базисної потужності $P_{\text{БАЗ}}$, що відповідає заданій базисній напрузі $U_{\text{БАЗ}}$, при незмінності коефіцієнтів поліномів, представлених у відносних одиницях. Зміна базової потужності враховує як мінливість складу електроприймачів під час проведення експерименту так і особливості технологічного процесу, а також похибку вимірювань.

Найбільш широко вживаний метод визначення коефіцієнтів багаточлена – це апроксимація за найменшими квадратами.

Статичні характеристики активного та реактивного навантаження за напругою $P(U)$ та $Q(U)$ можна подати аналітично у вигляді поліномів n -го ступеня:

$$\begin{aligned}
P(U) &= P_{ном} \left(\alpha_0 + \alpha_1 \frac{U}{U_{ном}} + \alpha_2 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 + \dots + \alpha_n \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^n \right), \\
Q(U) &= Q_{ном} \left(\beta_0 + \beta_1 \frac{U}{U_{ном}} + \beta_2 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 + \dots + \beta_n \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^n \right),
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

де $P_{ном}$, $Q_{ном}$ – активна та реактивна потужності навантаження за номінальної напруги на затискачах навантаження; U – фактична напруга на затискачах навантаження; $U_{ном}$ – номінальна напруга навантаження; α , β – коефіцієнти апроксимуючих поліномів; n – порядок поліному.

Значення коефіцієнтів α та β у виразі (1.1) мають відповідати умовам

$$\begin{aligned}
\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n &= 1, \\
\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n &= 1.
\end{aligned}
\tag{1.2}$$

Коефіцієнти поліноміальної функції, яка описує СХН за напругою, визначають виходячи з умови забезпечення найбільш повної збіжності графіку цієї функції із графіком СХН, отриманим в результаті експерименту. З цією метою із застосуванням експериментальних даних розв'язують лінійну систему алгебричних рівнянь, яка у випадку, наприклад, визначення коефіцієнтів поліному СХН за активною потужністю, матиме вигляд

$$\begin{bmatrix} P_{*1} \\ P_{*2} \\ P_{*3} \\ \vdots \\ P_{*4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & U_{*1} & U_{*1}^2 & \dots & U_{*1}^n \\ 1 & U_{*2} & U_{*2}^2 & \dots & U_{*2}^n \\ 1 & U_{*3} & U_{*3}^2 & \dots & U_{*3}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & U_{*m} & U_{*m}^2 & \dots & U_{*m}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix},
\tag{1.3}$$

де P_{*i} – значення активної потужності споживача за i -е вимірювання відносно номінального значення активної потужності споживача; U_{*i} – значення модуля напруги на затискачах споживача за i -е вимірювання відносно номінального значення напруги споживача; m – кількість пар вимірювань значень напруги та активної потужності під час експерименту.

Для розв'язання системи рівнянь (1.3) може бути застосована апроксимація методом найменших квадратів.

Апроксимація – науковий метод, що дає змогу виконати розв'язок складної функції шляхом її заміни на більш прості та відомі функції, які в свою чергу так чи інакше наближені до вихідної функції.

В даному випадку отримувати просту і відому функцію будемо за допомогою методу найменших квадратів, суть якого зводиться до наступного: сума квадратів відхилень значень вихідної функції від значень, що передбаченні математичною моделлю має бути найменшою. В загальному вигляді це зображується, як:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min \quad (1.4)$$

У цьому випадку в загальному виді система рівнянь (1.3) приймає вигляд:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m P_{*i} \\ \sum_{i=1}^m P_{*i} U_{*i} \\ \sum_{i=1}^m P_{*i} U_{*i}^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m P_{*i} U_{*i}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m U_{*i} & \sum_{i=1}^m U_{*i}^2 & \dots & \sum_{i=1}^m U_{*i}^n \\ \sum_{i=1}^m U_{*i} & \sum_{i=1}^m U_{*i}^2 & \sum_{i=1}^m U_{*i}^3 & \dots & \sum_{i=1}^m U_{*i}^{n+1} \\ \sum_{i=1}^m U_{*i}^2 & \sum_{i=1}^m U_{*i}^3 & \sum_{i=1}^m U_{*i}^4 & \dots & \sum_{i=1}^m U_{*i}^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m U_{*i}^n & \sum_{i=1}^m U_{*i}^{n+1} & \sum_{i=1}^m U_{*i}^{n+2} & \dots & \sum_{i=1}^m U_{*i}^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

Приклад 1.1. Для експериментальних наборів даних щодо прикладеного рівня напруги та потужності, яка споживається за даного рівня напруги (табл. 1.1), виконати апроксимація методом найменших квадратів.

Таблиця 1.1. Залежність активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги

Напруга, В	200	210	220	230	240
Активна потужність, Вт	81	92	100	109	120

Виконаємо перехід від іменованих одиниць до базисних:

$$U' = \frac{U_i}{U_{ном}}; \quad P' = \frac{P_i}{P_{ном}}$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга навантаження; $P_{ном}$ – активна потужності навантаження за номінальної напруги на затискачах навантаження.

Для розглядаємого прикладу значення номінальної напруги складає 220 В, а значення номінальної потужності – 100 Вт. У табл.1.2 наведено результати розрахунку значень напруги та потужності у базисних одиницях. На рис. 1.1 наведено залежність активної потужності від напруги у базисних одиницях.

Таблиця 1.2. Залежність активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги у базисних одиницях

Напруга, в.о.	0,909	0,955	1	1,045	1,091
Активна потужність, в.о.	0,81	0,92	1	1,09	1,2

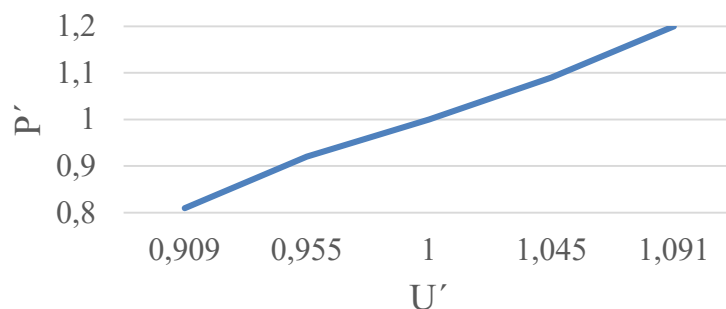


Рис. 1.1. Залежність активної потужності від напруги у базисних одиницях

Виконаємо лінійну апроксимацію. Загальний вигляд системи (1.5) набуває вигляду:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m P'_i \\ \sum_{i=1}^m P'_i \cdot U'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^m U'_i \\ \sum_{i=1}^m U'_i & \sum_{i=1}^m (U'_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix},$$

$$\text{де } \sum_{i=1}^5 U'_i = 0,909 + 0,955 + 1 + 1,045 + 1,091 = 5(\text{в.о.});$$

$$\sum_{i=1}^5 (U'_i)^2 = 0,909^2 + 0,955^2 + 1^2 + 1,045^2 + 1,091^2 = 5,021(\text{в.о.});$$

$$\sum_{i=1}^5 P'_i = 0,81 + 0,92 + 1 + 1,09 + 1,2 = 5,02(\text{в.о.});$$

$$\sum_{i=1}^5 P'_i \cdot U'_i = 0,81 \cdot 0,909 + 0,92 \cdot 0,955 + 1 \cdot 1 + 1,09 \cdot 1,045 + 1,2 \cdot 1,091 = 5,063(\text{в.о.}).$$

Таким чином отримуємо лінійну систему рівнянь з двома невідомими, яку обчислимо матричним методом:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 5,021 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 5,02 \\ 5,063 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,086 \\ 2,09 \end{bmatrix}$$

Отже наша функція має вигляд:

$$P'(U') = -1,086 + 2,09 \cdot U',$$

або в іменованих одиницях:

$$P(U) = P_{\text{баз}}(-1,086 + 2,09 \cdot U').$$

В табл. 1.3 наведено значення потужності в залежності від напруги згідно до отриманої залежності полінома першого порядку.

Таблиця 1.3. Значення активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги згідно до отриманого полінома першого порядку

Напруга, В	200	210	220	230	240
Активна потужність, Вт	81,4	90,9	100,4	109,9	119,4

Виконаємо перевірку (1.4), яка і буде суттю методу найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^5 (P_{\text{зад}} - P_{\text{пол}})^2 = (81 - 81,4)^2 + (92 - 90,9)^2 + (100 - 100,4)^2 + (109 - 109,9)^2 + (120 - 119,4)^2 = 2,7.$$

Виконаємо квадратичну апроксимацію. Загальний вигляд системи (1.5) набуває вигляду:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 P_i \\ \sum_{i=1}^5 P_i \cdot U_i' \\ \sum_{i=1}^5 P_i \cdot (U_i')^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & \sum_{i=1}^5 U_i' & \sum_{i=1}^5 (U_i')^2 \\ \sum_{i=1}^5 U_i' & \sum_{i=1}^5 (U_i')^2 & \sum_{i=1}^5 (U_i')^3 \\ \sum_{i=1}^5 (U_i')^2 & \sum_{i=1}^5 (U_i')^3 & \sum_{i=1}^5 (U_i')^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix},$$

$$\text{де } \sum_{i=1}^5 (U'_i)^3 = 0,909^3 + 0,955^3 + 1^3 + 1,045^3 + 1,091^3 = 5,062(\text{в.о.});$$

$$\sum_{i=1}^5 (U'_i)^4 = 0,909^4 + 0,955^4 + 1^4 + 1,045^4 + 1,091^4 = 5,124(\text{в.о.});$$

$$\sum_{i=1}^5 P'_i \cdot (U'_i)^2 = 0,81 \cdot 0,909^2 + 0,92 \cdot 0,955^2 + 1 \cdot 1^2 + 1,09 \cdot 1,045^2 + 1,2 \cdot 1,091^2 = 5,127(\text{в.о.}).$$

Таким чином отримуємо систему рівнянь з трьома невідомими, яку обчислимо матричним методом:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5,021 \\ 5 & 5,021 & 5,062 \\ 5,021 & 5,062 & 5,124 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 5,02 \\ 5,063 \\ 5,127 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,742 \\ 1,399 \\ 0,346 \end{bmatrix}$$

Отже наша функція має вигляд:

$$P'(U') = -0,742 + 1,399 \cdot U' + 0,346 \cdot U'^2,$$

або в іменованих одиницях:

$$P(U) = P_{\text{баз}} (-0,742 + 1,399 \cdot U' + 0,346 \cdot U'^2). \quad (1.7)$$

В табл. 1.4 наведено значення потужності в залежності від напруги згідно до отриманої залежності (1.7).

Таблиця 1.4. Значення активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги згідно до отриманого полінома

Напруга, В	200	210	220	230	240
Активна потужність, Вт	81,5	90,8	100,3	109,8	119,5

Виконаємо перевірку (1.4), яка і буде суттю методу найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^5 (P_{\text{зад}} - P_{\text{пол}})^2 = (81 - 81,5)^2 + (92 - 90,8)^2 + (100 - 100,3)^2 + (109 - 109,8)^2 + (120 - 119,5)^2 = 2,629.$$

Виконаємо кубічну апроксимацію. Розрахунок виконуємо аналогічно. В результаті рішення системи контурних рівнянь матиме наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5,021 & 5,062 \\ 5 & 5,021 & 5,062 & 5,124 \\ 5,021 & 5,062 & 5,124 & 5,207 \\ 5,062 & 5,124 & 5,207 & 5,312 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 5,02 \\ 5,063 \\ 5,127 \\ 5,212 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -44,797 \\ 134,187 \\ -132,754 \\ 44,367 \end{bmatrix}$$

Отже наша функція має вигляд:

$$P'(U') = -44,797 + 134,187 \cdot U' - 132,754 \cdot U'^2 + 44,367 \cdot U'^3,$$

або в іменованих одиницях:

$$P(U) = P_{\text{баз}} (-44,797 + 134,187 \cdot U' - 132,754 \cdot U'^2 + 44,367 \cdot U'^3). \quad (1.8)$$

В табл. 1.5 наведено значення потужності в залежності від напруги згідно до отриманої залежності (1.8).

Виконаємо перевірку (1.4), яка і буде суттю методу найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^5 (P_{\text{зад}} - P_{\text{пол}})^2 = (81 - 81)^2 + (92 - 91,8)^2 + (100 - 100,3)^2 + (109 - 108,8)^2 + (120 - 120)^2 = 0,1286.$$

Таблиця 1.5. Значення активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги згідно до отриманого полінома

Напруга, В	200	210	220	230	240
Активна потужність, Вт	81	91,8	100,3	108,8	120

Виконаємо апроксимацію четвертого порядку. Розрахунок виконуємо аналогічно. В результаті рішення системи контурних рівнянь матиме наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -334,989 \\ 1300,306 \\ -1887,292 \\ 1215,84 \\ -292,869 \end{bmatrix}$$

В табл. 1.6 наведено значення потужності в залежності від напруги згідно до отриманої залежності для полінома четвертого порядку.

Таблиця 1.6. Значення активної потужності, що споживається від прикладеного рівня напруги згідно до полінома четвертого порядку

Напруга, В	200	210	220	230	240
Активна потужність, Вт	80,99	91,99	99,99	108,99	119,99

Виконаємо перевірку (1.4), яка і буде суттю методу найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^5 (P_{зад} - P_{пол})^2 = 0,0006.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВАНТАЖЕННЯ ЗА НАПРУГОЮ

Приклад 2.1. Виконати розрахунок режиму роботи найпростішої схеми електричної мережі 110 кВ (рис.2.1) спочатку без урахування статичних характеристик навантаження за напругою, а потім - з урахуванням. Порівняти результати.

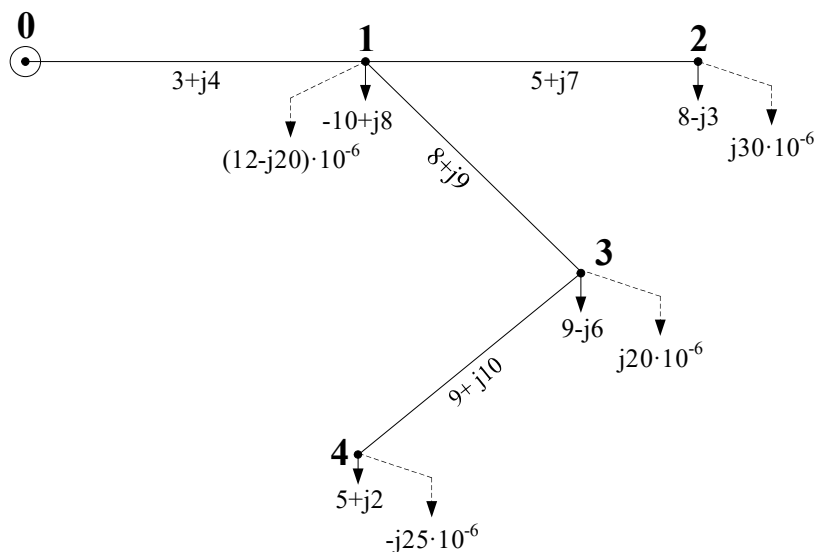


Рис. 2.2. Схема електричної мережі

Виконаємо ітераційний розрахунок режиму роботи електричної мережі у струмовій формі. Алгоритм розрахунку представлено в [2].

Ітерація №1.

Розрахунковий струм вузла №1 на першій ітерації (за номінальної напруги) становить:

$$I_{p1} = \frac{S_1}{\bar{U}_{ном}} + Y_1 \cdot U_{ном} = \frac{-10+j8}{110} + (12-j20) \cdot 10^{-6} \cdot 110 = -89,589 + j70,527 \text{ (A)}.$$

Розрахункові струми решти вузлів визначаємо аналогічно. Результат наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Розрахункові струми вузлів на першій ітерації

Вузол №	1	2	3	4
Струм, А	-89,596+j70,527	72,727-j23,973	81,818-j52,345	45,454+j15,432

Струморозподіл в розімкненій мережі визначимо з урахуванням першого закону Кірхгофа:

$$I_{1-2} = I_{p2} = 72,727 - j23,973 (\text{A});$$

$$I_{3-4} = I_{p4} = 45,454 + j15,432 (\text{A});$$

$$I_{1-3} = I_{3-4} + I_{p2} = 127,273 - j36,914 (\text{A});$$

$$I_{0-1} = I_{1-2} + I_{1-3} + I_{p1} = 110,411 + j9,641 (\text{A}).$$

Рівень напруги у вузлах на першій ітерації:

$$\begin{aligned} U_1(1) &= U_{\text{БП}} - I_{0-1} \cdot Z_{0-1} = 115 - (110,411 + j9,641)(3 + j4) = 114,71 - j0,47 = \\ &= 114,71 e^{-j0,235} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2(1) &= U_1(1) - I_{1-2} \cdot Z_{1-2} = 114,71 - j0,47 - (72,727 - j23,973)(5 + j7) = 114,18 - j0,86 = \\ &= 114,18 e^{-j0,431} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3(1) &= U_1(1) - I_{1-3} \cdot Z_{1-3} = 114,71 - j0,47 - (127,273 - j36,914)(8 + j9) = 113,36 - j1,32 = \\ &= 113,36 e^{-j0,668} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4(1) &= U_3(1) - I_{3-4} \cdot Z_{3-4} = 113,36 - j1,32 - (45,454 + j15,432)(9 + j10) = 113,1 - j1,91 = \\ &= 113,12 e^{-j0,97} (\text{кВ}). \end{aligned}$$

Сумарне навантаження мережі складає:

$$\sum S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 12 + j1 (\text{МВА}).$$

Потужність балансуєного пункту:

$$S_{\text{БП}} = I_{0-4} \cdot \bar{U}_{\text{БП}} = 12,7 - j1,11 (\text{МВА}).$$

Отже, сумарні втрати потужності в мережі на першій ітерації становлять:

$$\Delta S(1) = S_{\text{БП}} - \sum S = 12,7 + j1,11 - 12 - j1 = 0,7 + j0,11 (\text{МВА}).$$

Виконаємо другу ітерацію розрахунку.

Ітерація №2.

Розрахунковий струм вузла №1 на другій ітерації становить:

$$\begin{aligned} I_{p1}(2) &= \frac{S_1}{\bar{U}_1(1)} + Y_1 \cdot U_1(1) = \frac{-10 + j8}{114,71 + j0,47} + (12 - j20) \cdot 10^{-6} \cdot (114,71 - j0,47) = \\ &= -85,524 + j67,799 (\text{A}). \end{aligned}$$

Розрахункові струми решти вузлів визначаємо аналогічно. Результат наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Розрахункові струми вузлів на другій ітерації

Вузол №	1	2	3	4
Струм, А	-85,524+j67,799	69,891-j23,376	78,794-j51,581	44,446+j14,103

Струморозподіл в розімкненій мережі визначимо з урахуванням першого закону Кірхгофа:

$$I_{1-2} = I_{p2} = 69,891 - j23,376 (\text{А});$$

$$I_{3-4} = I_{p4} = 44,446 + j14,103 (\text{А});$$

$$I_{1-3} = I_{3-4} + I_{p2} = 123,241 - j37,478 (\text{А});$$

$$I_{0-1} = I_{1-2} + I_{1-3} + I_{p1} = 107,608 + j6,945 (\text{А}).$$

Рівень напруги у вузлах на другій ітерації:

$$\begin{aligned} U_1(2) &= U_{\text{БП}} - I_{0-1} \cdot Z_{0-1} = 115 - (107,608 + j6,945)(3 + j4) = 114,7 - j0,45 = \\ &= 114,71e^{-j0,225} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2(2) &= U_1(2) - I_{1-2} \cdot Z_{1-2} = 114,7 - j0,45 - (69,891 - j23,376)(5 + j7) = 114,19 - j0,413 = \\ &= 114,19e^{-j0,413} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3(2) &= U_1(2) - I_{1-3} \cdot Z_{1-3} = 114,7 - j0,45 - (123,241 - j37,478)(8 + j9) = 113,38 - j1,26 = \\ &= 113,39e^{-j0,637} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4(2) &= U_3(2) - I_{3-4} \cdot Z_{3-4} = 113,38 - j1,26 - (44,446 + j14,103)(9 + j10) = 113,12 - j1,83 = \\ &= 113,14e^{-j0,928} (\text{кВ}). \end{aligned}$$

Потужність балансуєчого пункту на другій ітерації:

$$S_{\text{БП}} = I_{0-4} \cdot \bar{U}_{\text{БП}} = 12,37 + j0,8 (\text{МВА}).$$

Отже, сумарні втрати потужності в мережі на другій ітерації становлять:

$$\Delta S(2) = S_{\text{БП}} - \sum S = 12,37 + j0,8 - 12 - j1 = 0,37 - j0,2 (\text{МВА}).$$

Перевіряємо умови завершення ітераційного процесу:

$$|\Delta S(1) - \Delta S(2)| = |0,7 + j0,11 - (0,37 - j0,2)| = 0,447 (\text{МВА})$$

Умова не виконується, необхідно продовжити розрахунок.

Решта ітераційного розрахунку виконується аналогічно. Результати ітераційного розрахунку наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Результат ітераційного розрахунку

Іте- рація	Параметр	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Ітерація №3	Розрахунковий Струм вузлів, А	-85,537+j67,786	69,889-j23,35	78,805- j51,527	44,429+j14,132
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках ме- режі, А	69,889-j23,35	44,429+j14,132	123,234- j37,395	107,586+j7,042
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	114,71e ^{-j0,23}	114,2e ^{-j0,41}	113,39e ^{- j0,64}	113,14e ^{-j0,93}
	Втрати потуж- ності, МВА	0,372-j0,19			
Ітерація №4	Розрахунковий Струм вузлів, А	-85,537+j67,786	69,889-j23,35	78,804- j51,527	44,428+j14,131
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках ме- режі, А	69,889-j23,35	44,428+j14,131	123,232- j37,396	107,584+j7,041
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	114,71e ^{-j0,23}	114,2e ^{-j0,41}	113,39e ^{- j0,64}	113,14e ^{-j0,93}
	Втрати потуж- ності, МВА	0,372-j0,19			

Визначимо потоки потужності на ділянці 0-1 схеми мережі:

$$S_{0-1n} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_{БП} = (107,584 + j7,041) \cdot 115 = 12,37 + j0,81(\text{МВА});$$

$$S_{0-1k} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_1 = (107,584 + j7,041) \cdot (114,71 + j0,45) = 12,34 + j0,86(\text{МВА}).$$

Для решти ділянок розрахунок такий самий. В табл. 2.4 наведено результат розрахунку потужності початку та кінця ділянок.

Таблиця 2.4. Потужності початків та кінців ділянок схеми мережі

Ділянка	Потужність початку, МВА	Потужність кінця, МВА
0-1	12,37+j0,81	12,34+j0,86
1-2	8,03-j2,65	8-j2,61
1-3	14,15-j4,23	14,02-j4,08
3-4	5,02+j1,66	5+j1,68

На рис. 2.2 представлено результат ітераційного розрахунку режиму роботи мережі без урахування статичних характеристик навантаження.

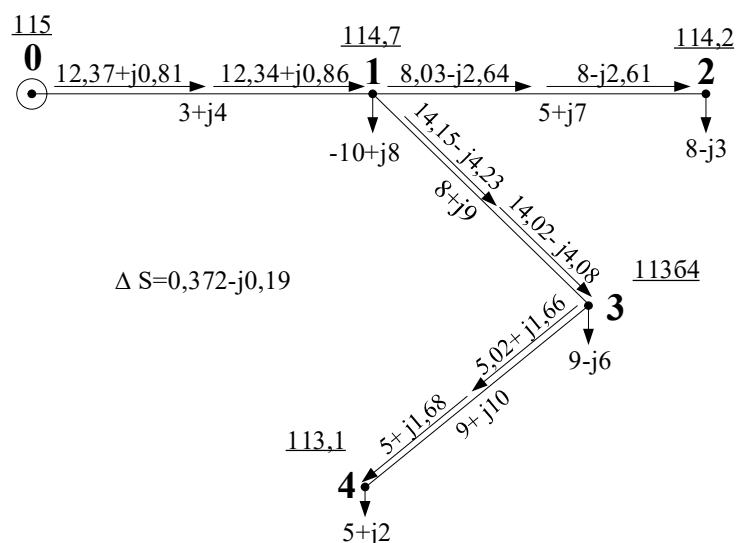


Рис. 2.2. Параметри режиму роботи електричної мережі

Виконаємо розрахунок режиму роботи електричної мережі (рис.2.1) з урахуванням статичних характеристик навантаження за напругою.

Ітерація №1.

Перша ітерація розраховується аналогічно, попередньо наведеним розрахункам, тому у табл. 2.5 наведено результати розрахунку.

Таблиця 2.5. Результат розрахунку режиму роботи мережі на першій ітерації з урахуванням статичних характеристик навантаження

Вузол	1	2	3	4
Розрахунковий Струм вузлів, А	$-89,596+j70,527$	$72,727-j23,973$	$81,818-j52,345$	$45,454+j15,432$
Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
Струморозподіл по ділянках ме- режі, А	$72,727-j23,973$	$14,454+j15,432$	$127,273-j39,614$	$110,411+j9,641$
Вузол	1	2	3	4
Рівень напруги у вузлах, кВ	$114,71e^{-j0,23}$	$114,18e^{-j0,43}$	$113,36e^{-j0,67}$	$113,12e^{-j0,97}$
Втрати потуж- ності, МВА	$0,7+j0,11$			

Ітерація №2.

Визначимо відхилення напруги у вузлах від номінального значення:

$$U'_1 = \frac{|U_1(1)|}{U_{ном}} = \frac{|114,71 - j0,47|}{110} = 1,043;$$

$$U'_2 = \frac{|U_2(1)|}{U_{ном}} = \frac{|114,18 - j0,86|}{110} = 1,038;$$

$$U'_3 = \frac{|U_3(1)|}{U_{ном}} = \frac{|113,36 - j1,32|}{110} = 1,031;$$

$$U'_4 = \frac{|U_4(1)|}{U_{ном}} = \frac{|113,1 - j1,91|}{110} = 1,028.$$

Як відомо, електричне навантаження може характеризуватися залежностями від напруги у різній степені, але у більшості випадків з достатньою для практичних розрахунків точністю СХН за напругою можуть бути подані поліномами другої степені. Тоді рівняння (1.1) приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} P(U) &= P_{ном} \left(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot U' + \alpha_2 \cdot (U')^2 \right), \\ Q(U) &= Q_{ном} \left(\beta_0 + \beta_1 \cdot U' + \beta_2 \cdot (U')^2 \right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де значення коефіцієнтів типових статичних характеристик для мереж напругою 110 - 220 кВ складають:

$$\alpha_0 = 0,83; \quad \alpha_1 = -0,3; \quad \alpha_2 = 0,47;$$

$$\beta_0 = 3,7; \quad \beta_1 = -7; \quad \beta_2 = 4,3.$$

Таким чином, виконаємо корекцію потужностей навантаження в залежності від напруги у вузлах:

$$\begin{aligned} P(U)_1 &= P_1 \left(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot U'_1 + \alpha_2 (U'_1)^2 \right) = -10 \cdot (0,83 - 0,3 \cdot 1,043 + 0,47 \cdot 1,043^2) = \\ &= -10,28 \text{ (MBm)}, \end{aligned}$$

$$Q(U)_1 = Q_1 \left(\beta_0 + \beta_1 \cdot U' + \beta_2 (U')^2 \right) = 8 \cdot (3,7 - 7 \cdot 1,043 + 4,3 \cdot 1,043^2) = 8,61 \text{ (MVar)};$$

$$S_1(2) = P(U)_1 + jQ(U)_1 = -10,28 + j8,61 \text{ (MVA)}.$$

Для решти вузлів коригування навантаження виконується аналогічно. Результати наведені у табл. 2.6.

Таблиця 2.5. Результат коригування навантаження у вузлах на другій ітерації

Вузол	1	2	3	4
$P(U)$, МВт	-10,28	8,2	9,18	5,09
$Q(U)$, МВА _р	8,61	-3,2	-6,32	2,1
$S_i(2)$ МВА	-10,28+j8,61	8,2-j3,2	9,18-j6,32	5,09+j2,1

Тоді розрахунковий струм вузла №1 на другій ітерації з урахування коригування навантаження складатиме:

$$I_{p1}(2) = \frac{S_1(2)}{\bar{U}_1(1)} + Y_1 \cdot U_1(1) = \frac{-10,28 + j8,61}{114,71 + j0,47} + (12 - j20) \cdot 10^{-6} \cdot (114,71 - j0,47) = -87,965 + j73,135 \text{ (A)}.$$

Розрахункові струми решти вузлів визначаємо аналогічно. Результат наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Розрахункові струми вузлів на другій ітерації з урахування статичних характеристик навантаження

Вузол №	1	2	3	4
Струм, А	87,965+j73,135	71,629-j25,149	80,351-j54,402	45,579+j14,952

Струморозподіл в розімкненій мережі визначимо з урахуванням першого закону Кірхгофа:

$$I_{1-2} = I_{p2} = 71,629 - j25,149 \text{ (A)};$$

$$I_{3-4} = I_{p4} = 45,289 + j14,952 \text{ (A)};$$

$$I_{1-3} = I_{3-4} + I_{p2} = 125,63 - j39,451 \text{ (A)};$$

$$I_{0-1} = I_{1-2} + I_{1-3} + I_{p1} = 109,294 + j8,535 \text{ (A)}.$$

Рівень напруги у вузлах на другій ітерації:

$$U_1(2) = U_{\text{БП}} - I_{0-1} \cdot Z_{0-1} = 115 - (109,294 + j8,535)(3 + j4) = 114,71 - j0,46 = 114,71 e^{-j0,231} \text{ (кВ)};$$

$$U_2(2) = U_1(2) - I_{1-2} \cdot Z_{1-2} = 114,71 - j0,46 - (71,629 - j25,149)(5 + j7) = 114,17 - j0,84 = 114,18 e^{-j0,42} \text{ (кВ)};$$

$$U_3(2) = U_1(2) - I_{1-3} \cdot Z_{1-3} = 114,71 - j0,46 - (125,63 - j39,451)(8 + j9) = 113,35 - j1,28 = 113,35e^{-j0,65}(\kappa B);$$

$$U_4(2) = U_3(2) - I_{3-4} \cdot Z_{3-4} = 113,35 - j1,28 - (45,279 + j14,652)(9 + j10) = 113,09 - j1,87 = 113,1e^{-j0,94}(\kappa B).$$

Сумарне навантаження мережі на другій ітерації з урахування СХЕН навантаження складає:

$$\sum S = S_1(2) + S_2(2) + S_3(2) + S_4(2) = 12,19 + j1,19(MBA).$$

Потужність балансуючого пункту на другій ітерації:

$$S_{БП} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_{БП} = 12,57 + j0,98(MBA).$$

Отже, сумарні втрати потужності в мережі на другій ітерації становлять:

$$\Delta S(2) = S_{БП} - \sum S = 12,57 + j0,98 - 12,19 - j1,19 = 0,38 - j0,21(MBA).$$

Перевіряємо умови завершення ітераційного процесу:

$$|\Delta S(1) - \Delta S(2)| = |0,7 + j0,11 - (0,38 - j0,21)| = 0,449(MBA)$$

Умова не виконується, необхідно продовжити розрахунок.

Решта ітераційного розрахунку виконується аналогічно. Результати ітераційного розрахунку наведено в табл. 2.3.

Визначимо потоки потужності на ділянці 0-1 схеми мережі:

$$S_{0-1n} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_{БП} = (109,313 + j8,595) \cdot 115 = 12,57 + j0,99(MBA);$$

$$S_{0-1k} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_1 = (109,313 + j8,595) \cdot (114,71 + j0,84) = 12,53 + j1,04(MBA).$$

Для решти ділянок розрахунок такий самий. В табл. 2.7 наведено результат розрахунку потужності початку та кінця ділянок мережі з урахуванням СХН.

На рис. 2.3 представлено результат ітераційного розрахунку режиму роботи мережі з урахування статичних характеристик навантаження за напругою.

Таблиця 2.6. Результат ітераційного розрахунку

№	Параметр	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Навантаження вузлів, МВА	-10,28+j8,61	8,2-j3,2	9,18-j6,32	5,09+j2,1
Ітерація №3	Розрахунковий Струм вузлів, А	-87,97+j73,128	71,635-j25,135	80,374-j54,368	45,275+j14,969
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках мережі, А	71,635-j25,135	45,275+j14,969	125,649-j39,398	109,313+j8,595
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	114,71e ^{-j0,23}	114,18e ^{-j0,42}	113,35e ^{-j0,65}	113,1e ^{-j0,94}
	Втрати потужності, МВА	0,382-j0,202			
	Навантаження вузлів, МВА	-10,28+j8,61	8,2-j3,2	9,18-j6,32	5,09+j2,1
Ітерація №4	Розрахунковий Струм вузлів, А	-87,97+j73,129	71,635-j25,136	80,373-j54,368	45,275+j14,969
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках мережі, А	71,635-j25,136	45,275+j14,969	125,648-j39,399	109,313+j8,594
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	114,71e ^{-j0,23}	114,18e ^{-j0,42}	113,35e ^{-j0,65}	113,1e ^{-j0,94}
	Втрати потужності, МВА	0,382-j0,202			

Таблиця 2.7. Потужності початків та кінців ділянок схеми мережі з урахуванням статичних характеристик навантаження

Ділянка	Потужність початку, МВА	Потужність кінця, МВА
0-1	12,57+j0,99	12,53+j1,04
1-2	8,23-j2,85	8,2-j2,81
1-3	14,43-j4,46	14,29-j4,31
3-4	5,11+j1,75	5,09+j1,78

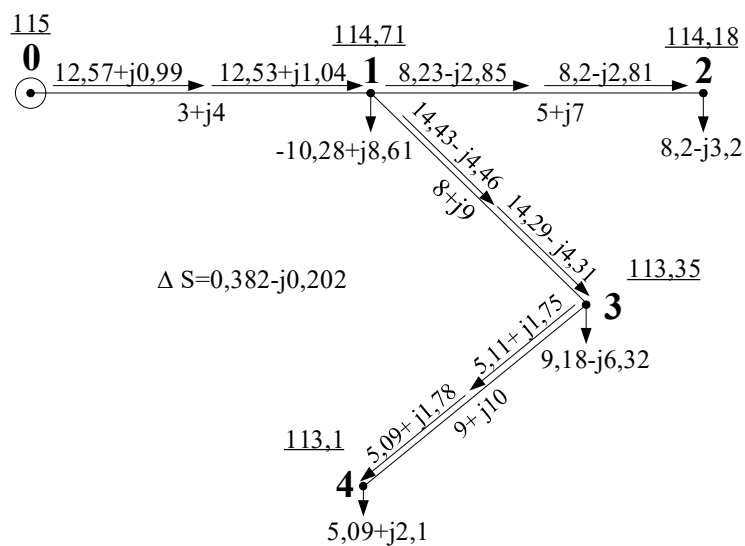


Рис. 2.3. Параметри режиму роботи електричної мережі з урахуванням статичних характеристик навантаження

Порівняємо результати розрахунку.

Приріст потужності та втрат потужності складають:

$$\Delta S_{нав} = \sum S_{без_CXH} - \sum S_{3_CXH} = 12 + j1 - (12.189 + j1.19) = -0.19 - j0.19 \text{ (MBA)}.$$

$$\Delta S_{втрат} = \Delta S_{без_CXH} - \Delta S_{3_CXH} = 0.372 - j0.19 - (0.382 - j0.202) = -0.01 + j0.012 \text{ (MBA)}.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. РОЗРАХУНОК КОНФІГУРАЦІЇ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

До засобів регулювання реактивної потужності в електроенергетичних системах відносяться:

- синхронні генератори електростанцій;
- синхронні компенсатори;
- батареї статичних конденсаторів поперечної компенсації (в тому числі керовані);
- шунтувальні реактори (в тому числі керовані);
- засоби FACTS поперечної компенсації.

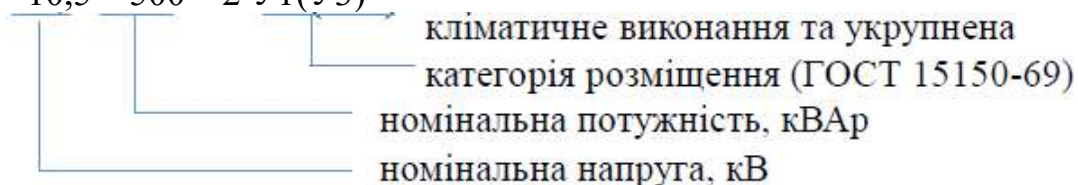
Установка поперечно компенсації (УППК) у вигляді батареї статичних конденсаторів (БСК) призначена виключно для виробництва реактивної потужності.

До паспортних даних конденсаторів для поперечної компенсації є наступні параметри:

- номінальна напруга, кВ (U_{k0});
- номінальна потужність, кВАр (Q_{k0}).

Типові конденсатори для УППК:

- КЭК1 – 10,5 – 35 – 2 У1(У3)
- КЭК1 – 10,5 – 125 – 2 У1(У3)
- КЭК1 – 10,5 – 500 – 2 У1(У3)



К – конденсатор для підвищення коефіцієнту потужності

Э – екологічно безпечна просочувальна рідина

К – комбінований діелектрик

До розрахункових параметрів конденсаторів відносяться:

Номінальний опір конденсатора:

$$x_{k0} = -\frac{U_{k0}^2}{Q_{k0}} = -\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_k},$$

де f – лінійна частота електричного струму, Гц (для енергосистеми ОЕС України $f=50$ Гц); C_k – ємність конденсатора, Ф, що визначається наступним чином:

$$C_k = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

де ε – відносна діелектрична проникність речовини між обкладинками конденсатора; ε_0 – діелектрична постійна, що дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S –

площа обкладинки конденсатора, м²; d – відстань між обкладинками конденсатора, м.

Очевидно, що ємність конденсатора і його опір за незмінної частоти та температури залишаються константою.

Номинальний струм конденсатора:

$$I_{k0} = \frac{Q_{k0}}{U_{k0}}.$$

Фактичний струм конденсатора:

$$I_{k.факт} = \frac{U_{k.факт}}{x_{k0}}$$

де $U_{k.факт}$ - модуль фактичної напруги на конденсаторі.

Фактична потужність конденсатора:

$$Q_{k.факт} = \frac{U_{k.факт}^2}{x_{k0}} = I_{k.факт} \cdot U_{k.факт} = I_{k.факт}^2 \cdot x_{k0}$$

На рис.3.1 наведено схеми з'єднання БСК поперечної компенсації.

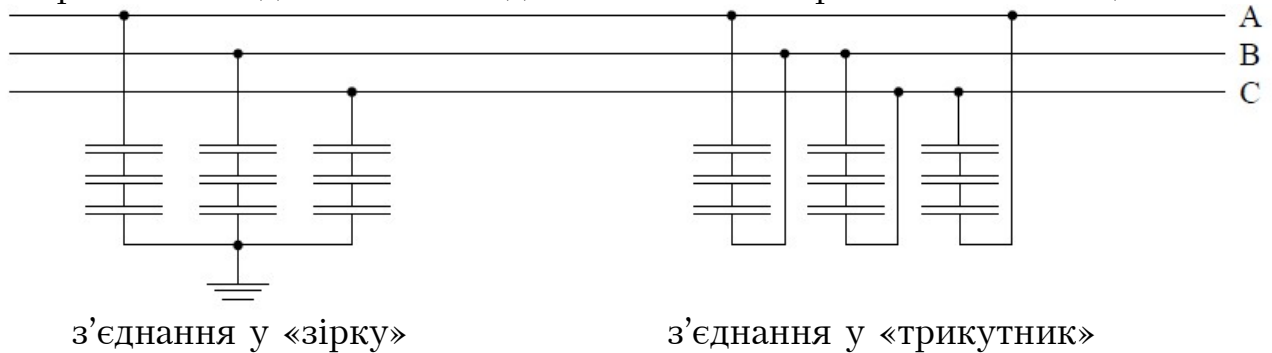


Рис. 3.1. Схема з'єднання батареї статичних конденсаторів поперечної компенсації

Відповідно до схеми з'єднань розраховуються параметри БСК.

З'єднання у «зірку»

$$I_L = I_\phi$$

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

З'єднання в «трикутник»

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$U_L = U_\phi$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi$$

Визначення конструкції ємнісних УППК

Вихідні величини для розрахунку:

- робоча потужність УППК $Q_{роб}$ (визначає кількість паралельних елементів БСК);
- тип конденсаторів (U_{k0} , Q_{k0});

- фактична напруга в місці встановлення БСК ($U_{к.факт}$) – лінійна або фазна в залежності від способу підключення (визначає кількість послідовних елементів БСК).

Кількість конденсаторів, включених послідовно до кола фази БСК:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{k0}} \rightarrow n'_{\text{посл}} > n_{\text{посл}}. \quad (3.1)$$

Номінальна напруга БСК:

$$U_{\text{БСК ном}} = n'_{\text{посл}} U_{k0}.$$

Фактична напруга на конденсаторі:

$$U_{к.факт} = \frac{U_{\text{факт}}}{n'_{\text{пос}}},$$

при цьому $U_{к.факт} \leq U_{k0}$.

Фактична потужність кола фази БСК:

$$Q_{\text{кола факт}} = n'_{\text{посл}} Q_{к.факт}.$$

Кількість паралельних кіл у фазі БСК:

$$n_{\text{пар}} = \frac{Q_{\text{роб}}}{3 \cdot Q_{\text{кола факт}}} \rightarrow n'_{\text{пар}} > n_{\text{пар}}.$$

Загальна кількість конденсаторів БСК:

$$N_{\Sigma} = 3 \cdot n'_{\text{пар}} \cdot n'_{\text{посл}}$$

Встановлена потужність БСК:

$$Q_{\text{БСК вст.}} = N_{\Sigma} \cdot Q_{k0}.$$

Фактична потужність БСК:

$$Q_{\text{БСК факт}} = N_{\Sigma} \cdot Q_{к.факт}$$

Приклад 3.1. Визначити параметри УППК, яка встановлена у п.3 схеми електричної мережі (рис.3.2), що необхідна для забезпечення в цьому пункті надбавки 0,6 кВ у порівнянні із режимом природного потоворозподіл. Визначити конфігурацію УППК за умови застосування конденсаторів КЕК-10,5-50.

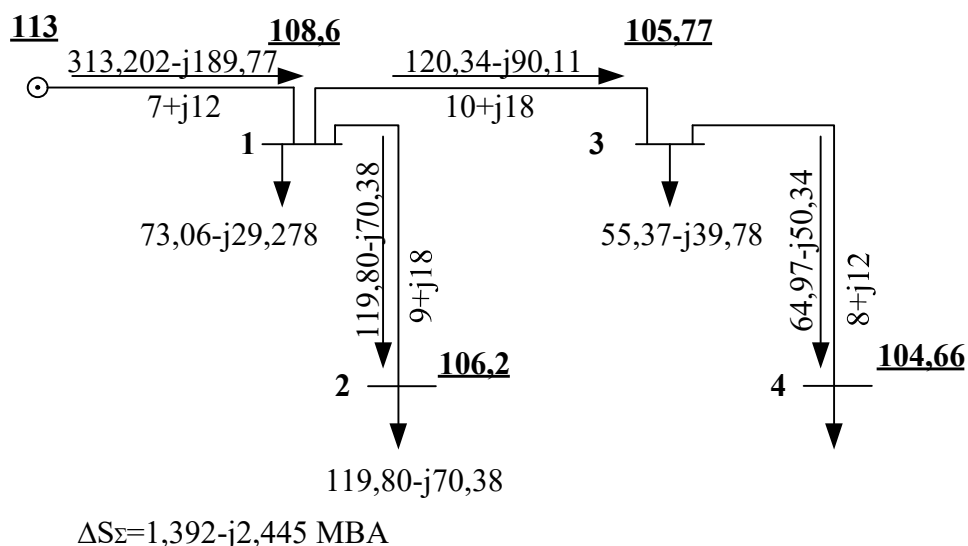


Рис. 3.2. Фрагмент режиму роботи електричної мережі

Розрахункова потужність УППК складатиме:

$$Q_{\text{УППК}_{\text{роз}}} = \frac{(|U_3| + \Delta U_3)^2 - (|U_3|)^2}{2 \cdot (x_{01} + x_{13})} = \frac{(105,77 + 0,6)^2 - (105,77)^2}{2 \cdot (12 + 18)} = 2,121 \text{ (MVAp)}.$$

Визначимо параметри УППК в пункті 5. Паспортні дані конденсаторної установки КЕК-10,5-50: $U_{k0} = 10,5 \text{ кВ}$; $Q_{k0} = 50 \text{ кВАр}$;

Варіант 1 – схема з'єднання в трикутник. Кількість послідовних конденсаторів згідно (3.1) складає:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{k0}} = \frac{126}{10,5} = 12 \text{ (шт)},$$

де $U_{\text{max}} = 126 \text{ кВ}$ згідно до ІЕС 60038-2009 [3].

Фактична напруга на конденсаторі за умови дотримання бажаної напруги в пункті 5 складає:

$$U_{\text{к.ф.}} = \frac{|U_5| + \Delta U_5}{n_{\text{посл}}} = \frac{|105,77| + 0,6}{12} = 8,86 \text{ кВ}.$$

Фактична потужність конденсатора за бажаної напруги в пункті 5:

$$Q_{\text{к.ф.}} = Q_{k0} \left(\frac{U_{\text{к.ф.}}}{U_{k0}} \right)^2 = 50 \cdot \left(\frac{8,86}{10,5} \right)^2 = 0,036 \text{ MVAp}.$$

Потужність одного паралельного кола УПК:

$$Q_{\text{кола}} = n_{\text{посл}} \cdot Q_{\text{к.ф.}} = 12 \cdot 0,036 = 0,428 \text{ MVAp}.$$

Кількість паралельних кіл конденсаторів на фазу УПК:

$$n_{\text{нар}} = \frac{Q_{\text{УППК}_{\text{роз}}}}{3 \cdot Q_{\text{кола}}} = \frac{2,121}{3 \cdot 0,428} = 1,65 \rightarrow n'_{\text{нар}} = 2 \text{ шт.}$$

Таким чином встановлена потужність УППК:

$$Q_{\text{вст}} = 3 \cdot n_{\text{нар}} \cdot n_{\text{посл}} \cdot Q_{k0} = 3 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 50 = 3,6 \text{ МВАр.}$$

Фактична потужність установки УППК:

$$Q_{\text{факт}} = Q_{\text{вст}} \left(\frac{U_{\text{к.ф.}}}{U_{k0}} \right)^2 = 3,6 \left(\frac{8,86}{10,5} \right)^2 = 2,566 \text{ МВАр.}$$

Далі необхідно додати до навантаження 3 пункту потужність установи УППК:

$$S'_3 = S_3 + jQ_{\text{факт}} = 6 - j4 + j2,566 = 6 - j1,434 \text{ (МВА)}.$$

Далі необхідно розрахувати режим роботи мережі будь-яким зручним методом. На рис. 3.3 представлено результат розрахунку режиму роботи мережі з встановленим УППК зі схемою з'єднання в «трикутник».

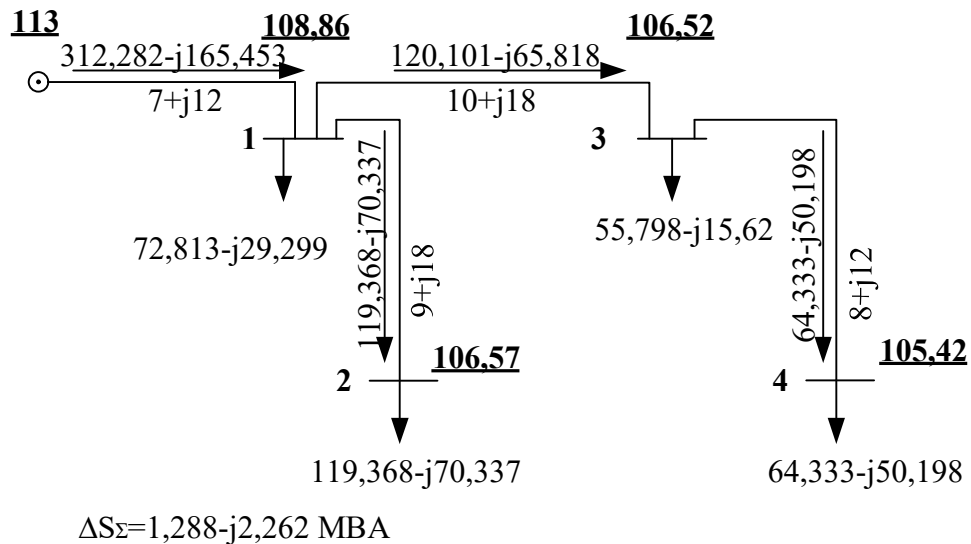


Рис. 3.3. Режимні параметри електричної мережі при встановленні УППК у п.3 у «трикутник»

Похибка у забезпеченні надбавки напруги у пункті 3:

$$\delta U_3 = |U_{3\text{УППК}}| - |U_{3\text{безУППК}}| - \Delta U_3 = 106,52 - 105,77 - 0,6 = 0,152 \text{ кВ.}$$

Варіант 2 – схема з'єднання у «зірку». Кількість послідовних конденсаторів згідно (3.1) складає:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{k0}} = \frac{126}{10,5 \cdot \sqrt{3}} = 6,9 \rightarrow n'_{\text{посл}} = 7 \text{ шт.}$$

Фактична напруга на конденсаторі за умови дотримання бажаної напруги в пункті 5 складає:

$$U_{\text{к.ф.}} = \frac{|U_5| + \Delta U_5}{n_{\text{посл}}} = \frac{|105,77| + 0,6}{7} = 15,196 \text{ кВ.}$$

Фактична потужність конденсатора за бажаної напруги в пункті 5:

$$Q_{к.ф.} = Q_{k0} \left(\frac{U_{к.ф.}}{U_{k0}} \right)^2 = 50 \cdot \left(\frac{15,196}{10,5} \right)^2 = 0,105 \text{ МВАр.}$$

Потужність одного паралельного кола УПК:

$$Q_{кола} = n_{посл} \cdot Q_{к.ф.} = 12 \cdot 0,105 = 0,733 \text{ МВАр.}$$

Кількість паралельних кіл конденсаторів на фазу УПК:

$$n_{пар} = \frac{Q_{УППК_роз}}{3 \cdot Q_{кола}} = \frac{2,121}{3 \cdot 0,733} = 0,95 \rightarrow n'_{пар} = 1(шт).$$

Таким чином встановлена потужність УППК:

$$Q_{вст} = 3 \cdot n'_{пар} \cdot n'_{посл} \cdot Q_{k0} = 3 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 50 = 1,05 \text{ МВАр.}$$

Фактична потужність установки УППК:

$$Q_{факт} = Q_{вст} \left(\frac{U_{к.ф.}}{U_{k0}} \right)^2 = 3,6 \left(\frac{15,196}{10,5} \right)^2 = 2,199 \text{ МВАр.}$$

Далі необхідно додати до навантаження 3 пункту потужність установки УППК:

$$S'_3 = S_3 + jQ_{факт} = 6 - j4 + j2,199 = 6 - j1,801 \text{ МВА.}$$

Далі необхідно розрахувати режим роботи мережі будь-яким зручним методом. На рис. 3.4 представлено результат розрахунку режиму роботи мережі з встановленим УППК зі схемою з'єднання у «зірку».

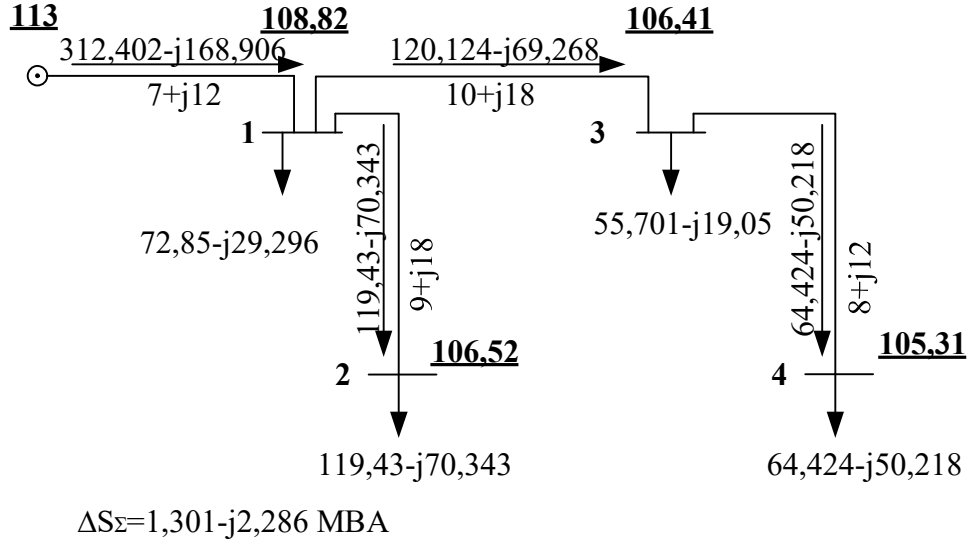


Рис. 3.4. Режимні параметри електричної мережі при встановленні УППК у п.3 у «зірку»

Похибка у забезпеченні надбавки напруги у пункті 3:

$$\delta U_3 = |U_{зУППК}| - |U_{безУППК}| - \Delta U_3 = 106,41 - 105,77 - 0,6 = 0,045 \text{ (кВ)}.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЖАНОГО РІВНЯ НАПРУГИ НА ШИНАХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЄМНІСНИХ УСТАНОВОК ПОЗДОВЖНЬОЇ ТА ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Під поздовжньою компенсацією розуміють зменшення значення індуктивного реактивного опору ЛЕП за рахунок підключення послідовно з ЛЕП батареї статичних конденсаторів.

Опір УПК, який забезпечує бажане значення напруги в пункті електричної мережі:

$$x_{\text{УПК}i}^{\text{роз}} = \frac{(U_{\text{б}f} - U_{\text{факт}f})U_{\text{б}f}}{Q_i}$$

де $U_{\text{б}f}$ – модуль бажаної напруги в f -му пункті; $U_{\text{факт}f}$ – модуль фактичної напруги в f -му пункті; Q_i – реактивна потужність, яка протікає i -ю ділянкою, що перебуває в колі між БП та f -м пунктом.

Аналіз даного виразу свідчить, що опір установки поздовжньої компенсації буде тим менший, чим більший буде потік реактивної потужності по ділянці. Це означає, що ефективність УПК, як засобу регулювання напруги буде підвищуватися по мірі наближення місця встановлення установки до головних ділянок електричної мережі, тобто ділянок пов'язаних з БП.

Установки поздовжньої компенсації вмикаються в розсічку лінії і відбувається компенсація реактивного опору. Установка поперечної компенсації вмикається як навантаження і компенсує реактивну потужність.

Приклад 4.1. Для схеми електричної мережі прикладу 3.1 визначити параметри УПК, що встановлена на ділянці 0-1, необхідної для забезпечення в пунктів 3 надбавки 0,3 кВ у порівнянні із режимом природнього поточкорозподілу (рис.3.2). визначити конфігурацію УПК за умови застосування конденсаторів КЕКП-0,66-80. Перевірити спроектовану УПК за режимними обмеженнями.

Згідно рис. 3.2 напруга в пункті 3 за природнього поточкорозподілу складає 105,77 кВ, а струм на ділянці 0-1 – (313,202-j189,775) А. Тоді потужність кінця ділянки 0-1 становить:

$$\begin{aligned} S_{k0-1} &= J_{0-1} \bar{U}_1 \cdot 10^{-3} = (313,202 - j189,775)(108,53 + j2,43) \cdot 10^{-3} = \\ &= 34,453 - j19,835 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Припустимо, що УПК встановлено на ПС – 1. Тоді розрахунковий опір УПК складатиме:

$$x_{\text{УПК}}^{\text{роз}} = \frac{(|U_3| + \Delta U_3) \cdot \Delta U_3}{Q_{0-1}} = \frac{(105,77 + 0,3) \cdot 0,3}{-19,835} = -1,604 \text{ Ом.}$$

Умовою можливості застосування УПК на ділянці є значення опору УПК менше за реактивний опір ділянки:

$$|x_{УПК}^{роз}| = 1,604 \text{ Ом} < x_{0-1} = 12 \text{ Ом}.$$

Для конденсаторів КЕКП-0,66-80 маємо наступні паспортні дані:

$$Q_{k.ном} = 80 \text{ кВАр}; U_{k.ном} = 0,66 \text{ кВ}.$$

Опір одного конденсатора становить:

$$x_k = -\frac{U_{k.ном}^2}{Q_{k.ном}} = -\frac{0,66}{80 \cdot 10^{-3}} = -5,445 \text{ Ом}.$$

Кількість паралельних кіл конденсаторів в фазу УПК становить:

$$n_{пар} = \frac{I_{\max 0-1} U_{k.ном}}{Q_{k.ном}} = \frac{610 \cdot 0,66}{80} = 5,033 \rightarrow n'_{пар} = 6,$$

де $I_{\max 0-1} = 610 \text{ А}$ – максимально допустимий струм проводу АС-240/32.

Кількість послідовних конденсаторів :

$$n_{посл} = x_{УПК}^{роз} \frac{n_{пар}}{x_k} = (-1,604) \frac{6}{-5,445} = 1,77 \rightarrow n'_{посл} = 2.$$

Таким чином, фактичний опір УПК на ділянці 0-1 складає:

$$x_{УПК}^{факт} = x_k \frac{n'_{посл}}{n'_{пар}} = -5,445 \frac{2}{6} = -1,815 \text{ Ом}.$$

Виконаємо перевірку можливості застосування УПК з фактичним опором:

$$|x_{УПК}^{факт}| = 1,815 \text{ Ом} < x_{0-1} = 12 \text{ Ом}$$

Отже застосування УПК з фактичним опором -1,815 Ом на ділянці 0-1 можливо.

Визначимо вплив УПК на ділянці 0-1. Для цього врахуємо нове значення опору на ділянці 0-1:

$$Z'_{0-1} = Z_{0-1} + jx_{УПК}^{факт} = 7 + j12 - j1,815 = 7 + j10,185 \text{ Ом}.$$

Виконаємо розрахунок усталеного режиму роботи електричної мережі з УПК на ділянці 0-1.

Виконаємо ітераційний розрахунок режиму роботи електричної мережі у струмовій формі.

Ітерація №1.

Розрахунковий струм вузла №1 на першій ітерації (за номінальної напруги) становить:

$$I_{p1}^{(1)} = \frac{S_1}{\bar{U}_{ном}} = \frac{8 - j3}{110} = 72,727 - j27,273 \text{ (А)}.$$

Розрахункові струми решти вузлів визначаємо аналогічно. Результат наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Розрахункові струми вузлів на першій ітерації

Вузол №	1	2	3	4
Струм, А	72,727-j27,273	118,182-j63,636	54,545-j36,364	63,636-j45,455

Струморозподіл в розімкненій мережі визначимо з урахуванням першого закону Кірхгофа:

$$I_{1-2} = I_{p2}^{(1)} = 118,182 - j63,636 \text{ (A)};$$

$$I_{3-4} = I_{p4}^{(1)} = 63,636 - j45,455 \text{ (A)};$$

$$I_{1-3} = I_{3-4} + I_{p2}^{(1)} = 118,182 - j81,818 \text{ (A)};$$

$$I_{0-1} = I_{1-2} + I_{1-3} + I_{p1}^{(1)} = 309,091 - j172,727 \text{ (A)}.$$

Рівень напруги у вузлах на першій ітерації:

$$U_1^{(1)} = U_{БП} - I_{0-1} \cdot Z_{0-1} = 115 - (309,091 - j172,727) \cdot 10^{-3} \cdot (7 + j12) = 109,077 - j1,939 = 109,09e^{-j1,02} \text{ (кВ)};$$

$$U_2^{(1)} = U_1^{(1)} - I_{1-2} \cdot Z_{1-2} = 109,078 - j1,939 - (118,182 - j63,636) \cdot 10^{-3} \cdot (9 + j18) = 106,87 - j3,49 = 106,92e^{-j1,87} \text{ (кВ)};$$

$$U_3^{(1)} = U_1^{(1)} - I_{1-3} \cdot Z_{1-3} = 109,078 - j1,939 - (118,182 - j81,818) \cdot 10^{-3} \cdot (10 + j18) = 106,42 - j3,25 = 106,47e^{-j1,75} \text{ (кВ)};$$

$$U_4^{(1)} = U_3^{(1)} - I_{3-4} \cdot Z_{3-4} = 106,42 - j3,25 - (63,636 - j45,455) \cdot 10^{-3} \cdot (8 + j12) = 105,37 - j3,65 = 105,43e^{-j1,98} \text{ (кВ)}.$$

Сумарне навантаження мережі складає:

$$\sum S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 34 - j19 \text{ (МВА)}.$$

Потужність балансуєного пункту:

$$S_{БП} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_{БП} = 34,927 - j19,518 \text{ (МВА)}.$$

Отже, сумарні втрати потужності в мережі на першій ітерації становлять:

$$\Delta S^{(1)} = S_{\text{БП}} - \sum S = 34,927 - j19,518 - (34 - j19) = 0,927 - j0,518 (\text{МВА}).$$

Виконаємо другу ітерацію розрахунку.

Ітерація №2.

Розрахунковий струм вузла №1 на другій ітерації становить:

$$I_{p1}^{(2)} = \frac{S_1}{\bar{U}_1^{(1)}} = \frac{8 - j3}{109,077 + j1,939} = 72,727 - j27,273$$

Розрахункові струми решти вузлів визначаємо аналогічно. Результат наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Розрахункові струми вузлів на другій ітерації

Вузол №	1	2	3	4
Струм, А	72,831-j28,798	119,377-j69,404	55,18-j39,27	64,713-j49,693

Струморозподіл в розімкненій мережі визначимо з урахуванням першого закону Кірхгофа:

$$I_{1-2} = I_{p2}^{(2)} = 119,377 - j69,404 (\text{А});$$

$$I_{3-4} = I_{p4}^{(2)} = 64,713 - j49,693 (\text{А});$$

$$I_{1-3} = I_{3-4} + I_{p2}^{(2)} = 119,894 - j88,963 (\text{А});$$

$$I_{0-1} = I_{1-2} + I_{1-3} + I_{p1}^{(2)} = 312,101 - j187,165 (\text{А}).$$

Рівень напруги у вузлах на другій ітерації:

$$\begin{aligned} U_1^{(2)} &= U_{\text{БП}} - I_{0-1} \cdot Z_{0-1} = 115 - (312,101 - j187,165) \cdot 10^{-3} \cdot (7 + j12) = \\ &= 108,909 - j1,869 = 108,92 e^{-j0,98} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2^{(2)} &= U_1^{(2)} - I_{1-2} \cdot Z_{1-2} = 108,909 - j1,869 - (119,377 - j69,404) \cdot 10^{-3} \cdot (9 + j18) = \\ &= 106,585 - j3,393 = 106,64 e^{-j1,82} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3^{(2)} &= U_1^{(2)} - I_{1-3} \cdot Z_{1-3} = 108,909 - j1,869 - (119,894 - j88,963) \cdot 10^{-3} \cdot (10 + j18) = \\ &= 106,109 - j3,137 = 106,15 e^{-j1,69} (\text{кВ}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4^{(2)} &= U_3^{(2)} - I_{3-4} \cdot Z_{3-4} = 106,109 - j3,137 - (64,713 - j49,693) \cdot 10^{-3} \cdot (8 + j12) = \\ &= 104,995 - j3,516 = 105,05 e^{-j1,92} (\text{кВ}). \end{aligned}$$

Потужність балансуєчого пункту на другій ітерації:

$$S_{БП} = I_{0-1} \cdot \bar{U}_{БП} = 35,267 - j21,15(MBA).$$

Отже, сумарні втрати потужності в мережі на другій ітерації становлять:

$$\Delta S^{(2)} = S_{БП} - \sum S = 35,267 - j21,15 - (34 - j19) = 1,267 - j2,15(MBA).$$

Перевіряємо умови завершення ітераційного процесу:

$$|\Delta S^{(1)} - \Delta S^{(2)}| = 1,667(MBA)$$

Умова не виконується, необхідно продовжити розрахунок.

Решта ітераційного розрахунку виконується аналогічно. Результати ітераційного розрахунку наведено в табл. 4.3.

Похибка у забезпеченні надбавки напруги у пункт 3 складає:

$$|U_3^{(4)}| - U_{нпр3} - \Delta U_3 = 0,067(kB).$$

На рис. 4.1 представлено результат ітераційного розрахунку режиму роботи мережі без урахування статичних характеристик навантаження.

Таблиця 4.3. Результат ітераційного розрахунку

Ітерація	Параметр	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Ітерація №3	Розрахунковий Струм вузлів, А	72,962-j28,798	119,486-j69,487	55,383-j39,335	65,002-j49,798
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках мережі, А	119,756-j69,487	65,002-j49,798	120,385-j89,133	313,103-j187,418
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	108,9e ^{-j0,98}	106,6e ^{-j1,83}	106,1e ^{-j1,7}	105,0e ^{-j1,93}
	Втрати потужності, МВА	1,381-j2,178			
Ітерація №4	Розрахунковий Струм вузлів, А	72,966-j28,806	119,762-j69,513	55,386-j39,349	65,006-j49,82
	Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
	Струморозподіл по ділянках мережі, А	119,762-j69,513	65,006-j49,82	120,392-j89,169	313,12-j187,488
		Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	Рівень напруги у вузлах, кВ	108,9e ^{-j0,98}	106,6e ^{-j1,83}	106,1e ^{-j1,7}	105,0e ^{-j1,93}
	Втрати потужності, МВА	1,383-j2,186			

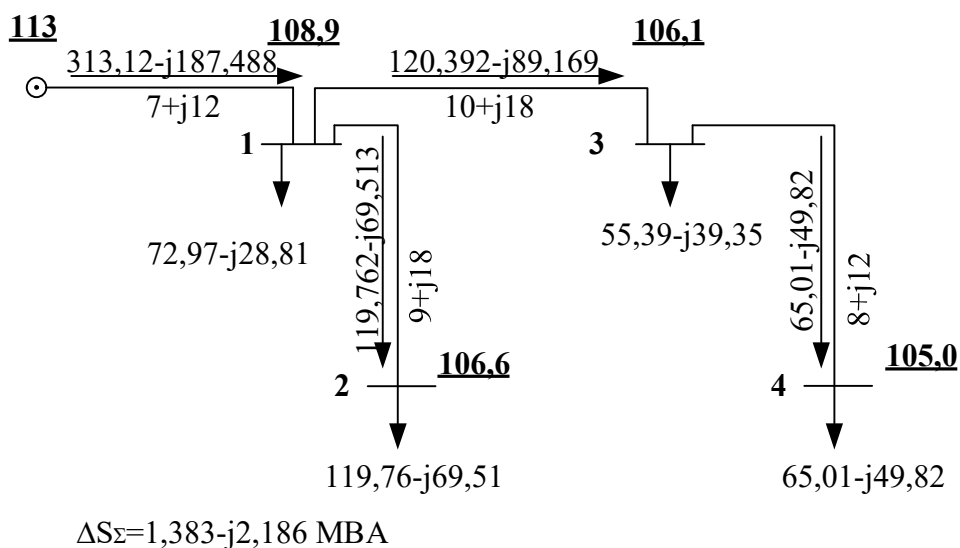


Рис. 4.1. Параметри режиму роботи електричної мережі з УПК на ділянці 0-1

Конденсатори дуже чутливі до перевищення напруги на них. Перевищення напруги на одному конденсаторі понад номінальне значення призводить до протікання через конденсатор струму, яке перевищує номінальне значення струму, що приводить до надмірного розігріву і теплового пробою конденсатора з його руйнуванням. Для недопущення цього необхідно забезпечувати певні умови роботи ємнісної батареї:

1) напруга на виході установки не має перевищувати максимально допустиму для даного класу напруг, тобто:

$$|U_1^{(4)}| < U_{\max}$$

$$108,9 \text{ кВ} < 126 \text{ кВ}$$

2) струм через установку УПК має не перевищувати струму установки:

$$\frac{Q_{k.\text{ном}}}{U_{k.\text{ном}}} n_{\text{нар}} = 727,27 \text{ А} > \frac{|I_{0-1}|}{\sqrt{3}} = 210,71 \text{ А}$$

3) напруга на конденсаторі не має перевищувати номінальну напругу конденсаторної установки:

$$\left| \frac{I_{0-1}}{\sqrt{3} \cdot n_{\text{нар}}} x_k \right| = 0,191 \text{ кВ} > U_{k.\text{ном}} = 0,66 \text{ кВ}$$

Приклад 4.2. Для схеми електричної мережі прикладу 3.1 визначити параметри УПК, для забезпечення в пунктів 3 напруги на рівні 106,5 кВ

у порівнянні із режимом природнього поточкорозподілу (рис.3.2). визначити конфігурацію УППК за умови застосування конденсаторів КЕК-10,5-75-2УЗ.

Для поперечної компенсації необхідно зобразити установку поперечної компенсації як навантаження. Тому виконаємо розрахунок потужності установки компенсації для забезпечення бажаного рівня напруги в пункті 3:

$$Q_{\text{ППК}}^{\text{баж}} = \frac{U_{\text{баж}}^2 - U_{\text{дійсн}}^2}{2 \cdot x_{\text{траси}}} = \frac{U_{\text{баж}}^2 - U_3^2}{2(x_{0-1} + x_{1-3})} = \frac{106,5^2 - 105,77^2}{2(12+18)} = 2,585 \text{ МВАр.}$$

Таким чином, внесемо поправку до навантаження пункту 3:

$$S'_3 = S_3 + jQ_{\text{ППК}}^{\text{баж}} = 6 - j4 + 2,585 = 6 - j1,415 \text{ МВА.}$$

Виконаємо розрахунок усталеного режиму роботи мережі з новим значенням навантаження в пункті 3. Результати наведемо в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Результат ітераційного розрахунку мережі з УППК в п.3

Параметр	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Розрахунковий Струм вузлів, А	72,81-j29,299	119,362-j70,335	55,77- j15,44	64,327-j50,196
Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
Струморозподіл по ділянках ме- режі, А	119,362-j70,335	64,327-j50,196	120,097- j65,636	312,27-j165,27
	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Рівень напруги у вузлах, кВ	108,9e ^{-j1.36}	106,6e ^{-j2.21}	106,53e ^{-j2.2}	105,43e ^{-j2.43}
Втрати потуж- ності, МВА	1.286-j2,26			

Як бачимо, отримали значення напруги у пункті 3 на рівні 106,53 кВ. Виконаємо розрахунок поправки до потужності УППК для більш точної фіксації напруги у пункті 3 на рівні 106,5 кВ. Поправка до потужності УППК складає:

$$\Delta Q_{\text{ППК}} = \frac{U_{\text{баж}}^2 - U_3^2}{2(x_{0-1} + x_{1-3})} = \frac{106,5^2 - 106,53^2}{2(12+18)} = -0,097 \text{ МВАр.}$$

Нове значення потужності УППК:

$$Q_{\text{ППК}} = Q_{\text{ППК}}^{\text{баж}} + \Delta Q_{\text{ППК}} = 2,585 - 0,097 = 2,488 \text{ МВАр.}$$

Тоді нове значення навантаження у пункті 3 складатиме:

$$S'_3 = S_3 + jQ_{\text{ППК}} = 6 - j4 + 2,488 = 6 - j1,512 \text{ МВА.}$$

В табл.4.5 наведемо розраховані рівні напруги у вузлах при нових значення навантаження 3 пункту.

Таблиця 4.5. Рівні напруги в мережі при уточнених значеннях потужності УППК в п.3

	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Рівень напруги у вузлах, кВ	$108,85e^{-j1.36}$	$106,56e^{-j2.2}$	$106,499e^{-j2.2}$	$105,398e^{-j2.4}$

Як бачимо, необхідно внести ще поправки до потужності УППК. Результат розрахунку наведемо в табл. 4.6.

Таблиця 4.6. Рівні напруги в мережі при уточнених значеннях потужності УППК в п.3

	Поправка до потужності УППК, МВАр	Потужність УППК, МВАр	Результуюче наванта- ження п.3, МВА	
Крок 1	-	2,585	6-j1,415	
	Рівень напруги у вузлах, кВ			
	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	108,86e ^{-j1.36}	106,57e ^{-j2.21}	106,53e ^{-j2.2}	105,43e ^{-j2.4}
Крок 2	Поправка до потужності УППК, МВАр	Потужність УППК, МВАр	Результуюче наванта- ження п.3, МВА	
	-0,097	2,488	6-j1,512	
	Рівень напруги у вузлах, кВ			
	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	108,85e ^{-j1.36}	106,568e ^{-j2.2}	106,499e ^{-j2.2}	105,4e ^{-j2.42}
Крок 3	Поправка до потужності УППК, МВАр	Потужність УППК, МВАр	Результуюче наванта- ження п.3, МВА	
	0,003	2,491	6-j1,509	
	Рівень напруги у вузлах, кВ			
	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
	108,85e ^{-j1.36}	106,568e ^{-j2.2}	106,5e ^{-j2.2}	105,4e ^{-j2.42}

Визначимо конфігурацію установки УППК для двох варіантів з'єднання конденсаторів: в «трикутник» та у «зірку».

Напруга та потужність одного конденсатора з конденсаторної батареї КЕК-10,6-75-2У3:

$$U_c = 10,5 \text{ кВ}; \quad Q_c = 75 \text{ МВАр.}$$

Визначимо струм та ємнісну провідність конденсатора:

$$I_c = \frac{Q_c}{U_c} = \frac{75}{10,5} = 7,143 \text{ А};$$

$$x_c = \frac{U_c^2}{Q_c \cdot 10^{-3}} = \frac{10,5^2}{75 \cdot 10^{-3}} = 1470 \text{ Ом.}$$

Кількість паралельних елементів визначаються згідно до струму:

$$I_{з\dot{p}p} = \frac{jQ_{\text{комп}}}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_3} = \frac{j2,491}{\sqrt{3} \cdot (106,422 + j4,081)} = 0,517 + j13,495 \text{ А};$$

$$n_{\text{пар}}^{з\dot{p}p} = \frac{|I_{з\dot{p}p}|}{I_c} = \frac{|0,517 + j13,495|}{7,143} = 1,89 \rightarrow n_{\text{пар}}'^{з\dot{p}p} = 2;$$

$$I_{\text{тpк}} = \frac{jQ_{\text{комп}}}{3 \cdot \bar{U}_3} = \frac{j2,491}{3 \cdot (106,422 + j4,081)} = 0,3 + j7,79;$$

$$n_{\text{пар}}^{\text{тpк}} = \frac{|I_{\text{тpк}}|}{I_c} = \frac{|0,3 + j7,79|}{7,143} = 1,09 \rightarrow n_{\text{пар}}'^{\text{тpк}} = 2.$$

Кількість послідовних елементів визначається рівнем напруги:

$$n_{\text{посл}}^{з\dot{p}p} = \left| \frac{U_3}{\sqrt{3}} \right| \cdot \frac{1}{U_c} = \left| \frac{106,422 - j4,081}{\sqrt{3}} \right| \cdot \frac{1}{10,5} = 5,85 \rightarrow n_{\text{посл}}'^{з\dot{p}p} = 6;$$

$$n_{\text{посл}}^{\text{тpк}} = \frac{|U_3|}{U_c} = \frac{|106,422 - j4,081|}{10,5} = 10,14 \rightarrow n_{\text{посл}}'^{\text{тpк}} = 11.$$

Тоді потужність УППК в залежності від схеми з'єднання становить:

$$Q_B^{з\dot{p}p} = |U_3|^2 \cdot \frac{n_{\text{пар}}^{з\dot{p}p}}{n_{\text{посл}}^{з\dot{p}p}} \cdot \frac{1}{x_c} = |106,422 - j4,081|^2 \cdot \frac{2}{6} \cdot \frac{1}{1470} = 2,57 \text{ МВАp};$$

$$Q_B^{\text{тpк}} = 3 \cdot |U_3|^2 \cdot \frac{n_{\text{пар}}^{\text{тpк}}}{n_{\text{посл}}^{\text{тpк}}} \cdot \frac{1}{x_c} = 3 \cdot |106,422 - j4,081|^2 \cdot \frac{2}{11} \cdot \frac{1}{1470} = 23,15 \text{ МВАp}.$$

Виконаємо розрахунок режиму роботи мережі при встановленні УППК у пункті 3 з визначеною потужністю для з'єднання у «зірку». Результат розрахунку наведемо в табл. 4.7.

Таблиця 4.7. Результат ітераційного розрахунку мережі з УППК в п.3 за схемою з'єднання у «зірку»

Параметр	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Розрахунковий Струм вузлів, А	72,82-j29,298	119,379-j70,337	55,75- j16,315	64,351-j50,202
Ділянка	1-2	3-4	1-3	0-1
Струм розподіл по ділянках ме- режі, А	119,379-j70,337	64,351-j50,202	120,104- j66,516	312,302- j166,15
	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4
Рівень напруги у вузлах, кВ	108,85e ^{-j1.36}	106,46e ^{-j2.2}	106,5e ^{-j2.2}	105,4e ^{-j2.42}
Втрати потуж- ності, МВА	1,29-j2,266			

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. ЗАСТОСУВАННЯ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ З МЕТОЮ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Шунтувальні реактори призначені виключно для споживання надлишків реактивної потужності з метою обмеження рівнів напруги в електричних мережах. В ОЕС України застосовуються, переважно, в електричних мережах номінальною напругою 500 кВ та 750 кВ, хоча принципово існують для всіх номінальної напруги починаючи від 6 кВ.

Шунтувальний реактор являє собою котушку індуктивності з магнітопроводом. В цьому випадку математичною моделлю буде активно-індуктивний контур, в якому активна складова буде являти собою втрати потужності, пов'язані із процесами перемагнічування, і процеси, які зумовлені протіканням електричного струму через обмотку реактора

Приклад 5.1. Для фрагменту електричної мережі (рис.5.1) номінальною напругою 330 кВ Північної енергосистеми ОЕС України розрахувати параметри режиму без застосування шунтувальних реакторів та із встановленням. Визначити найбільш оптимальну ПС для підключення. Вихідні дані наведено в табл. 5.1

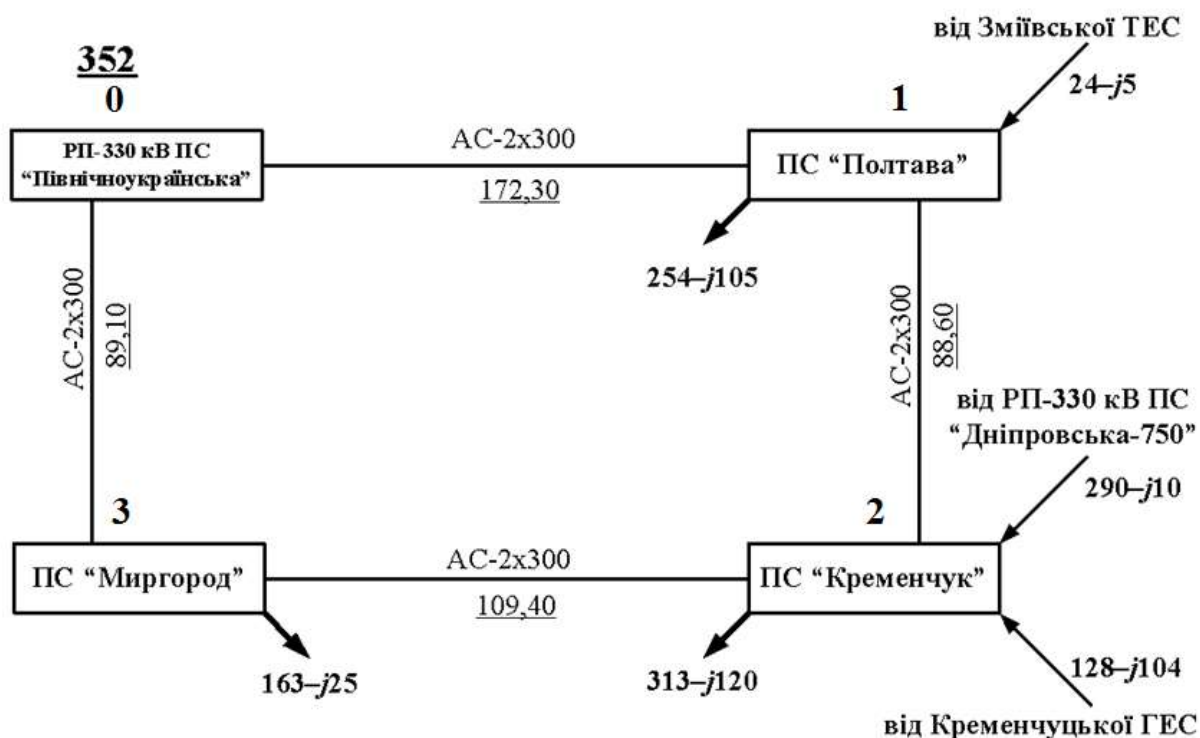


Рис. 5.1. Фрагмент електричної мережі Північної енергосистеми ОЕС України

Таблиця 5.1. Вихідні дані електричної мережі 330 кВ

Ділянка	0-1	1-2	3-2	0-3
Опір, Ом	8,27+j56,51	4,25+j29,06	5,25+j35,88	4,28+j29,22
Провідність, См	$2,74 \cdot 10^6 + j5,23 \cdot 10^4$	$2,35 \cdot 10^5 + j5,66 \cdot 10^4$	$3,85 \cdot 10^6 + j3,73 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^6 + j2,65 \cdot 10^4$
Вузол	0	1	2	3
Розрахункова вужлова провідність, См	$5,02 \cdot 10^6 + j3,94 \cdot 10^4$	$1,31 \cdot 10^5 + j5,44 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^6 + j4,69 \cdot 10^4$	$5,58 \cdot 10^6 + j3,19 \cdot 10^4$

Виконаємо розрахунок режимних параметрів мережі.

На рис.5.2 представлено напрямок контуру, напрямки потоків потужності на ділянках. Потокорозподіл в умовно розімкненій мережі складає:

$$S_{2-3} = S_{n3} = 163 - j25 \text{ (MVA)};$$

$$S_{1-2} = S_{n2} + S_{2-3} = 58 - j31 \text{ (MVA)};$$

$$S_{0-1} = S_{n1} + S_{1-2} = 288 - j131 \text{ (MVA)}.$$

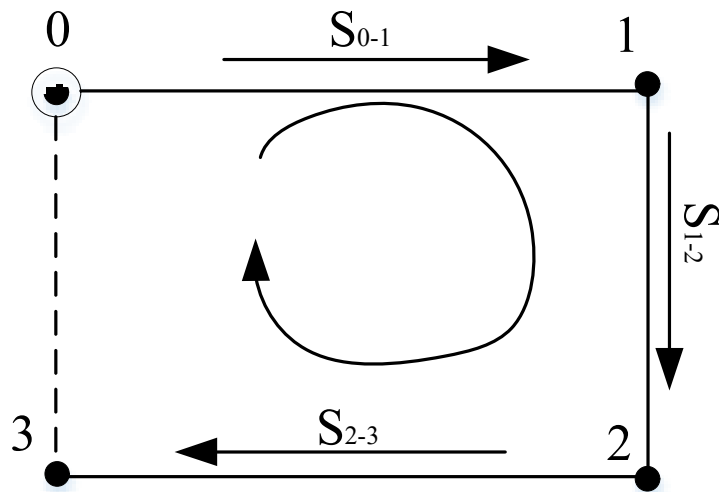


Рис. 5.2. Вибір напрямку контуру та перемички для розрахунку схеми електричної мережі

Складемо контурне рівняння:

$$S_{2-3} \cdot Z_{2-3} + S_{0-1} \cdot Z_{0-1} + S_{1-2} \cdot Z_{1-2} = -S_k (Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{0-3} + Z_{0-1})$$

$$S_k = -158,02 + j61,063 \text{ (MVA)}.$$

Накладаємо контурну потужність на потокорозподіл в умовно розімкненій мережі:

$$S_{2-3осн} = S_{2-3} + S_k = 4,98 + j36,063 \text{ (МВА)};$$

$$S_{1-2осн} = S_{1-2} + S_k = -100,02 + j30,06 \text{ (МВА)};$$

$$S_{0-1осн} = S_{0-1} + S_k = 129,98 - j69,937 \text{ (МВА)};$$

$$S_{0-3осн} = -S_k = 158,02 - j61,063 \text{ (МВА)}.$$

Виконаємо першу ітерацію розрахунку режиму роботи електричної мережі. Задамося початковими наближеннями напруг пунктів, що відповідають номінальній напрузі мережі:

$$U_1^{(0)} = 330 \text{ кВ}; U_2^{(0)} = 330 \text{ кВ}; U_3^{(0)} = 330 \text{ кВ}.$$

Верхній індекс у дужках біля будь-якого параметра означає номер ітерації.

Знайдемо втрати потужності в опорах ділянки 0-1 за основним потокрозподілом потужностей та початковими наближеннями рівні напруги у пунктах:

$$\Delta S_{z0-1}^{(1)} = \frac{P_{0-1осн}^2 + Q_{0-1осн}^2}{0,5(U_0^2 + (U_1^{(0)})^2)}(r_{0-1} - jx_{0-1}) = \frac{129,98^2 + (-69,937)^2}{0,5(352^2 + 330^2)}(8,27 - j56,51) = 1,58 - j10,577 \text{ (МВА)}.$$

Втрати потужності в опорах решти ділянок розраховують аналогічно. Результат розрахунку наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Результати розрахунку втрат потужності в опорах ділянок на першій ітерації

Ділянка	0-1	1-2	3-2	0-3
Втрати потужності, МВА	1,58-j10,577	0,426-j2,911	0,064-j0,437	1,055-j7,204

Знайдемо втрати потужності в провідностях пункту 1 за начальним наближенням рівнів напруги в пунктах:

$$\Delta S_{Y1}^{(1)} = Y_1(U_1^{(0)})^2 = (1,32 \cdot 10^{-5} + j5,44 \cdot 10^{-4}) \cdot 330^2 = 1,429 + j59,286 \text{ (МВА)}.$$

Втрати потужності в провідностях решти ділянок розраховують аналогічно. Результат розрахунку наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Результати розрахунку втрат потужності в провідностях на першій ітерації

Номер пункту	1	2	3
Втрати потужності, МВА	1,459+j59,286	1,489+j51,129	0,607+j34,755

Формуємо додаткові навантаження пунктів від втрат потужності:

$$\Delta S_{n1}^{(1)} = \Delta S_{Y1}^{(1)} + 0,5(\Delta S_{z0-1}^{(1)} + \Delta S_{z1-2}^{(1)}) = 2,416 + j52,542 \text{ (MBA)};$$

$$\Delta S_{n2}^{(1)} = \Delta S_{Y2}^{(1)} + 0,5(\Delta S_{z2-3}^{(1)} + \Delta S_{z1-2}^{(1)}) = 1,734 + j49,456 \text{ (MBA)};$$

$$\Delta S_{n3}^{(1)} = \Delta S_{Y3}^{(1)} + 0,5(\Delta S_{z0-3}^{(1)} + \Delta S_{z2-3}^{(1)}) = 1,167 + j30,935 \text{ (MBA)}.$$

Визначимо поточкорозподіл додаткових навантажень від втрат потужності в пунктах за ділянками. Розрахунок здійснимо за допомогою методу контурних рівнянь. Одержуємо наступне контурне рівняння:

$$\begin{aligned} \Delta S_{n3}^{(1)} \cdot Z_{2-3} + (\Delta S_{n3}^{(1)} + \Delta S_{n2}^{(1)} + \Delta S_{n1}^{(1)}) \cdot Z_{0-1} + (\Delta S_{n3}^{(1)} + \Delta S_{n2}^{(1)}) \cdot Z_{1-2} = \\ = -\Delta S_k (Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{0-3} + Z_{0-1}) \\ \Delta S_k = -2,83 - j72,729 \text{ (MBA)}. \end{aligned}$$

Тоді значення потоків потужності від втрат потужності в пунктах схеми визначимо наступним чином:

$$\Delta S_{\partial 2-3}^{(1)} = \Delta S_{n3}^{(1)} + \Delta S_k = -1,663 - j41,794 \text{ (MBA)};$$

$$\Delta S_{\partial 1-2}^{(1)} = \Delta S_{n3}^{(1)} + \Delta S_{n2}^{(1)} + \Delta S_k = 0,071 + j7,661 \text{ (MBA)};$$

$$\Delta S_{\partial 0-1}^{(1)} = \Delta S_{n3}^{(1)} + \Delta S_{n2}^{(1)} + \Delta S_{n1}^{(1)} + \Delta S_k = 2,487 - j60,204 \text{ (MBA)};$$

$$\Delta S_{\partial 0-1}^{(1)} = -\Delta S_k = 2,83 + j72,729 \text{ (MBA)}.$$

Перевіримо виконання II-го закону Кірхгофа для контуру схеми електричної мережі з метою підтвердження вірності розрахунків:

$$\Delta S_{\partial 2-3}^{(1)} \cdot Z_{2-3} + \Delta S_{\partial 0-1}^{(1)} \cdot Z_{0-1} + \Delta S_{\partial 1-2}^{(1)} \cdot Z_{1-2} - \Delta S_{\partial 0-3}^{(1)} \cdot Z_{0-3} = -1,364 \cdot 10^{-12} + j5,864 \cdot 10^{-14}$$

Таким чином, додатковий поточкорозподіл від втрат потужності в пунктах електричної мережі на першій ітерації розрахунку режиму знайдено вірно.

Накладаємо поточкорозподіл потужностей від додаткових навантажень пунктів на основний поточкорозподіл і отримуємо результуючий поточкорозподіл потужностей на першій ітерації:

$$S_{рез0-1}^{(1)} = S_{0-1осн} + \Delta S_{\partial 0-1}^{(1)} = 132,467 - j9,733 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез1-2}^{(1)} = S_{1-2осн} + \Delta S_{\partial 1-2}^{(1)} = -99,949 + j37,724 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез2-3}^{(1)} = S_{2-3осн} + \Delta S_{\partial 2-3}^{(1)} = 3,317 - j5,731 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез0-3}^{(1)} = S_{0-3осн} + \Delta S_{\partial 0-3}^{(1)} = 160,85 + j11,666 \text{ (MBA)}.$$

Знак «+» стоїть між складовими оскільки напрямок основного поточкорозподіл та поточкорозподіл від додаткових навантажень пунктів співпадають.

Визначимо рівні напруги в пунктах схеми на першій ітерації розрахунку:

$$U_1^{(1)} = \sqrt{U_0^2 - 2(P_{рез0-1}^{(1)} \cdot r_{0-1} - Q_{рез0-1}^{(1)} \cdot x_{0-1})} = 345,26 \text{ (кВ)};$$

$$U_2^{(1)} = \sqrt{(U_1^{(1)})^2 - 2(P_{рез1-2}^{(1)} \cdot r_{1-2} - Q_{рез1-2}^{(1)} \cdot x_{1-2})} = 349,6 \text{ (кВ)};$$

$$U_3^{(1)} = \sqrt{U_0^2 - 2(P_{рез0-3}^{(1)} \cdot r_{0-3} - Q_{рез0-3}^{(1)} \cdot x_{0-3})} = 349,0 \text{ (кВ)}.$$

Виконаємо перевірку збіжності ітераційного процесу за критерієм зміни модулів напруги в пунктах схеми:

$$\Delta U_1^{(1)} = \frac{|U_1^{(1)} - U_1^{(0)}|}{U_1^{(0)}} \cdot 100\% = 52\%;$$

$$\Delta U_2^{(1)} = \frac{|U_2^{(1)} - U_2^{(0)}|}{U_2^{(0)}} \cdot 100\% = 66\%;$$

$$\Delta U_3^{(1)} = \frac{|U_3^{(1)} - U_3^{(0)}|}{U_3^{(0)}} \cdot 100\% = 64\%.$$

Оскільки зміни модулів напруги перевищують 2% необхідно продовжити розрахунок і виконати наступну ітерацію.

Визначимо втрати потужності в схемі на першій ітерації. Визначимо потужність БП на першій ітерації:

$$S_{БП}^{(1)} = S_{рез0-1}^{(1)} + S_{рез0-3}^{(1)} + 0,5(\Delta S_{z0-1}^{(1)} + \Delta S_{z0-3}^{(1)}) + Y_0 \cdot U_{БП}^2 = 295,24 + j41,876 \text{ (МВА)};$$

Сумарна потужність усіх навантажень мережі:

$$S_{\Sigma} = S_{н1} + S_{н2} + S_{н3} = 288 - j131 \text{ (МВА)}.$$

Тоді сумарні втрати потужності в схемі на першій ітерації розрахунку складуть:

$$\Delta S_{\Sigma}^{(1)} = S_{БП}^{(1)} - \Delta S_{\Sigma} = 7,24 + j172,867 \text{ (МВА)}.$$

Виконаємо другу ітерацію розрахунку режиму електричної мережі.

Знайдемо втрати потужності в опорах за резльтуючим поточкорозподілом потужностей та рівнями напруги в пунктах на першій ітерації розрахунку. Для ділянки 0-1 отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta S_{z0-1}^{(2)} &= \frac{P_{рез0-1}^2 + Q_{рез0-1}^2}{0,5(U_0^2 + (U_1^{(1)})^2)} (r_{0-1} - jx_{0-1}) = \frac{132,467^2 + (-9,733)^2}{0,5(352^2 + 347,3^2)} (8,27 - j56,51) = \\ &= 1,193 - j8,155 \text{ (МВА)}. \end{aligned}$$

Втрати потужності в опорах решти ділянок розраховують аналогічно. Результат розрахунку наведено у табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Результати розрахунку втрат потужності в опорах ділянок на другій ітерації

Ділянка	0-1	1-2	3-2	0-3
Втрати потужності, МВА	1,193-j8,155	0,901-j6,151	0,002-j0,013	0,397-j2,716

Знайдемо втрати потужності в провідностях пункту 1:

$$\Delta S_{Y1}^{(2)} = Y_1(U_1^{(2)})^2 = (1,32 \cdot 10^{-5} + j5,44 \cdot 10^{-4}) \cdot 347,29^2 = 1,582 + j65,663 \text{ (МВА)}.$$

Втрати потужності в провідностях решти ділянок розраховують аналогічно. Результат розрахунку наведено у табл. 6.5.

Таблиця 5.5. Результати розрахунку втрат потужності в провідностях на другій ітерації

Номер пункту	1	2	3
Втрати потужності, МВА	1,582+j65,663	1,691+j58,057	0,687+j39,322

Формуємо додаткові навантаження пунктів від втрат потужності:

$$\Delta S_{n1}^{(2)} = \Delta S_{Y1}^{(2)} + 0,5(\Delta S_{z0-1}^{(2)} + \Delta S_{z1-2}^{(2)}) = 2,378 + j60,228 \text{ (МВА)};$$

$$\Delta S_{n2}^{(2)} = \Delta S_{Y2}^{(2)} + 0,5(\Delta S_{z2-3}^{(2)} + \Delta S_{z1-2}^{(2)}) = 1,891 + j56,693 \text{ (МВА)};$$

$$\Delta S_{n3}^{(2)} = \Delta S_{Y3}^{(2)} + 0,5(\Delta S_{z0-3}^{(2)} + \Delta S_{z2-3}^{(2)}) = 1,139 + j36,24 \text{ (МВА)}.$$

Визначимо потекорозподіл додаткових навантажень від втрат потужності в пунктах за ділянками. Розрахунок здійснимо за допомогою методу контурних рівнянь. Одержуємо наступне контурне рівняння:

$$\begin{aligned} \Delta S_{n3}^{(2)} \cdot Z_{2-3} + (\Delta S_{n3}^{(2)} + \Delta S_{n2}^{(2)} + \Delta S_{n1}^{(2)}) \cdot Z_{0-1} + (\Delta S_{n3}^{(2)} + \Delta S_{n2}^{(2)}) \cdot Z_{1-2} = \\ = -\Delta S_k (Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{0-3} + Z_{0-1}) \\ \Delta S_k = -2,881 - j83,998 \text{ (МВА)}. \end{aligned}$$

Тоді значення потоків потужності від втрат потужності в пунктах схеми визначимо наступним чином:

$$\Delta S_{02-3}^{(2)} = \Delta S_{n3}^{(2)} + \Delta S_k = -1,73 - j47,758 \text{ (МВА)};$$

$$\Delta S_{01-2}^{(2)} = \Delta S_{n3}^{(2)} + \Delta S_{n2}^{(2)} + \Delta S_k = 0,148 + j8,935 \text{ (МВА)};$$

$$\Delta S_{00-1}^{(2)} = \Delta S_{n3}^{(2)} + \Delta S_{n2}^{(2)} + \Delta S_{n1}^{(2)} + \Delta S_k = 2,526 + j69,162 \text{ (МВА)};$$

$$\Delta S_{00-1}^{(2)} = -\Delta S_k = 2,881 + j83,998 \text{ (МВА)}.$$

Перевіримо виконання II-го закону Кірхгофа для контуру схеми електричної мережі з метою підтвердження вірності розрахунків:

$$\Delta S_{\partial 2-3}^{(2)} \cdot Z_{2-3} + \Delta S_{\partial 0-1}^{(2)} \cdot Z_{0-1} + \Delta S_{\partial 1-2}^{(2)} \cdot Z_{1-2} - \Delta S_{\partial 0-3}^{(2)} \cdot Z_{0-3} = 9,09 \cdot 10^{-13} - j2,27 \cdot 10^{-13}$$

Таким чином, додатковий поточкорозподіл від втрат потужності в пунктах електричної мережі на другій ітерації розрахунку режиму знайдено вірно.

Накладаємо поточкорозподіл потужностей від додаткових навантажень пунктів на основний поточкорозподіл і отримуємо результуючий поточкорозподіл потужностей на другій ітерації:

$$S_{рез0-1}^{(2)} = S_{0-1осн} + \Delta S_{\partial 0-1}^{(2)} = 132,506 - j0,775 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез1-2}^{(2)} = S_{1-2осн} + \Delta S_{\partial 1-2}^{(2)} = -99,872 + j38,998 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез2-3}^{(2)} = S_{2-3осн} + \Delta S_{\partial 2-3}^{(2)} = 3,237 - j11,695 \text{ (MBA)};$$

$$S_{рез0-3}^{(2)} = S_{0-3осн} + \Delta S_{\partial 0-3}^{(2)} = 160,901 + j22,935 \text{ (MBA)}.$$

Визначимо рівні напруги в пунктах схеми на другій ітерації розрахунку:

$$U_1^{(2)} = \sqrt{U_0^2 - 2(P_{рез0-1}^{(2)} \cdot r_{0-1} - Q_{рез0-1}^{(2)} \cdot x_{0-1})} = 346,58 \text{ (кВ)};$$

$$U_2^{(2)} = \sqrt{(U_1^{(2)})^2 - 2(P_{рез1-2}^{(2)} \cdot r_{1-2} - Q_{рез1-2}^{(2)} \cdot x_{1-2})} = 351,04 \text{ (кВ)};$$

$$U_3^{(2)} = \sqrt{U_0^2 - 2(P_{рез0-3}^{(2)} \cdot r_{0-3} - Q_{рез0-3}^{(2)} \cdot x_{0-3})} = 349,86 \text{ (кВ)}.$$

Виконаємо перевірку збіжності ітераційного процесу за критерієм зміни модулів напруги в пунктах схеми:

$$\Delta U_1^{(2)} = \frac{|U_1^{(2)} - U_1^{(1)}|}{U_1^{(1)}} \cdot 100\% = 0,4\%;$$

$$\Delta U_2^{(2)} = \frac{|U_2^{(2)} - U_2^{(1)}|}{U_2^{(1)}} \cdot 100\% = 0,4\%;$$

$$\Delta U_3^{(2)} = \frac{|U_3^{(2)} - U_3^{(1)}|}{U_3^{(1)}} \cdot 100\% = 0,3\%.$$

Зміна модулів напруги в усіх пунктах не перевищують 2%.

Визначимо втрати потужності в схемі на другій ітерації. Визначимо потужність БП на першій ітерації:

$$S_{БП}^{(1)} = S_{рез0-1}^{(1)} + S_{рез0-3}^{(2)} + 0,5(\Delta S_{z0-1}^{(2)} + \Delta S_{z0-3}^{(2)}) + Y_0 \cdot U_{БП}^2 = 295,076 + j63,832 \text{ (MBA)};$$

Сумарна потужність усіх навантажень мережі:

$$S_{\Sigma} = S_{н1} + S_{н2} + S_{н3} = 288 - j131 \text{ (MBA)}.$$

Тоді сумарні втрати потужності в схемі на першій ітерації розрахунку складуть:

$$\Delta S_{\Sigma}^{(1)} = S_{БП}^{(1)} - \Delta S_{\Sigma} = 7,076 + j194,832 \text{ (МВА)}.$$

Зміна сумарних втрат потужності на другій ітерації розрахунку складуть:

$$\partial S_{\Sigma}^{(2)} = \frac{|\Delta S_{\Sigma}^{(2)} - \Delta S_{\Sigma}^{(1)}|}{|\Delta S_{\Sigma}^{(1)}|} \cdot 100\% = 12,7\%.$$

Оскільки сумарні втрати потужності на другій ітерації перевищують 2%, відповідно до даного критерію необхідно продовжити розрахунок та виконати наступну ітерацію.

Третю та наступні ітерації розрахунку режиму роботи електричної мережі виконаємо у табличній формі (табл. 5.6).

Результуючий потік розподіл потужностей та режим напруги в пунктах мережі на останній ітерації розрахунку представлено на рис.5.3

Таблиця 5.6 Результати ітераційного розрахунку параметрів режиму роботи електричної мережі

Параметр	Значення	Ітерація 3	Ітерація 4
Потокорозподіл за ділянками мережі, S_{i-j} , МВА	0-1	132,52-j0,162	132,52-j0,123
	1-2	-99,865+j39,022	-99,865+j39,022
	2-3	3,227-j12,168	3,226-j12,99
	0-3	160,923+j23,563	160,925+j23,601
Модуль напруги в пунктах, $ U_i $, кВ	1	346,7	346,68
	2	351,1	351,14
	3	349,9	349,91
Сумарні втрати потужності, ΔS_{Σ} , МВА		7,084+j193,33	7,087+j193,4

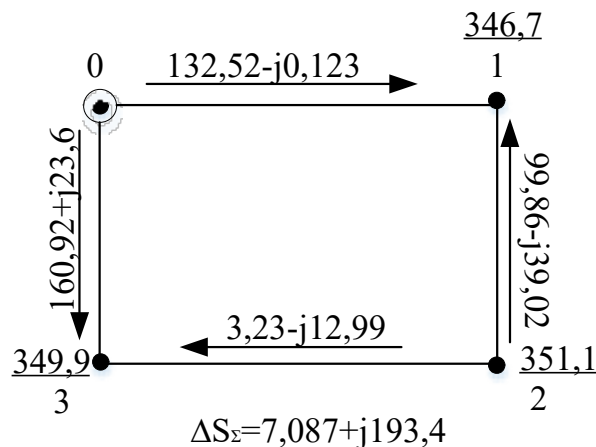


Рис. 5.3. Результуючий потік розподіл потужностей та режим напруги в пунктах мережі

Розглянемо приклад встановлення шунтувального реактора УТР-18000/330 (РТДЦУ-180000/330) (рис.5.4), паспортні дані якого представлені в табл.6.7.

По черзі будемо підключати реактора до кожної підстанції у двох варіантах:

- реактором керувати неможливо;
- реактором керувати можливо (в маркуванні літера «У» вказує про можливість керування потужністю реактора).

Таблиця 5.7 Паспортні дані шунтувального реактора

УТР-180000/330			
Номінальна реактивна потужність, кВАр	Номінальна напруга, кВ	Втрати потужності холостого ходу, кВт	Втрати потужності навантажувальні, кВт
180000	347	138	615



Рис. 5.4. Шунтувальний реактор УТР-180000/330

Варіант №1 – керувати потужністю реактора неможливо. В такому випадку представимо реактор, як поперечну провідність, при цьому навантажувальні втрати перенесемо на провідність. Тоді активна, реактивна та повна провідності реактора складають відповідно:

$$G_p = \frac{\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}}{U_{ном}^2} = \frac{(138 + 615) \cdot 10^{-3}}{347^2} = 6,254 \cdot 10^{-6} (См);$$

$$B_p = -\frac{Q_p}{U_{ном}^2} = -\frac{180000 \cdot 10^{-3}}{347^2} = -1,495 \cdot 10^{-3} (См);$$

$$Y_p = G_p + jB_p = 6,254 \cdot 10^{-6} - j1,495 \cdot 10^{-3} (См).$$

Встановимо реактор на ПС Полтава (пункт 1) та порахуємо режим роботи електричної мережі. При цьому до значення розрахункової провідності пункту №1 необхідно додати провідність реактора:

$$Y_1 = Y_{p1} + Y_p = 13,12 \cdot 10^{-6} + j5,444 \cdot 10^{-4} + 6,254 \cdot 10^{-6} - j1,495 \cdot 10^{-3} = 1,937 \cdot 10^{-5} - j9,505 \cdot 10^{-4} (См).$$

При зміні пункту встановлення некерованого реактора будуть змінюватись провідності тих пунктів, решта вихідних параметрів будуть незмінними.

Алгоритм розрахунку мережі в даному випадку буде співпадати з наведеним вище розрахунком. В табл. 5.8 наведемо розраховані параметри режиму мережі при почерговому підключенні реактора до ПС Полтава, ПС Кременчук та ПС Миргород.

Таблиця 5.8 *Значення параметрів режиму при різних варіантах встановлення шунтувального реактора*

	Вихідний режим	Реактор на ПС Полтава	Реактор на ПС Кременчук	Реактор на ПС Миргород
Модуль напруги на ПС Полтава, кВ	346,68	328,58	333,68	340,57
Модуль напруги на ПС Кременчук, кВ	351,14	338,59	332,05	342,25
Модуль напруги на ПС Миргород, кВ	349,91	344,23	341,32	337,74
Втрати потужності в мережі, МВА	7,087+j193,401	7,994+j16,394	7,971+j12,184	8,095+j11,749

Розглянемо варіант коли керування потужністю шунтувального реактора можливий. В такому випадку ШР представимо як навантаження. Для спрощення потужність холостого ходу будемо вважати незмінною.

Порахуємо два варіанти:

1. Потужність шунтувального реактору складає 100 % встановленої:

$$S_{Q1} = (\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}) - jQ_p = ((138 + 615) - j180000) \cdot 10^{-3} = 0,753 - j180 \text{ (MBA)}.$$

2. Потужність шунтувального реактора складає 50% встановленої:

$$S_Q = (\Delta P_{xx} + 0,25 \cdot \Delta P_{кз}) - j0,5 \cdot Q_p = ((138 + 0,25 \cdot 615) - j0,5 \cdot 180000) \cdot 10^{-3} = 0,292 - j90 \text{ (MBA)}.$$

Алгоритм розрахунку мережі в даному випадку буде співпадати з наведеним вище розрахунком. В табл. 5.9 наведемо розраховані параметри режиму мережі при почерговому підключенні керованого реактора до ПС Полтава, ПС Кременчук та ПС Миргород.

Таблиця 5.9 Значення параметрів режиму при різних варіантах встановлення шунтувального реактора

	Вихідний режим	Реактор на ПС Полтава		Реактор на ПС Кременчук		Реактор на ПС Миргород	
		50%	100%	50%	100%	50%	100%
Модуль напруги на ПС Полтава, кВ	346,68	336,19	325,15	339,27	331,51	343,31	352,71
Модуль напруги на ПС Кременчук, кВ	351,14	343,74	335,99	340,47	329,21	346,33	359,96
Модуль напруги на ПС Миргород, кВ	349,91	346,48	342,92	344,97	339,79	343,38	362,08
Втрати потужності в мережі, MBA	7,087+ j193,40	8,625+ j174,60	10,581+ j152,78	8,42+ j175,69	10,18+ j154,86	8,055+ j181,82	7,717+ j198,39

ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЖАНОГО РІВНЯ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ РПН ТА ПБЗ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Приклад 6.1. Виконати розрахунок номеру регульовального відгалуження та фактичної напруги на шинах НН триобмоткового трансформатора типу ТДТН-25000/150 з метою забезпечення на шинах НН бажаної напруги 10,5 кВ. Напруга на шинах ВН трансформатора становить 155 кВ, навантаження обмотки СН трансформатора становить 15-j4 МВА, навантаження обмотки НН 6-j1 МВА. Виконати перевірку трансформатора за умовою перезбудження та забезпечити допустимий режим його роботи у разі порушення умови.

Паспортні дані трансформатора ТДТН-25000/150 представлено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 Паспортні дані трансформатора ТДТН-25000/150

Тип	S _{ном} , МВА	Межі регулювання	U _{ном} , обмоток, кВ			U _к , %			ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I _x , %
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н			
ТДТН-25000/150	25	$\pm 8 \times 1,5$ %	158	38,5	11	10,5	18	6	145	34	0,9

Розрахуємо параметри схеми заміщення трансформатора (рис.6.1).

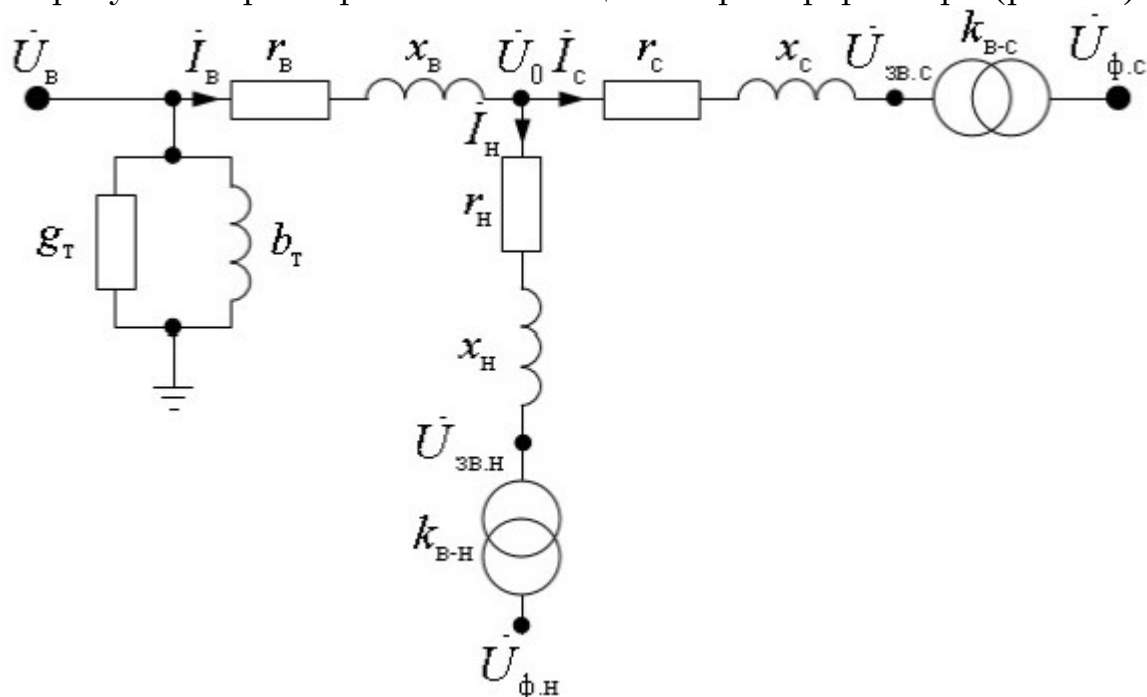


Рис. 6.1. Шунтувальний реактор УТР-180000/330

Повна провідність трансформатора:

$$Y_T = \frac{I_x \cdot 10^{-2} \cdot S_{ном}}{U_{ном.B}^2} = \frac{0,9 \cdot 10^{-2} \cdot 25}{158^2} = 9,013 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Активна провідність трансформатора складає:

$$G_T = \frac{\Delta P_x \cdot 10^{-3}}{U_{ном.B}^2} = \frac{34 \cdot 10^{-3}}{158^2} = 1,362 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Реактивна провідність трансформатора:

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = -\sqrt{(9,013 \cdot 10^{-6})^2 - (1,362 \cdot 10^{-6})^2} = -8,909 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Фіктивні значення напруги к.з.:

$$U_{к.B} = 0,5(U_{к.в-с} + U_{к.в-н} - U_{к.с-н}) = 11,25\%$$

$$U_{к.C} = U_{к.в-с} - U_{к.B} = -0,75\%$$

$$U_{к.H} = U_{к.в-н} - U_{к.B} = 6,75\%$$

Тоді повний опір обмоток трансформатора складають:

$$Z_B = \frac{U_{к.B} \cdot U_{ном.B}^2}{S_{ном}} = \frac{11,25 \cdot 10^{-2} \cdot 158^2}{25} = 112,338 \text{ Ом;}$$

$$Z_C = \frac{U_{к.C} \cdot U_{ном.B}^2}{S_{ном}} = \frac{0 \cdot 10^{-2} \cdot 158^2}{25} = 0 \text{ Ом;}$$

$$Z_H = \frac{U_{к.H} \cdot U_{ном.B}^2}{S_{ном}} = \frac{6,75 \cdot 10^{-2} \cdot 158^2}{25} = 67,403 \text{ Ом.}$$

Активний опір обмоток трансформатора:

$$R_B = R_C = R_H = R_T = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot U_{ном.B}^2}{2 \cdot S_{ном}^2} = \frac{145 \cdot 10^{-3} \cdot 158^2}{2 \cdot 25^2} = 2,896 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір трансформатора:

$$X_B = -\sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = -\sqrt{(112,338)^2 - (2,896)^2} = 112,301 \text{ Ом.}$$

$$X_C = 0$$

$$X_H = -\sqrt{Z_H^2 - R_H^2} = -\sqrt{(67,403)^2 - (2,896)^2} = 67,341$$

Розрахуємо зведену напругу на шинах НН ітераційним методом.

Ітерація №1.

Початкові наближення:

$$U_{зв.нн} = U_B = 155 \text{ кВ; } U_{зв.сн} = U_B = 155 \text{ кВ.}$$

1. Фазний струм, зведений до умов обмотки ВН:

$$I_{н.фазн} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_{зв.нн}} = \frac{6 - j1}{\sqrt{3} \cdot 155} = 22,349 - j3,725 \text{ А;}$$

$$I_{с.фазн} = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_{зв.сн}} = \frac{15 - j4}{\sqrt{3} \cdot 155} = 55,873 - j14,899 \text{ А;}$$

$$I_{в.фазн} = I_{н.фазн} + I_{с.фазн} = 78,222 - j18,624 \text{ А.}$$

2. Падіння напруги в обмотках трансформатора:

$$\Delta U_B = \sqrt{3} \cdot I_{в.фазн} (R_B + jX_B) = \sqrt{3} \cdot (84,8 - j20,2)(2,896 + j112,301) = 4,016 + j15,127 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_B| = 15,651 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_H = \sqrt{3} \cdot I_{н.фазн} (R_H + jX_H) = \sqrt{3} \cdot (24,2 - j4)(2,896 + j67,341) = 0,547 + j2,588 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_H| = 2,645 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_C = \sqrt{3} \cdot I_{с.фазн} (R_C + jX_C) = \sqrt{3} \cdot (60,6 - j16,1)(2,896 + j0) = 0,28 - j0,075 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_C| = 0,29 \text{ кВ.}$$

3. Зведена напруга шин СН та НН:

$$U_{зв.нн} = U_B - \Delta U_B - \Delta U_H = 155 - (4,016 + j15,127) - (0,547 + j2,588) = 150,437 - j17,715 \text{ кВ.}$$

$$U_{зв.сн} = U_B - \Delta U_B - \Delta U_C = 155 - (4,016 + j15,127) - (0,28 - j0,075) = 150,704 - j15,052 \text{ кВ.}$$

4. Перевірка можливості завершення ітераційного розрахунку:

$$\delta U_{зв.нн} = |U_{зв.нн} - U'_{зв.нн}| = |150,437 - j17,715 - 155| = 18,293 \text{ кВ.}$$

$$\delta U_{зв.сн} = |U_{зв.сн} - U'_{зв.сн}| = |150,704 - j15,052 - 155| = 15,653 \text{ кВ.}$$

Оскільки критерій завершення ітераційного процесу недотримується переходимо до наступної ітерації.

Ітерація №2.

1. Фазний струм, зведений до умов обмотки ВН:

$$I_{н.фазн} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_{зв.нн}} = \frac{6 - j1}{\sqrt{3} \cdot (150,437 + j17,715)} = 22,266 - j6,46 \text{ А.}$$

$$I_{с.фазн} = \frac{S_C}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_{зв.сн}} = \frac{15 - j4}{\sqrt{3} \cdot (150,704 + j15,052)} = 55,382 - j20,856$$

$$I_{в.фазн} = I_{н.фазн} + I_{с.фазн} = 77,649 - j27,315 \text{ А.}$$

2. Падіння напруги в обмотках трансформатора:

$$\Delta U_B = \sqrt{3} \cdot I_{в.фазн} (R_B + jX_B) = \sqrt{3} \cdot (77,649 - j27,315)(2,896 + j112,301) = 5,704 + j14,971 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_B| = 16,021 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_C = \sqrt{3} \cdot I_{с.фазн} (R_C + jX_C) = \sqrt{3} \cdot (55,382 - j20,856)(2,896 + j0) = 0,278 - j0,105 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_C| = 0,297 \text{ кВ.}$$

$$\Delta U_H = \sqrt{3} \cdot I_{н.фазн} (R_H + jX_H) = \sqrt{3} \cdot (22,266 - j6,46)(2,896 + j67,341) = 0,8965 + j2,565 \text{ кВ};$$

$$|\Delta U_H| = 2,707 \text{ кВ.}$$

3. Зведена напруга шин СН та НН:

$$U_{зв.НН} = U_B - \Delta U_B - \Delta U_H = 155 - (5,704 + j14,971) - (0,865 + j2,568) = 148,43 - j17,536 \text{ кВ.}$$

$$U_{зв.СН} = U_B - \Delta U_B - \Delta U_C = 155 - (5,704 + j14,971) - (0,278 - j0,105) = 149,018 - j14,867 \text{ кВ.}$$

4. Перевірка можливості завершення ітераційного розрахунку:

$$\delta U_{зв.НН} = |U_{зв.НН} - U'_{зв.НН}| = |(148,43 - j17,536) - (150,437 - j17,715)| = 2,015 \text{ кВ.}$$

$$\delta U_{зв.СН} = |U_{зв.СН} - U'_{зв.СН}| = |(149,018 - j14,867) - (150,704 - j15,052)| = 1,696 \text{ кВ.}$$

Оскільки критерій завершення ітераційного процесу недотримується переходимо до наступної ітерації.

Результат ітераційного розрахунку представимо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 Результат ітераційного розрахунку

		Фазний струм, зведений до умов обмотки ВН, А	Модуль падіння напруги в обмотках трансформатора, кВ	Зведена напруга шин	
				СН	НН
Ітерація №3	Обмотка ВН	77,946-j27,411	16,082	148,998-j14,924	148,398-j17,628
	Обмотка СН	55,382-j20,856	0,297		
	Обмотка НН	22,564-j6,555	2,743		
Ітерація №4	Обмотка ВН	78,568-j27,753	16,219	148,324-j17,747	148,925-j15,042
	Обмотка СН	56,006-j21,162	0,3		
	Обмотка НН	22,562-j6,591	2,744		
Ітерація №5	Обмотка ВН	78,58-j27,757	16,221	148,323-j17,75	148,924-j15,044
	Обмотка СН	56,014-j21,165	0,3		
	Обмотка НН	22,566-j6,593	2,745		

Визначимо номер регулювального відгалуження РПН:

$$N_{РПН} = \frac{1}{\omega_{0.РПН}} \left(\frac{|U_{зв.нн}| \cdot U_{ном.н}}{U_{ном.в} \cdot U_{ф.б.н}} - 1 \right) = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{149,384 \cdot 11}{158 \cdot 11} - 1 \right) = -3,64$$

$$N_{РПН} \rightarrow N'_{РПН} = -4$$

Номер регулювального відгалуження є допустимим за регулювальною формулою РПН.

Виконаємо перевірку трансформатора на недопущення перезбудження. Для цього розрахуємо коефіцієнт завантаження трансформатора:

$$\beta = \frac{|S_n|}{S_{ном}} = \frac{|(6 - j1)|}{25} = 0,243.$$

Оскільки коефіцієнт завантаження трансформатора менше 0,25, тоді $\delta_{U_РПН} = 1,1$. У випадку коли $\beta > 0,25 \rightarrow \delta_{U_РПН} = 1,05$.

Перевіримо трансформатор на перезбудження:

$$|U_B - \Delta U_B| < \delta_{U_РПН} (U_{ном.в} (1 + \omega_{0.РПН} \cdot N'_{РПН} \cdot 10^{-2}))$$

$$|155 - (5,795 + j15,151)| < 1,05(11(1 + 1,5 \cdot (-4) \cdot 10^{-2}))$$

$$149,97 \text{ кВ} < 163,37 \text{ кВ}$$

Нерівність виконується, а отже трансформатор перебуває у допустимому режимі роботи.

Коефіцієнт трансформації за обраного $N'_{РПН}$:

$$k_T = \frac{U_{ном.н}}{U_{ном.в} (1 + \omega_{0.РПН} \cdot N'_{РПН} \cdot 10^{-2})} = \frac{11}{158(1 + 1,5 \cdot (-4) \cdot 10^{-2})} = 0,074.$$

Таким чином фактична напруга на шинах НН складає:

$$U_{ф.нн} = |U_{зв.нн}| \cdot k_T = |148,323 - j17,75| \cdot 0,074 = 11,06 \text{ кВ}.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА №7. РОЗРАХУНОК РЕГУЛЮВАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Приклад 7.1. Виконати розрахунок регулювального діапазону трансформатора ТДТН-40000/110-У1, встановленого у пункті 5 схеми електричної мережі, зображеної на рис.7.1. Бажаний рівень напруги на стороні НН – 10,5 кВ, а на стороні СН – 37,5 кВ.

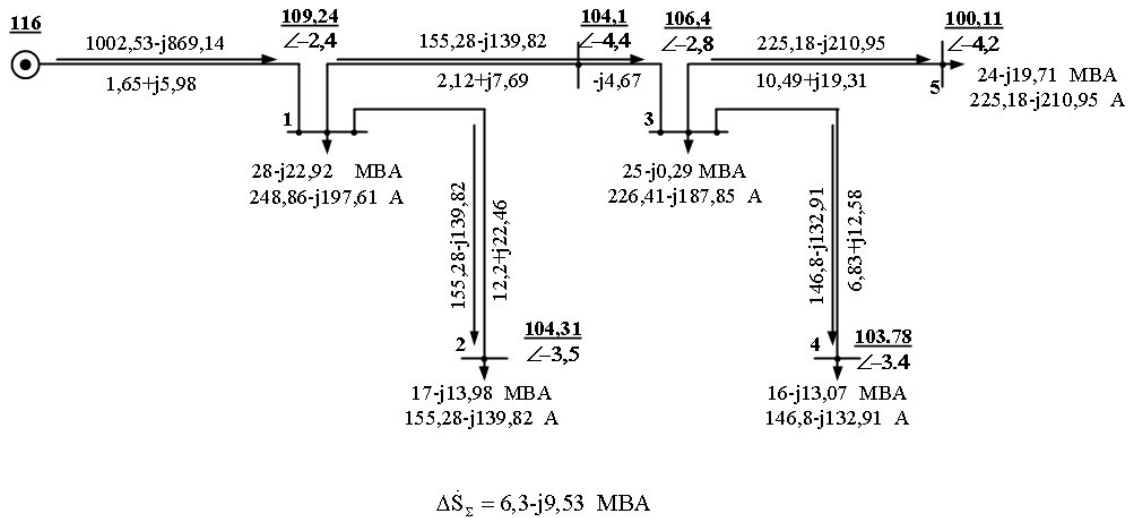


Рис. 7.1. Схема електричної мережі

Паспортні дані трансформатора ТДТН-40000/110-У1 представлено в табл. 7.1. Розраховані параметри схеми заміщення трансформатора наведено у табл. 7.2.

Таблиця 7.1 Паспортні дані трансформатора ТДТН-40000/110-У1

Тип	S _{ном} , МВА	Межі регулювання	U _{ном} , обмоток, кВ			U _к , %			ΔP _к , кВт	ΔP _х , кВт	I _х , %
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н			
ТДТН-40000/150	40	РПН: ±9х1,78% ПБЗ: ±2х2,5%	115	38,5	11	10,5	17,5	6,5	200	30	0,23

Таблиця 7.2 Розрахункові параметри трансформатора ТДТН-40000/110-У1

	Обмотка НН	Обмотка СН	Обмотка ВН
Фіктивна напруга к.з., %	6,75	0	10,75
Активний опір обмотки, Ом	0,83	0,83	0,83
Реактивний опір обмотки, Ом	22,32	0	35,84

Струми, що протікають обмотками трансформатора:

$$I_B = \frac{S_B}{\bar{U}_5} = \frac{24 - j19,71}{100,11e^{j4,2}} = 224,6 - j213,95 \text{ A};$$

$$I_C = \frac{S_C}{\bar{U}_5} = \frac{14 - j12672}{100,11e^{j4,2}} = 130,11 - j137,06 \text{ A};$$

$$I_H = \frac{S_H}{\bar{U}_5} = \frac{10 - j6,98}{100,11e^{j4,2}} = 94,49 - j76,89 \text{ A};$$

Обчислимо зведений рівень напруги на сторонах СН та НН:

$$U_{зв.СН5} = U_5 - I_B \cdot Z_B - I_C \cdot Z_C = 100,11 \cdot e^{-j4,2} - (224,6 - j213,95)(0,83 + j35,54) - (130,11 - j137,06)(0,83) = 93,16 \cdot e^{-j9,3} \text{ кВ};$$

$$U_{зв.НН5} = U_5 - I_B \cdot Z_B - I_H \cdot Z_H = 100,11 \cdot e^{-j4,2} - (224,6 - j213,95)(0,83 + j35,54) - (94,49 - j76,89)(0,83 + j22,32) = 91,88 \cdot e^{-j10,8} \text{ кВ}.$$

Оскільки трансформатор триобмотковий та має в своєму складі обидва пристрої для регулювання напруги (РПН та ПБЗ), спочатку необхідно визначити положення РПН, а далі з урахування РПН визначити номер відпайки ПБЗ.

1. Розрахунок номера відгалуження РПН.

$$N_{РПН}^{баж} = \frac{1}{\omega_{0.РПН}} \left(\frac{(U_B - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TH}) \cdot U_{TH}}{U_{TB} \cdot U_{н0}^{баж}} - 1 \right) = \frac{1}{1,78 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{91,88 \cdot 11}{115 \cdot 10,5} - 1 \right) = -9,2$$

$$N_{РПН} \rightarrow N'_{РПН} = -9$$

Тоді фактичне значення напруги на стороні НН з урахування коефіцієнта трансформації складає:

$$U_{НД}^{баж} = \frac{(U_B - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TH}) \cdot U_{TH}}{U_{TB} \cdot (1 + N'_{РПН} \cdot \omega_{0.РПН})} = \frac{91,88 \cdot 11}{115 \cdot (1 + (-9) \cdot 1,78)} = 10,46 \text{ кВ}.$$

2. З урахуванням обраного номеру відгалуження РПН спробуємо забезпечити бажаний рівень напруги за допомогою ПБЗ на стороні 35 кВ.

$$N_{ПБЗ}^{баж} = \frac{1}{\omega_{0.ПБЗ}} \left(\frac{U_{СД}^{баж} \cdot U_{TB} (1 + N'_{РПН} \cdot \omega_{0.РПН})}{(U_B - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TC}) \cdot U_{ТСТВ}} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{37,5 \cdot 115 \cdot (1 + (-9) \cdot 1,78 \cdot 10^{-2})}{93,16 \cdot 38,5} - 1 \right) = 0,4$$

$$N_{ПБЗ} \rightarrow N'_{ПБЗ} = 0$$

Тоді фактичне значення напруги на стороні СН з урахування коефіцієнта трансформації складає:

$$U_{CD}^{баз} = \frac{(U_B - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TC}) \cdot U_{TC} \cdot (1 + N'_{ПБЗ} \cdot \omega_{0.ПБЗ})}{U_{TB} \cdot (1 + N'_{РПН} \cdot \omega_{0.РПН})} =$$

$$= \frac{93,16 \cdot 38,5 \cdot (1 + 0 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2})}{115 \cdot (1 + (-9) \cdot 1,78 \cdot 10^{-2})} = 37,14 \text{ кВ.}$$

Змінюючи номер відгалуження РПН та ПБЗ можна розрахувати весь регулювальний діапазон трансформатора. Результат приведемо в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 Регулювальний діапазон трансформатора
ТДТН-40000/110-У1

Номер відгалуження РПН	Рівень на- пруги на низькій стороні, кВ	Рівень напруги на середній стороні, кВ				
		Номер відгалуження ПБЗ				
		-2	-1	0	1	2
-9	10,46	35,28	36,21	37,14	38,07	39
-8	10,25	34,55	35,46	36,37	37,28	38,19
-7	10,04	33,85	34,74	35,63	36,52	37,41
-6	9,85	33,17	34,05	34,92	35,79	36,66
-5	9,65	32,52	33,38	34,24	35,09	35,95
-4	9,46	31,9	32,74	33,57	34,42	35,56
-3	9,28	31,3	32,13	32,95	33,77	34,6
-2	9,11	30,72	31,53	32,34	33,15	33,96
-1	8,95	30,17	30,96	31,72	32,55	33,34
0	8,79	29,63	30,41	31,19	31,97	32,75
1	8,63	29,11	29,88	30,64	31,41	32,18
2	8,49	28,61	29,36	30,12	30,87	31,62
3	8,34	28,13	28,87	29,61	30,35	31,09
4	8,2	27,66	28,39	29,12	29,84	30,57
5	8,07	27,21	27,92	28,64	29,36	30,07
6	7,94	26,77	27,48	28,18	28,88	29,59
7	7,81	26,35	27,04	27,73	28,43	29,12
8	7,69	25,94	26,62	27,3	27,98	28,67
9	7,57	25,54	26,21	26,88	27,56	28,23

ПРАКТИЧНА РОБОТА №8. ОЦІНКА НЕБАЛАНСУ НАПРУГИ ТА НАПРУГИ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Приклад 8.1. Виконати розрахунок режиму електричної мережі (рис.8.1) за симетрією. Мережа представлена симетричним джерелом живлення з напругою, що дорівнює номінальній напрузі мережі (220 В). Чотирьохжильний кабель АВп 4х70 заживлює несиметричне трифазне навантаження. Довжина кабельної лінії 200 м. Питомий опір кабелю складає $Z_0 = 0,42 + j0,061$ (Ом). Для спрощення прийняти, що параметри кабельної лінії за чотирьома проводами є симетричними. Навантаження фаз представлено в табл. 9.1

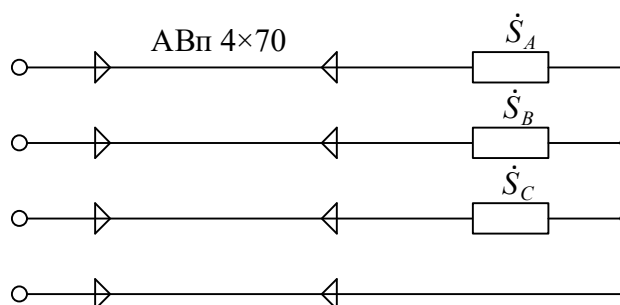


Рисунок 8.1 Схема підключення навантаження

Таблиця 9.1 Навантаження фаз

Параметр	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Навантаження, кВА	30-j15	10-j5	20-j10

Виконаємо розрахунок шляхом зображення навантаження опором.

Визначимо опори фаз та нейтралі кабельної лінії:

$$Z_A = Z_B = Z_C = L \cdot Z_0 = 200(0,42 + j0,061) = 0,084 + j0,012 \text{ Ом.}$$

Виконаємо ітераційний розрахунок режиму роботи наведеної мережі.

Встановимо початкові наближення напруги навантаження:

$$U_{нА} = U_{ном} \cdot e^{j0^0}; U_{нВ} = U_{ном} \cdot e^{-j120^0}; U_{нС} = U_{ном} \cdot e^{j120^0}.$$

Ітерація №1.

Опір навантаження складатиме:

$$Z_{нА} = \frac{|U_{нА}|^2}{S_A} = \frac{|220|^2}{30 - j15} = 1,291 + j0,645 \text{ Ом;}$$

$$Z_{нВ} = \frac{|U_{нВ}|^2}{S_B} = \frac{|220 \cdot e^{-j120^0}|^2}{10 - j5} = 3,872 + j1,936 \text{ Ом;}$$

$$Z_{nC} = \frac{|U_{nC}|^2}{S_C} = \frac{|220 \cdot e^{j120}|^2}{20 - j10} = 1,939 + j0,968 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір фаз та нейтралі:

$$Z_{еквA} = Z_A + Z_{нA} = 1,375 + j0,658 \text{ Ом;}$$

$$Z_{еквB} = Z_B + Z_{нB} = 3,956 + j1,948 \text{ Ом;}$$

$$Z_{еквC} = Z_C + Z_{nC} = 2,02 + j0,98 \text{ Ом;}$$

$$Z_{еквN} = Z_N = 0,084 + j0,012 \text{ Ом.}$$

Як можна побачити еквівалентний опір фази А майже втричі менший опору фази В, це пов'язано з тим, що навантаження фази А втричі більше навантаження фази Б (також за умови що параметри кабельної лінії є симетричними).

Визначимо еквівалентні поздовжні провідності фаз та нейтралі:

$$Y_{еквA} = (Z_{еквA})^{-1} = 0,592 - j0,283 \text{ См;}$$

$$Y_{еквB} = (Z_{еквB})^{-1} = 0,203 - j0,10 \text{ См;}$$

$$Y_{еквC} = (Z_{еквC})^{-1} = 0,401 - j0,194 \text{ См;}$$

$$Y_{еквN} = (Z_{еквN})^{-1} = 11,659 - j1,693 \text{ См.}$$

Тоді напруга зміщення нейтралі складає:

$$U_{зMN} = \frac{U_A Y_{еквA} + U_B Y_{еквB} + U_C Y_{еквC}}{Y_{еквA} + Y_{еквB} + Y_{еквC} + Y_{еквN}} =$$

$$= \frac{220e^{j0}(0,592 - j0,283) + 220e^{-j120}(0,203 - j0,1) + 220e^{j120}(0,401 - j0,194)}{(0,592 - j0,283) + (0,203 - j0,1) + (0,401 - j0,194)} =$$

$$= 6,1 + j1,7 \text{ В.}$$

Визначимо напругу на еквівалентному опорі фаз:

$$U'_A = U_A - U_{зMN} = 220 \cdot e^{j0} - (6,1 + j1,7) = 213,9 - j1,7 = 213,9 \cdot e^{-j0,4} \text{ В;}$$

$$U'_B = U_B - U_{зMN} = 220 \cdot e^{-j120} - (6,1 + j1,7) = -116,1 - j192,2 = 224,5 \cdot e^{-j121,1} \text{ В;}$$

$$U'_C = U_C - U_{зMN} = 220 \cdot e^{j120} - (6,1 + j1,7) = -116,1 + j188,9 = 221,7 \cdot e^{j121,6} \text{ В.}$$

Напруга на навантаженні фаз:

$$U_{нA} = U'_A \frac{Z_{нA}}{Z_{еквA}} = (213,9 - j1,7) \frac{1,291 + j0,645}{1,375 + j0,658} = 202,6 + j2 = 202,6 \cdot e^{j0,6} \text{ В;}$$

$$U_{нB} = U'_B \frac{Z_{нB}}{Z_{еквB}} = (-116,1 - j192,2) \frac{3,872 + j1,936}{3,986 + j1,948} = -112,8 - j189,4 = 220,4 \cdot e^{-j120,8}$$

$$U_{нC} = U'_C \frac{Z_{нC}}{Z_{еквC}} = (-116,1 + j188,9) \frac{1,936 + j0,968}{2,02 + j0,98} = -114,0 + j180,7 = 213,7 \cdot e^{j122,3}$$

Струм на кожній з фаз становитиме:

$$I_A = \frac{U'_A}{Z_{еквA}} = \frac{213,9 - j1,7}{1,375 + j0,658} = 126,2 - j61,6 \text{ А};$$

$$I_B = \frac{U'_B}{Z_{еквB}} = \frac{-116,1 - j192,2}{3,956 + j1,948} = -42,9 - j27,5 \text{ А};$$

$$I_C = \frac{U'_C}{Z_{еквC}} = \frac{-116,1 + j188,9}{2,02 + j0,98} = -9,8 + j98,2 \text{ А};$$

$$I_N = \frac{U_{змN}}{Z_{еквN}} = \frac{6,1 + j1,7}{0,084 + j0,012} = 73,5 + j9,2 \text{ А}.$$

Таким чином сумарні втрати потужності в мережі складатимуть:

$$\Delta S_{\Sigma}^{(1)} = |I_A|^2 \cdot \bar{Z}_A + |I_B|^2 \cdot \bar{Z}_B + |I_C|^2 \cdot \bar{Z}_C + |I_N|^2 \cdot \bar{Z}_N = 3,153 - j0,458 \text{ кВА}.$$

Перевіряємо умову завершення ітераційного процесу:

$$|\Delta S_{\Sigma}^{(1)} - \Delta S^{(0)}| = 3,187 \text{ кВА}.$$

Умова не виконується, а отже переходимо до наступної ітерації
Ітерація №2.

Опір навантаження на другій ітерації складатиме:

$$Z_{нA} = \frac{|U_{нA}|^2}{S_A} = \frac{|202,6 + j2,0|^2}{30 - j15} = 1,095 + j0,547 \text{ Ом};$$

$$Z_{нB} = \frac{|U_{нB}|^2}{S_B} = \frac{|-112,8 - j189,4|^2}{10 - j5} = 3,887 + j1,943 \text{ Ом};$$

$$Z_{нC} = \frac{|U_{нC}|^2}{S_C} = \frac{|-114 + j180,7|^2}{20 - j10} = 1,827 + j0,913 \text{ Ом}.$$

Еквівалентний опір фаз та нейтралі на другій ітерації:

$$Z_{еквA} = Z_A + Z_{нA} = 1,179 + j0,559 \text{ Ом};$$

$$Z_{еквB} = Z_B + Z_{нB} = 3,971 + j1,955 \text{ Ом};$$

$$Z_{еквC} = Z_C + Z_{нC} = 1,911 + j0,926 \text{ Ом};$$

$$Z_{еквN} = Z_N = 0,084 + j0,012$$

Еквівалентні позовжні провідності фаз та нейтралі на другій ітерації
розрахунку:

$$Y_{еквA} = (Z_{еквA})^{-1} = 0,692 - j0,329 \text{ См};$$

$$Y_{еквB} = (Z_{еквB})^{-1} = 0,203 - j0,10 \text{ См};$$

$$Y_{еквC} = (Z_{еквC})^{-1} = 0,424 - j0,205 \text{ См};$$

$$Y_{еквN} = (Z_{еквN})^{-1} = 11,659 - j1,693 \text{ См}.$$

Тоді напруга зміщення нейтралі на другій ітерації складає:

$$U_{\Sigma N} = \frac{U_A Y_{еквA} + U_B Y_{еквB} + U_C Y_{еквC}}{Y_{еквA} + Y_{еквB} + Y_{еквC} + Y_{еквN}} =$$

$$= \frac{(220,6 + j2,0)(0,692 - j0,329) + (-112,8 - j189,4)(0,203 - j0,1)}{(0,692 - j0,329) + (0,203 - j0,1) + (0,424 - j0,205)} \times$$

$$\times \frac{(-114 + j180,7)(0,424 - j0,205)}{(0,692 - j0,329) + (0,203 - j0,1) + (0,424 - j0,205)} = 7,7 + j1,6 \text{ В.}$$

Визначимо напругу на еквівалентному опорі фаз на другій ітерації:

$$U'_A = U_A - U_{\Sigma N} = 220 \cdot e^{j0} - (7,7 + j1,6) = 212,3 - j1,6 = 212,3 \cdot e^{-j0,4} \text{ кВ};$$

$$U'_B = U_B - U_{\Sigma N} = 220 \cdot e^{-j120} - (7,7 + j1,6) = -117,7 - j192,2 = 225,3 \cdot e^{-j121,5} \text{ В};$$

$$U'_C = U_C - U_{\Sigma N} = 220 \cdot e^{j120} - (7,7 + j1,6) = -117,7 + j188,9 = 222,5 \cdot e^{j121,9} \text{ В.}$$

Напруга на навантаженні фаз на другій ітерації:

$$U_{HA} = U'_A \frac{Z_{HA}}{Z_{еквA}} = (212,3 - j1,6) \frac{1,905 + j0,547}{1,179 + j0,559} = 199,1 + j2,5 = 199,2 \cdot e^{j0,7} \text{ В};$$

$$U_{HB} = U'_B \frac{Z_{HB}}{Z_{еквB}} = (-117,7 - j192,2) \frac{3,887 + j1,943}{3,971 + j1,955} = -114,4 - j189,4 = 221,2 \cdot e^{-j121,1}$$

$$U_{HC} = U'_C \frac{Z_{HC}}{Z_{еквC}} = (-117,7 + j188,9) \frac{1,827 + j0,913}{1,911 + j0,926} = -115,5 + j180,3 = 214,7 \cdot e^{j122,6}$$

Струм на кожній з фаз на другій ітерації становитиме:

$$I_A = \frac{U'_A}{Z_{еквA}} = \frac{212,3 - j1,6}{1,179 + j0,559} = 146,5 - j70,9 \text{ А};$$

$$I_B = \frac{U'_B}{Z_{еквB}} = \frac{-117,7 - j192,2}{3,971 + j1,955} = -43 - j27,2 \text{ А};$$

$$I_C = \frac{U'_C}{Z_{еквC}} = \frac{-117,7 + j188,9}{1,911 + j0,926} = -11,1 + j104,2 \text{ А};$$

$$I_N = \frac{U_{\Sigma N}}{Z_{еквN}} = \frac{7,7 + j1,6}{0,084 + j0,012} = 92,3 + j6,1 \text{ А.}$$

Таким чином сумарні втрати потужності в мережі складатимуть:

$$\Delta S_{\Sigma}^{(2)} = |I_A|^2 \cdot \bar{Z}_A + |I_B|^2 \cdot \bar{Z}_B + |I_C|^2 \cdot \bar{Z}_C + |I_N|^2 \cdot \bar{Z}_N = 4,085 - j0,593 \text{ кВА.}$$

Перевіряємо умову завершення ітераційного процесу:

$$|\Delta S_{\Sigma}^{(2)} - \Delta S_{\Sigma}^{(1)}| = 0,942 \text{ кВА.}$$

Оскільки критерій завершення ітераційного процесу недовіряється, переходимо до наступної ітерації.

Результат ітераційного розрахунку представимо в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 Результат ітераційного розрахунку

	Параметр	Фаза А	Фаза В	Фаза С	N
Ітерація №3	Опрі навантаження, Ом	1,058+j0,529	3,915+j1,958	1,833+j0,917	
	Еквівалентний опір, Ом	1,142+j0,541	3,999+j1,97	1,917+j0,929	0,084+j0,012
	Напруга зміщення нейтралі, В				8,1+j1,5
	Напруга на еквівелентному опорі, В	211,9·e-j0,4	225,5·e-j121.6	222,9·ej122	
	Напруга на навантаженні фаз, В	198,3·ej0,8	221,4·e-j121,2	214,4·ej122	
	Струм, А	151-j72,9	-42,8-j26,9	-11,2+j104	97+j4,1
	Сумарні втрати потужності, кВА			4,289-j0,2623	
Ітерація №4	Опрі навантаження, Ом	1,049+j0,525	3,921+j1,96	1,839+j0,919	
	Еквівалентний опір, Ом	1,133+j0,537	4,005+j1,973	1,923+j0,932	0,084+j0,012
	Напруга зміщення нейтралі, В				8,2+j1,5
	Напруга на еквівелентному опорі, В	211,8·e-j0,4	225,5·e-j121.6	223,0·ej122	
	Напруга на навантаженні фаз, В	198,3·ej0,8	221,4·e-j121,3	214,5·ej122,7	
	Струм, А	152,2-j73,4	-42,8-j26,9	-11,2+j103,7	98,2+j3,5
	Сумарні втрати потужності, кВА			4,337-j0,63	
...					
Ітерація №6	Опрі навантаження, Ом	1,046+j0,523	3,922+j1,961	1,841+j0,921	
	Еквівалентний опір, Ом	1,13+j0,535	4,006+j1,973	1,925+j0,933	0,084+j0,012
	Напруга зміщення нейтралі, В				8,2+j1,5
	Напруга на еквівелентному опорі, В	211,8·e-j0,4	225,5·e-j121.6	223·ej122	
	Напруга на навантаженні фаз, В	198,1·ej0,8	221,4·e-j121,3	214,6·ej122,7	
	Струм, А	152,5-j73,5	-42,8-j26,9	-11,2+j103,6	98,6+j3,2
	Сумарні втрати потужності, кВА			4,351-j0.632	

До параметрів несиметрії напруг згідно чинного стандарту України щодо симетрії напруги (ГОСТ 13109-97) [4], відносяться:

1. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю, усереднений на інтервалі 3с:

$$K_{2U} = \frac{|U_2|}{|U_1|}$$

При цьому

- нормально допустиме відхилення складає 2,0% для 95% часу доби;
 - гранично допустиме відхилення 4 % для 100% часу доби.
2. Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю, усереднений на інтервалі 3 с:

$$K_{0U} = \frac{|U_0|}{|U_1|}$$

При цьому

- нормально допустиме відхилення складає 2,0% для 95% часу доби;
- гранично допустиме відхилення 4 % для 100% часу доби.

Однак, згідно до стандарту ДСТУ EN 50160: 2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» у деяких районах небаланс напруги у трифазних точках підключення користувачів може досягати до 3%, а коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю не нормується.

Виконаємо оцінку параметрів режиму роботи електричної мережі чинним стандартам України. Для цього скористаємось розрахунком значенням напруги на навантаженні, за допомогою яких перейдемо від системи фазних напруг до системи напруг у послідовності з визначенням напруги прямої, оберненої та нульової послідовності:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_b = \underline{a}^2 \dot{U}_1 + \underline{a} \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \rightarrow \dot{U}_\phi = \dot{S} \times \dot{U}_{1-2-0} \\ \dot{U}_c = \underline{a} \dot{U}_1 + \underline{a}^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \end{cases}$$

Пряма та обернена матриця перетворень

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

де поворотні множники складають:

$$\underline{a} = 1 \cdot e^{-j120} = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{a}^2 = 1 \cdot e^{j120} = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Перехід від системи фазних координат до системи координат у послідовностях:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \underline{a}\dot{U}_b + \underline{a}^2\dot{U}_c) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \underline{a}^2\dot{U}_b + \underline{a}\dot{U}_c) \rightarrow \dot{U}_{1-2-0} = \dot{S}^{-1} \times \dot{U}_\phi \\ \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \end{cases}$$

Виконаємо розрахунок напруг прямої, зворотної та оберненої послідовності в матричній формі згідно до наведених виразів:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n0} \end{pmatrix} &= \dot{S}^{-1} \begin{pmatrix} U_{nA} \\ U_{nB} \\ U_{nC} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{nA} \\ U_{nB} \\ U_{nC} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -0,5 - j0,866 & -0,5 + j0,866 \\ 1 & -0,5 + j0,866 & -0,5 - j0,866 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 198,05 + j2,845 \\ -114,98 - j189,22 \\ -116,03 + j180,49 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 211,24 + j2,709 \\ -2,206 + j2,098 \\ -10,986 - j1,963 \end{pmatrix} \text{ В.} \end{aligned}$$

Отже, модулі напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей складають:

$$|U_{n1}| = |211,24 + j2,709| = 211,26 \text{ В};$$

$$|U_{n2}| = |-2,206 + j2,098| = 3,044 \text{ В};$$

$$|U_{n0}| = |-10,986 - j1,963| = 11,16 \text{ В}.$$

Визначимо коефіцієнт несиметрії напруги:

$$\begin{aligned} - \quad \text{за зворотною послідовністю} \quad K_{2U} &= \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{|3,044|}{|211,26|} = 1,44\% \\ - \quad \text{за нульовою послідовністю} \quad K_{0U} &= \frac{|U_0|}{|U_1|} = \frac{|11,16|}{|211,26|} = 5,28\%. \end{aligned}$$

Отже, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю згідно ГОСТ 13109-97 входить в межі нормально допустимих відхилень, а за показником нульової послідовності перевищує навіть гранично допустимі відхилення, тому не відповідає стандарту.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чижевський В. В. Електричні мережі. Практикум. Навчальний посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 70 с
2. Електричні системи та мережі [Текст] : метод. вказівки до викон. контрольних робіт з дисципліни для студ. Всіх форм навчання та студ.-іноземців напрямку підготовки. 6.05701 «Електротехніка та електротехнології» / Уклад. : В.М. Сулейсманов, В.В. Чижевський, М. М. Лутчин та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч II. – 112 с.
3. ІЕС 60038-2009. ІЕС standard voltages затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 12.02.2016 №34
4. ГОСТ 13109 – 97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
5. Кирик В. В. Електричні мережі та системи: підручник. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 324 с
- 6 Правила улаштування електроустановок. - Міненерговугілля України. - 2017. - 617 с.