

Міністерство освіти і науки,
молоді та спорту України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Методичні вказівки

до виконання

ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ БАКАЛАВРА

для студентів напряму підготовки
6.050701 „Електротехніка та електротехнології”

Розділ 2

Моделювання, аналіз і оптимізація електричних режимів

Київ
НТУУ „КПІ”
2011

Метод. вказівки до викон. дипломного проекту бакалавра для студ. напряму підготов. 6.050701 „Електротехніка та електротехнології” / Уклад.: Д.Б. Банін, О.В. Хоменко, М.Д. Банін. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – Ч. 2. Моделювання, аналіз і оптимізація електричних режимів. – 68 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання

ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ БАКАЛАВРА

для студентів напряму підготовки
6.050701 „Електротехніка та електротехнології”

Розділ 2

**Моделювання, аналіз і оптимізація
електричних режимів**

Укладачі: БАНІН Дмитро Борисович, канд. техн. наук, доцент
ХОМЕНКО Олег Володимирович, канд. техн. наук, доцент
БАНІН Максим Дмитрович, с. н. с.

Відповідальний
редактор: *О.С. ЯНДУЛЬСЬКИЙ*, доктор техн. наук, професор

Рецензент: *Т. Л. КАЦАДЗЕ*, канд. техн. наук, доцент

Зміст

Вступ	4
1. Загальні методичні питання моделювання та оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем	5
2. Розрахунковий апарат - програмний комплекс РАОТВ, пакети лабораторних робіт з курсу «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач»... ..	12
3. Режимно-схемний аналіз індивідуального завдання, розробка системної розрахункової схеми	13
4. Методичний матеріал до розрахунку режиму методом Ньютона	17
5. Методичний матеріал до оптимізації режимів за критерієм мінімуму втрат активної потужності	23
6. Методичний матеріал до розрахунку трифазних струмів короткого замикання на основі матриці Y	31
7. Інтелектуальна технологія в реалізації розрахункових завдань бакалаврського проекту	34
8. Контрольні приклади	
8.1. Інструкція і приклад розробки розрахункової схеми, режимно-схемний аналіз, введення режиму в допустиму область	34
8.2. Інструкція і приклад розрахунку режиму методом Ньютона	43
8.3. Інструкція і приклад оптимізації режиму по реактивній потужності	54
8.4. Інструкція і приклад розрахунку трифазних струмів короткого замикання	65
Список літератури	67

Вступ

Дипломний проект бакалавра по кафедрі автоматизації енергосистем має комплексний характер і об'єднує питання основних дисциплін, які визначають підготовку бакалавра напрямку «Електротехніка та електротехнології» за спеціальністю «Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії» з врахуванням подальшої спеціальної підготовки. Проектування здійснюється з метою узагальнення та систематизації набутих теоретичних знань і практичних навичок у сфері релейного захисту та автоматизації енергосистем, обліку електроенергії, моделювання та оптимізації режимів роботи енергосистем тощо.

Розділ 2 дипломного проекту бакалавра присвячений питанням моделювання, аналізу і оптимізації режимів роботи електричних мереж енергосистем. При виконанні розділу необхідно провести режимно-схемний аналіз індивідуального завдання, виконати розрахунок параметрів усталеного режиму заданої електричної мережі методом Ньютона-Рафсона, провести оптимізацію режиму градієнтним методом за критерієм мінімуму втрат активної потужності, виконати розрахунок трифазних струмів короткого замикання.

Для виконання розрахункових завдань розділу використовується промисловий програмний комплекс РАОТВ (розрахунок, аналіз і оптимізація технологічних втрат), досвід роботи з яким отриманий студентами при виконанні курсової роботи з дисципліни «Математичні задачі енергетики». Також використовуються програмні пакети лабораторних робіт з дисципліни «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач».

Обсяг другого розділу в дипломному проекті складає 30 – 40 сторінок.

1. Загальні методичні питання моделювання та оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем

Моделювання і аналіз усталених режимів роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) виконують з метою визначення технічних умов їх роботи. При цьому обчислюються і аналізуються значення основних параметрів режиму: напруги у вузлах мережі, струми у ділянках і вузлах мережі (струморозподіл), потоки активної і реактивної потужності в ділянках і у вузлах мережі (потокорозподіл), втрати активної потужності в окремих елементах мережі і сумарні втрати в мережі в цілому тощо. Параметри режиму визначаються на підставі схеми заміщення і розрахункової схеми електричної мережі і її параметрів, електричних навантажень споживачів та джерел електроенергії.

Усталеному режиму відповідають відносно незмінні в часі параметри. Слід розрізнити параметри режиму та параметри схеми електричної мережі. Параметри схеми – це активні та реактивні опори, провідності її елементів, коефіцієнти трансформації силових трансформаторів тощо. Вони визначаються розрахунками на основі довідкової інформації. При моделюванні режимів електричної мережі параметри схеми та частина параметрів режиму відома і незмінна, інша частина параметрів режиму потребує свого визначення в ході розрахунків.

Завдання розрахунку усталеного режиму електричної мережі полягає, в першу чергу, у визначенні рівня напруги (модулі і фазові кути або дійсні та уявні складові комплексів напруг) у всіх вузлах мережі, крім опорних, при заданих параметрах схеми заміщення, вузлових потужностях або струмах споживачів і джерел електроенергії та напругах в опорних вузлах. За обчисленими напругами у вузлах мережі визначаються інші параметри режиму – струми, потоки потужностей, втрати потужності тощо.

З математичної точки зору задача полягає в розв'язанні системи алгебраїчних рівнянь з комплексними коефіцієнтами та невідомими. Це рівняння усталеного режиму електричної мережі. Вони визначають аналітичну залежність між відомими та невідомими параметрами схеми та режиму.

Використовуються дві основні форми цих рівнянь:

$$\text{- рівняння балансу струмів} \quad W(\dot{U}) = Y\dot{U} - I(\dot{U}) = 0; \quad (1.1)$$

$$\text{- рівняння балансу потужностей} \quad W(\dot{U}) = \hat{U}_{diag} \cdot Y\dot{U} - \hat{S} = 0. \quad (1.2)$$

Тут Y – неповна матриця провідностей, \dot{U} – вектор невідомих напруг у вузлах, \hat{S} – вектор спряжених комплексів заданих вузлових потужностей, \hat{U}_{diag} – діагональна матриця із спряженими комплексами напруг на головній діагоналі.

Залежно від способу подання вузлових навантажень споживачів та джерел електроенергії (у вигляді струму чи потужності) система (1.1) може бути

лінійною або нелінійною. Якщо навантаження у вузлах мережі задані постійним струмом ($I_i = \text{const}, i = 1, \dots, n$), усталений режим моделюється системою лінійних алгебричних рівнянь у формі балансу струмів, яка має загальний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}\dot{U}_1 - y_{12}\dot{U}_2 - \dots - y_{1n}\dot{U}_n &= y_{10}\dot{U}_0 + \dot{I}_1; \\ -y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2 - \dots - y_{2n}\dot{U}_n &= y_{20}\dot{U}_0 + \dot{I}_2; \\ \dots & \dots \dots \\ -y_{n1}\dot{U}_1 - y_{n2}\dot{U}_2 - \dots + y_{nn}\dot{U}_n &= y_{n0}\dot{U}_0 + \dot{I}_n. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Це система рівнянь відносно невідомих напруг у вузлах \dot{U}_i . Має розмірність n , що відповідає кількості вузлів у схемі мережі (без балансувального). Коефіцієнтами при невідомих є власні та взаємні провідності вузлів (Y_{ii} і Y_{ij}). У правій частині системи рівнянь: I_i — задані струми у вузлах; U_0 — задана напруга в опорному (балансувальному) вузлі; y_{i0} — взаємна провідність між вузлами схеми та опорним вузлом.

Кожне i -те рівняння системи (1.3) відповідає одному i -му вузлу схеми електричної мережі і визначає баланс струмів у ньому.

У матричній формі систему (1.3) можна записати:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & -y_{12} & \dots & -y_{1n} \\ -y_{21} & y_{22} & \dots & -y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y_{n1} & -y_{n2} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} \\ y_{20} \\ \dots \\ y_{n0} \end{bmatrix} \dot{U}_0 + \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

Матриця коефіцієнтів при невідомих у системі (1.4) є неповною матрицею провідностей електричної мережі.

У разі завдання вузлових навантажень споживачів і джерел електроенергії постійними активними і реактивними потужностями ($S_i = P_i + jQ_i = \text{const}, i = 1, \dots, n$) усталений режим електричної мережі моделюють системою нелінійних алгебричних рівнянь (у вигляді балансу струмів або балансу потужностей). Нелінійні рівняння балансу струмів мають загальний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}\dot{U}_1 - y_{12}\dot{U}_2 - \dots - y_{1n}\dot{U}_n &= y_{10}\dot{U}_0 + \hat{S}_1 / \hat{U}_1; \\ -y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2 - \dots - y_{2n}\dot{U}_n &= y_{20}\dot{U}_0 + \hat{S}_2 / \hat{U}_2; \\ \dots & \dots \dots \\ -y_{n1}\dot{U}_1 - y_{n2}\dot{U}_2 - \dots + y_{nn}\dot{U}_n &= y_{n0}\dot{U}_0 + \hat{S}_n / \hat{U}_n. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Систему нелінійних рівнянь у вигляді балансу потужностей можна отримати, якщо рівняння (1.5) домножити на \hat{U}_i . Розв'язання системи рівнянь (1.3) або (1.5) дозволяє визначити напруги у вузлах мережі в заданому режимі.

Для розв'язання систем лінійних рівнянь усталеного режиму (1.3), (1.4) застосовують зазвичай прямі методи (метод Гауса, подвійної факторизації тощо).

Один з них – метод Гауса, передбачає послідовне перетворення вихідної системи рівнянь з квадратною матрицею коефіцієнтів у еквівалентну систему з трикутною матрицею коефіцієнтів. Розв'язання еквівалентної системи рівнянь дає розв'язок вихідної системи.

Класичний метод Гауса передбачає виконання двох основних етапів: прямого і зворотного ходу. Прямий хід – послідовність однотипних кроків виключення невідомих (напруги \dot{U}_i) із рівнянь системи (1.3).

На першому кроці виконуються еквівалентні перетворення системи, в результаті яких невідома U_1 виключається із усіх рівнянь, починаючи з другого. Перше рівняння залишається без змін. Вихідна система (1.3) набуває вигляду:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}\dot{U}_1 - y_{12}\dot{U}_2 - \dots - y_{1n}\dot{U}_n &= b_1; \\ 0 &+ y_{22}^{(1)}\dot{U}_2 - \dots - y_{2n}^{(1)}\dot{U}_n = b_2^{(1)}; \\ \dots &\dots \dots \\ 0 &- y_{n2}^{(1)}\dot{U}_2 - \dots + y_{nn}^{(1)}\dot{U}_n = b_n^{(1)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Тут $Y_{ij}^{(1)}$, $Y_{ii}^{(1)}$, $b_i^{(1)}$ – нові значення коефіцієнтів при невідомих і вільні члени рівнянь, обчислені в ході перетворень.

На другому кроці виключення невідомих виключається U_2 із рівнянь, починаючи з третього і т.д. У результаті виконання (n-1)-го кроку виключення вихідна система (1.3) або (1.4) з квадратною матрицею коефіцієнтів при невідомих перетворюється на еквівалентну систему рівнянь з трикутною матрицею коефіцієнтів:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}\dot{U}_1 - y_{12}\dot{U}_2 - y_{13}\dot{U}_3 - \dots - y_{1n}\dot{U}_n &= b_1; \\ y_{22}^{(1)}\dot{U}_2 - y_{23}^{(1)}\dot{U}_3 - \dots - y_{2n}^{(1)}\dot{U}_n &= b_2^{(1)}; \\ \dots &\dots \dots \\ y_{n-1,n-1}^{(n-2)}\dot{U}_{n-1} - y_{n-1,n}^{(n-2)}\dot{U}_n &= b_{n-1}^{(n-2)}; \\ y_{nn}^{(n-1)}\dot{U}_n &= b_n^{(n-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

На кожному кроці виключення невідомих спосіб еквівалентних перетворень системи рівнянь може бути довільним.

Зворотний хід методу Гауса полягає у розв'язанні системи (1.7) і

обчисленні значень усіх невідомих, починаючи з \dot{U}_n .

Із останнього рівняння системи (1.7) отримуємо:

$$\dot{U}_n = b_n^{(n-1)} / y_{nn}^{(n-1)}.$$

Підставляємо його в передостаннє рівняння системи (1.7) і обчислюємо \dot{U}_{n-1} і т. д. Послідовно визначаємо $\dot{U}_{n-2}, \dot{U}_{n-3}, \dots, \dot{U}_2, \dot{U}_1$ із решти рівнянь. Загальна формула при цьому має вигляд:

$$\dot{U}_i = (b_i^{(i-1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij}^{(i-1)} \dot{U}_j) / y_{ii}^{(i-1)}, \quad i = n-1, \dots, 1. \quad (1.8)$$

При підстановці правильно обчислених значень невідомих $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n$ у вихідну систему (1.3), всі її рівняння перетворюються на тотожності.

Для розв'язання систем нелінійних рівнянь усталеного режиму застосовують ітераційні методи (метод Зейделя, Ньютона-Рафсона тощо). Суть методу Ньютона-Рафсона полягає в послідовній заміні на кожній ітерації обчислень вихідної нелінійної системи рівнянь допоміжною лінійною системою, розв'язок якої дозволяє визначити чергові наближення невідомих величин (лінеаризація). Формування і розв'язання цієї лінійаризованої системи рівнянь виконується на кожній ітерації методу Ньютона-Рафсона:

$$Y \cdot \Delta U = -W. \quad (1.9)$$

Вектор невідомих в ній ΔU містить поправки до модулів та кутів вузлових напруг U_i і θ_i , матрицею коефіцієнтів при невідомих Y є матриця Якобі, вектор вільних членів W містить нев'язки нелінійних рівнянь вихідної системи при чергових наближеннях невідомих напруг. Нев'язки рівнянь усталеного режиму відповідають небалансам активної і реактивної потужностей у вузлах мережі.

Для застосування методу вихідна система рівнянь усталеного режиму з комплексними складовими у формі балансу потужностей (1.2) повинна бути перетворена – розділені дійсні та уявні її складові. При цьому кожне рівняння з комплексними складовими розпадається на два рівняння з дійсними складовими – рівняння балансу активної і реактивної потужностей у відповідному вузлі мережі. В полярних координатах ці рівняння мають вигляд (1.10). Отримана система рівнянь має розмірність $2n$, невідомими в ній є модулі та кути вузлових напруг U і θ .

$$\begin{cases} \omega_{p_i} = U_i^2 \cdot y_{ii}' - U_i \cdot \sum_j U_j \cdot [y_{ij}' \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + y_{ij}'' \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)] - P_i = 0; \\ \omega_{Q_i} = U_i^2 \cdot y_{ii}'' + U_i \cdot \sum_j U_j \cdot [y_{ij}' \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - y_{ij}'' \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)] + Q_i = 0. \end{cases} \quad (1.10)$$

$i = 1, \dots, n.$

Відповідна допоміжна лінійаризована система рівнянь (1.9) має таку структуру:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_1}}{\partial U_n} \\ \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_2}}{\partial U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{p_n}}{\partial U_n} \\ \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_1}}{\partial U_n} \\ \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_2}}{\partial U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial U_1} & \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial \omega_{Q_n}}{\partial U_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \omega_{p_1} \\ \omega_{p_2} \\ \dots \\ \omega_{p_n} \\ \omega_{Q_1} \\ \omega_{Q_2} \\ \dots \\ \omega_{Q_n} \end{bmatrix}.$$

В результаті її розв'язання визначаються елементи вектора поправок ΔU і $\Delta \theta$, що дозволяє обчислити наступні наближення невідомих напруг:

$$\begin{aligned} U_i^{(k+1)} &= U_i^{(k)} + \Delta U_i^{(k)}, \\ \theta_i^{(k+1)} &= \theta_i^{(k)} + \Delta \theta_i^{(k)}; \quad i=1, \dots, n. \end{aligned}$$

Ці наближення використовуються в наступній ітерації. Ітераційні розрахунки виконуються до досягнення заданої точності:

$$\left| \omega_{p_i}, \omega_{q_i} \right| \leq \varepsilon, \quad i=1, \dots, n.$$

Режим роботи ЕЕС має бути економічно ефективним і відповідати умовам необхідної надійності та якості електропостачання споживачів, тобто бути оптимальним. При управлінні режимом цього можна досягати засобами регулювання окремих його параметрів (керувальні параметри), що дозволяє цілеспрямовано впливати на поточкорозподіл в мережі та інші параметри режиму. Основним завданням оптимізації є забезпечення економічного розподілу активних і реактивних потужностей в ЕЕС, за якого забезпечується мінімум втрат активної потужності в мережі, із врахуванням обмежень на параметри режиму. З метою спрощення задачі оптимізації розподіл активної та реактивної потужностей можна визначати окремо. На практиці розв'язують часткові задачі оптимізації в яких використовуються локальні критерії.

З математичної точки зору задача полягає у визначенні значень незалежних параметрів, за яких забезпечується мінімум цільової функції витрат при заданих обмеженнях. Обмеження подаються у формі рівностей або нерівностей. Для розв'язання задачі може бути використаний прямий метод оптимізації Лагранжа, багатокрокові градієнтні методи оптимізації тощо.

Метод множників Лагранжа дозволяє визначати екстремум (min або max) функції багатьох змінних $F(X, Y)$ з урахуванням обмежень у формі рівностей $\varphi(X, Y) = 0$. При оптимізації режимів роботи ЕЕС вектори X та Y містять незалежні та залежні параметри режиму. Як обмеження зазвичай приймають рівняння усталеного режиму. Ідея методу Лагранжа полягає в переході від задачі пошуку умовного екстремуму вихідної цільової функції до визначення безумовного екстремуму нової функції – функції Лагранжа, яка є лінійною комбінацією $F(X, Y)$ і обмежень $\varphi(X, Y) = 0$:

$$\Phi(X, Y, \gamma) = F(X, Y) + \sum_{i=1}^m \gamma_i \cdot \varphi_i(X, Y).$$

Тут γ_i - множники Лагранжа. Їх кількість дорівнює кількості рівнянь-обмежень.

Умовою екстремуму функції Лагранжа є рівність нулю похідних від неї по усім параметрам x, y, γ :

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0, & i = 1, \dots, n; \\ \frac{\partial F}{\partial y_j} = 0, & j = 1, \dots, m; \\ \frac{\partial F}{\partial \gamma_j} = \varphi_j(X, Y) = 0. \end{cases}$$

Отримуємо систему $(n+2m)$ нелінійних рівнянь. При її розв'язанні визначаються значення усіх параметрів (в тому числі керувальних у складі

вектора незалежних параметрів X), за яких досягається екстремум вихідної цільової функції $F(X, Y)$ з урахуванням обмежень $\varphi(X, Y) = 0$. Шуканий екстремум функції обчислюється при підстановці в неї отриманих значень параметрів $x_i, y_j, i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$.

Гradientні методи – це багатокрокові методи, в яких екстремум функції досягається в результаті виконання ряду послідовних кроків у просторі керувальних параметрів від початкової точки траєкторії спуску. У gradientних методах кроки оптимізації виконуються у напрямі, який задається вектором gradientом. Кроки виконуються вздовж лінії gradientа у протилежному йому напрямі – напрямі антиgradientа, який визначає найбільше зменшення цільової функції. При оптимізації режимів вектор-gradient визначається через частинні похідні цільової функції за керувальними параметрами:

$$\nabla F(x^{(k)}) = \left\{ \frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \right\}.$$

Рекурентна формула gradientного методу, яка дозволяє обчислити координати послідовних точок на траєкторії спуску, має вигляд:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - h^{(k)} \cdot \nabla F(x^{(k)}),$$

де $x^{(k)}, x^{(k+1)}$ – координати чергової та наступної точок на траєкторії оптимізації у просторі керувальних параметрів; $h^{(k)}$ – коефіцієнт кроку оптимізації; $\nabla F(x^{(k)})$ - складові вектора-gradientа у черговій точці. На кожному кроці оптимізаційного процесу контролюється довжина вектора-gradientа (k -норма вектора):

$$\|\nabla F(x^{(k)})\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2}.$$

Оптимізація завершується, коли виконується умова:

$$\|\nabla F(x^{(k)})\| \leq \varepsilon,$$

що відповідає наближенню чергової точки траєкторії спуску до мінімуму цільової функції в межах заданої точності ε .

Розглянуті вище методичні положення мають загальний характер. При реалізації конкретних задач моделювання і оптимізації режимів роботи ЕЕС ці моделі, алгоритми і аналітичні вирази видозмінюються і адаптуються до умов і постановки задачі що розглядається.

В подальших розділах Методичних вказівок описуються і застосовуються модифікації методів і алгоритмів моделювання, аналізу і оптимізації режимів, що реалізовані у промисловому програмному комплексі РАОТВ та програмних пакетах лабораторних робіт до курсу «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач».

2. Розрахунковий апарат - програмний комплекс РАОТВ, пакети лабораторних робіт з курсу «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач»

Для виконання розрахункових завдань бакалаврської роботи використовується промисловий комп'ютерний комплекс РАОТВ (розрахунок, аналіз і оптимізація технологічних втрат). Досвід роботи з комплексом отриманий студентами при виконанні курсової роботи з дисципліни «Математичні задачі енергетики».

Технологія взаємодії з комплексом реалізується через два вхідних файли: **Name.UZL** та **Name.VET**, де **Name** - індивідуальне ім'я розрахункової схеми.

Таблиця **Name.UZL** містить наступні інформаційні колонки:

N вузла - номер вузла розрахункової схеми;

П - ознака вузла («b»-балансуючий, «u» - фіксує напругу);

P_{нав}, **Q_{нав}**, **P_{ген}**, **Q_{ген}** - навантажувальні режимні характеристики – потужності навантаження і генерації у вузлах;

G_ш, **B_ш** - провідності поперечних вузлових шунтів на землю;

U_{ном}, **U_{розра}**, **Кут** - номінальна і розрахункова напруги, кут розрахункової напруги.

Можливі інші вузлові характеристики.

Таблиця **Name.VET** містить такі інформаційні колонки:

N_{поч}, **N_{кін}** - номери початку і кінця гілки;

К - ознака комутації (Н, К, О);

R, **X**, **G**, **B** - опори та провідності гілки;

К_{тр}, **Марка**, **N_{відг}**, **Регулювання** - регулювання трансформаторів.

Можливі інші характеристики гілок.

Результуючими та контролюючими режим формами є:

- **«Загальні характеристики»** - сумарні балансні дані (споживання генерація, втрати, баланс), втрати (навантажувальні, в провідностях, від потоків активної та реактивної потужності, в шунтах, трансформаторах тощо);
- **«Режимна графіка»** - представлення конфігурації, параметрів і режимних характеристик на автоматично створюваній графічній схемі. Автоматична графіка забезпечує ефективний інтерфейс в процесах аналізу та управління режимом;
- **U**, **I_л**, **S_т** - результати контролю режиму за вимогами допустимої області (напруги всіх вузлів в заданих межах, струми гілок не перевищують допустимі, трансформатори не перевантажені тощо).

Повний стан режиму схеми оформляється роздруківкою таблиць і графічного відображення схеми. Використання комплексу РАОТВ завершуються функціональним завданням «Розробка розрахункової схеми, режимно-схемний аналіз, введення режиму в допустиму область» (розділ 8.1).

Інші функціональні задачі бакалаврського проекту реалізуються за допомогою пакетів лабораторних робіт з курсу «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач» із застосуванням інтелектуальних технологій. Тут реалізуються наступні задачі:

- **«Розрахунок режиму методом Ньютона»** (розділ 8.2) - Використовується пакет LB_APEZ2_N, лабораторна робота № 7. Інструкції до реалізації є у відповідних описах лабораторних робіт і в лекційному матеріалі;
- **«Оптимізація режиму по реактивній потужності»** (розділ 8.3) - використовується пакет LB_ОПТИМ, лабораторна робота № 5;
- **«Розрахунок трифазних струмів к.з.»** (розділ 8.4) - використовується пакет LB_APEZ2_Z, лабораторна робота № 8.

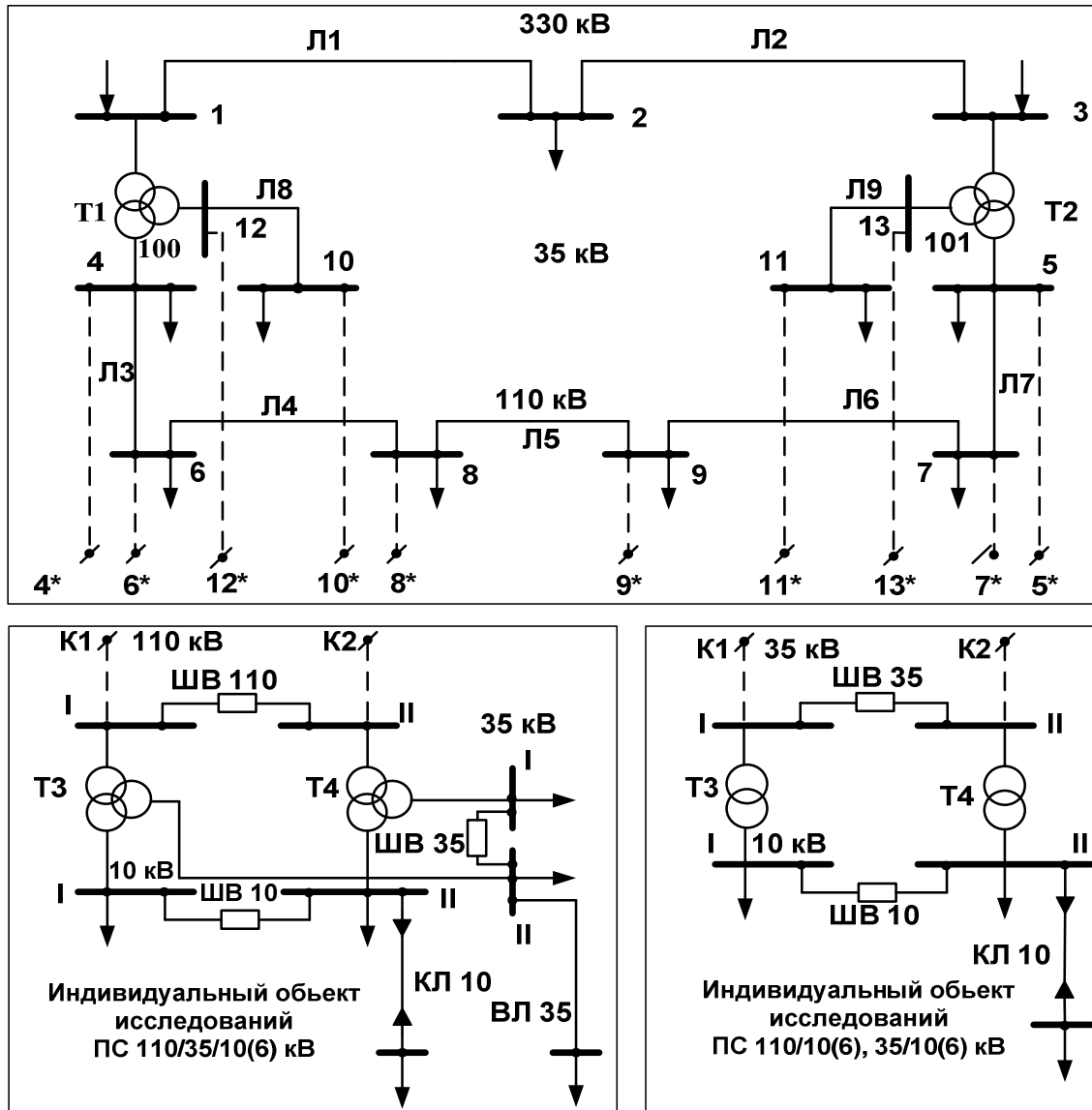
Зв'язок між інформаційною базою комплексу РАОТВ і пакетами лабораторних робіт реалізуються шляхом імпорту вихідних файлів **Name.UZL**, **Name.VET** в текстові файли лабораторних робіт **Name.PNT**, **Name.LIN** операцією Ctrl / W в середовищі РАОТВ.

3. Режимно-схемний аналіз індивідуального завдання. Розробка системної розрахункової схеми

Розрахункова схема для аналізу і оптимізації режимів електричних мереж складається з трьох частин:

- **Загальна живляча мережа енергосистеми (ЕС) 330/110/35 кВ;**
- **Розрахункова схема підстанції (ПС) згідно варіанту індивідуального завдання;**
- **Комутаційна мережева прив'язка (КМП),** що зв'язує ЕС та ПС в єдину режимно-мережеву структуру. Прив'язка ПС також є індивідуальною.

Загальна для всіх варіантів схема ЕС показана на рис. 3.1. Схема містить 13 вузлів і має три рівні напруги 330 кВ (вузол 1, 2, 3), 110 кВ (4, 5, 6, 7, 8, 9) і 35 кВ (10, 11, 12, 13). У схемі задані силові трансформатори АТДЦТН (Т1, Т2) - 200000/330/115/38,5 кВ з пристроєм РПН на середній напрузі, який має 13 відгалужень з кроком регулювання 2%. Балансуючими пунктами є шини 1 і 3 мережі 330 кВ. У схемі є лінії 330 кВ (Л1, Л2), 110 кВ (Л3 - Л7) і 35 кВ (Л8, Л9). Середні точки трансформаторів позначені номерами 100 (Т1) і 101 (Т2). Схема ЕС має один замкнений контур (транзит 110 кВ) по лініях Л3, Л4, Л5, Л6, Л7. Інтерфейсними вузлами є шини 110кВ 4* - 9* і 35 кВ 10* - 13*.



Питающая сеть 330/110/35 кВ:

Балансирующие узлы 1,3;
 Линии 330 кВ – Л1, Л2;
 Линии 110 кВ – Л3 – Л7;
 Линии 35 кВ – Л8, Л9;
 Трансформаторы - Т1, Т2
 АДЦТН 200000 330/115/38,5
 СН-РПН-П-13-7-2;
 Замкнутый транзит 110 кВ
 - Л3, Л4, Л5, Л6, Л7 -;
 Интерфейс 110 кВ: 4* - 9*;
 Интерфейс 35 кВ: 10*, 13*;

Расчетные схемы индивидуальной ПС

К1, К2 – коммутационные связи с питающей сетью;
 Т3, Т4 – трансформаторы ПС;
 ШВ 110, 35, 10 – выключатели шиносоединительные для варианта индивидуальной ПС;
 КЛ 10, ВЛ 35 – тупиковые удаление фидера для варианта индивидуальной ПС.

↓ - сосредоточенные суммарные нагрузки питающей сети и секций индивидуальной ПС. Определяются по варианту.

Рис. 3.1. Структура живлячої мережі, взаємозв'язок з розрахунковими схемами підстанцій 110/35/10(6) кВ.

Для загального вихідного режиму вибрані такі навантаження у вузлах і параметри ліній:

Вузол 2: $\dot{S} = 200 + j120$;

Вузол 9 : $\dot{S} = 20 + j10$;

Вузол 4: $\dot{S} = 50 + j 30$;

Вузол 10: $\dot{S} = 3 + j 1$;

Вузол 5: $\dot{S} = 70 + j 50$;

Вузол 11: $\dot{S} = 3 + j 1$;

Вузол 6: $\dot{S} = 15 + j 7$;

Вузол 12: $\dot{S} = 10 + j 5$;

Вузол 7: $\dot{S} = 10 + j 8$;

Вузол 13: $\dot{S} = 10 + j 5$;

Вузол 8: $\dot{S} = 18 + j 10$;

Лінії 330 кВ:
Л1: 100×АС2 - 400;
Л2: 170×АС2 – 400;

Лінії 110 кВ:
Л3: 60×АСО – 240;
Л4: 65×АС – 240;
Л5: 30×АС – 185;
Л6: 40× АС – 240;
Л7: 50×АСО – 240;

Лінії 35 кВ:
Л8: 20×АСО – 185;
Л9: 25×АС – 185.

Напруги балансуєчих вузлів мають незначний перекис напруг і відповідно дорівнюють - БП1: 340 кВ; БП2: 345 кВ. На обох трансформаторах (Т1, Т2) встановлені регульовальні відгалуження РПН $N_{\text{відг}}=9$. Кодування схеми ЕС, що виконане для комплексу РАОТВ і результати розрахунку вихідного режиму представлені в розділі 8.1. Відзначимо, що при необхідності керівник бакалаврського проекту може змінити конфігурацію, параметри і навантаження схеми ЕС.

Принципові розрахункові структури індивідуальних підстанцій показані на рис.3.1. Виділяється два типи об'єктів: ПС 110/35/10(6), що живляться від ЕС по 110 кВ, та ПС 110/10(6) або ПС 35/10(6), що живляться від ЕС відповідно по 110 або 35 кВ. На кожній підстанції є два силових трансформатора (Т3, Т4), по дві секції шин (I, II) для кожного рівня напруги, шиноз'єднувальні вимикачі (ШВ 110, 35, 10), віддалені фідера 35 кВ (ВЛ35) і 10 кВ (КЛ10). Потужності і марки трансформаторів визначаються у першому розділі бакалаврської роботи. Індивідуальна підстанція може мати до чотирьох ліній КМП (К1, К2, К3, К4), що зв'язують ПС з ЕС за різними комутаційними зв'язками. Суттєвою конфігураційної характеристикою є стан комутаційної апаратури (ШВ), котрий визначає варіант режиму роботи ПС (нормальна схема, транзит по живильній напрузі, вивод трансформатора Т3 або Т4 у ремонт та ін.) Індивідуальні варіанти структури ПС і зв'язку з ЕС наведені в таблицях 3.1, 3.2, 3.3 і 3.4:

Таблиця 3.1: Варіант електропостачання підстанції від ЕС за зовнішньою напругою 110 кВ. Всього 12 варіантів, в яких визначені номери вузлів ЕС, довжини і марки ліній.

Наприклад, для варіанта 1 можливі чотири живлячі лінії:
К1 - вузол 4: 20 × АС - 185; К2 - вузол 5: 40 × АС - 240;
К3 - вузол 8: 30 × АС - 185; К4 - вузол 9: 30 × АС - 240.

Таблиця 3.2: Варіант комутації ШВ 110, 35, 10 кВ;

Таблиця 3.3: Варіант електропостачання від ЕС по напрузі 35 кВ;

Таблиця 3.4: Варіант віддалених фідерів 35, 10 кВ.

Номер індивідуального варіанту для спільної режимної схеми складається з трьох чисел № 1 (Таб.3.1 або Таб.3.2), № 2 (Таб.3.3), № 3 (Таб.3.4).

Таблиця 3.1. Варіанти споживання підстанції від живлячої ЕС

№ _{вар.}	K1	K2	K3	K4	Л _{к1} [км]	Л _{к2} [км]	Л _{к3} [км]	Л _{к4} [км]
1	4	5	8	9	20×АС-185	40×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
2	6	5	8	9	22×АС-185	38×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
3	8	5	4	6	24×АС-185	36×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
4	4	7	5	9	26×АС-185	34×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
5	6	7	4	9	28×АС-185	32×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
6	8	7	6	9	30×АС-185	30×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
7	4	9	6	8	32×АС-185	28×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
8	6	9	5	7	34×АС-185	26×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
9	8	9	4	5	36×АС-185	24×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
10	4	8	9	7	38×АС-185	22×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
11	6	6	7	7	40×АС-185	20×АС-240	30×АС-185	30×АС-240
12	8	4	5	5	42×АС-185	18×АС-240	30×АС-185	30×АС-240

Таблиця 3.2. Варіанти комутації ШВ 110, 35, 10 кВ підстанції

№ _{вар.}	ШВ110	ШВ35	ШВ10	Откл. тр-тор	Коментарі
1	Откл.	Откл.	Откл.	-	Нормальна схема
2	Вкл.	Откл.	Откл.	-	Транзит по 110 кВ
3	Откл.	Вкл.	Откл.	Т4 обм.35откл	Відключення обмотки 35 кВ
4	Откл.	Откл.	Вкл.	Т3 обм.10откл	Відключення обмотки 10 кВ
5	Откл.	Вкл.	Вкл.	Т4 откл.	Тр-тор в ремонті. Живлення К1
6	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Т3 откл.	Тр-тор в ремонті. Живлення К1,К2

Таблиця 3.3. Варіанти зв'язку підстанції з живлячою ЕС (35 кВ)

№ _{вар.}	К1	К2	Л _{к1} [кМ]	Л _{к2} [кМ]
1	12	13	10×АС-150	19×АС-185
2	12	11	11×АС-150	18×АС-185
3	12	10	12×АС-150	17×АС-185
4	12	12	13×АС-150	16×АС-185
5	10	13	14×АС-150	15×АС-185
6	10	11	15×АС-150	14×АС-185
7	10	10	16×АС-150	13×АС-185
8	11	13	17×АС-150	12×АС-185
9	11	11	18×АС-150	11×АС-185
10	13	13	19×АС-150	10×АС-185

Таблиця 3.4. Варіанти віддалених фідерів (35, 10 кВ) підстанцій

№ _{вар.}	ВЛ35 кВ[кМ]	КЛ10 кВ[кМ]
1	14.5×АСУ-240	3.0×АСБ-185
2	14.0×АСУ-240	3.2×АСБ-185
3	13.5×АСУ-240	3.4×АСБ-185
4	13.0×АСУ-240	3.6×АСБ-185
5	12.5×АСУ-240	3.8×АСБ-185
6	12.0×АСУ-240	4.0×АСБ-185
7	11.5×АСУ-240	4.2×АСБ-185
8	11.0×АСУ-240	4.6×АСБ-185
9	10.5×АСУ-240	4.8×АСБ-185
10	10.0×АСУ-240	5.0×АСБ-185

4. Методичний матеріал до розрахунку режиму методом Ньютона

Метод ґрунтується на загальному рівнянні зв'язку напруг і струмів електричної мережі

$$[\mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{U}] = [\mathbf{I}] \quad (4.1)$$

Помноживши обидві частини на діагональну матрицю сполучених напруг $[\hat{\mathbf{U}}]$, отримаємо

$$\begin{aligned} [\hat{\mathbf{U}}][\mathbf{Y}][\mathbf{U}] &= [\hat{\mathbf{U}}][\mathbf{I}] = [\mathbf{S}] \\ [\mathbf{S}] - [\hat{\mathbf{U}}][\mathbf{Y}][\mathbf{U}] &= [\mathbf{0}] = [\mathbf{F}] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Для довільного вектора $[\mathbf{U}]$ вираз (4.1) по кожному рівнянню має нев'язки $\mathbf{F}\mathbf{i}$, які в точці розв'язання мають дорівнювати 0. Форму запису системи (4.2) прийнято

називати **рівнянням стану мережі**. В алгебраїчній формі рівняння стану записуються для окремих рядків

$$\hat{S}_i - \sum \hat{U}_i \hat{Y}_{ij} \hat{U}_j = \hat{F}_i \quad (4.3)$$

У комплексному просторі розв'язок нелінійної системи методом Ньютона повинен мати вигляд:

$$[j][\Delta X] = -[F], \quad [\Delta X] = [\Delta U], \quad (4.4),$$

де $[j]$ - матриця Якобі, що містить частинні похідні

$$\partial \hat{F}_i / \partial \hat{U}_j, \quad i = 1.2..n, \quad j = 1.2..n$$

Комплексная функція \hat{F}_i є **не аналітичною** і система (4.2) є не коректною. Доводиться переходити в дійсний простір подвоєної розмірності і записувати рівняння по дійсній та уявній складовій окремо. Позначимо добуток комплексних чисел:

$$\hat{U}_i \hat{U}_j \hat{Y}_{ij} = p_i + j q_{ij} \quad (4.5)$$

Виділимо із суми (4.5) складові для $i = j$, оскільки в матриці $[Y]$ елемент Y_{ij} є від'ємним, отримуємо рівняння:

$$\begin{cases} P_i - U_i^2 G_{ii} - \sum p_{ij} = F_i \\ Q_i + U_i^2 B_{ii} + \sum q_{ij} = F_i^* \end{cases} \quad (4.6)$$

Дана форма системи (форма 1) є рівнянням стану мережі в дійсному просторі. Комплексні змінні, що входять в рівність (4.6), мають вигляд:

$$\begin{aligned} U_i^2 &= U \alpha_i^2 + U r_i^2 \\ \dot{Y}_{ij} &= \dot{G}_{ij} + j \dot{B}_{ij} \\ \hat{U}_i &= U \alpha_i - j U r_i = U_i (\cos \theta_i - j \sin \theta_i) \\ \hat{U}_j &= U \alpha_j + j U r_j = U_j (\cos \theta_j - j \sin \theta_j) \end{aligned}$$

Виконавши ряд алгебраїчних перетворень, можна перейти до форми 2 рівняння стану мережі, де в явному вигляді використовуються змінні U , θ (модуль вектора напруги та його кут):

$$\begin{cases} P_i - U_i^2 G_{ii} - \sum U_i U_j \alpha_{ij} = 0 = F_i \\ Q_i + U_i^2 B_{ii} - \sum U_i U_j \beta_{ij} = 0 = F_i^* \end{cases} \quad (4.7)$$

де $\alpha_{ij} = G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)$

$$\beta_{ij} = G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)$$

Обидві наведені форми (1, 2) рівняння стану мережі використовують полярні координати, але форма 1 при обчисленнях є більш економічною (не вимагає обчислення функцій \cos , \sin).

У дійсному просторі *подвоєної розмірності* можна лінеаризоване рівняння Ньютона представити в тому ж вигляді:

$$[J][\Delta X] = -[F],$$

де всі елементи матриць та векторів є блоковими структурами **2x2** або **2x1**:

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} \partial F_i / \partial U_j & \partial F_i / \partial \theta_j \\ \partial F_i^* / \partial U_j & \partial F_i^* / \partial \theta_j \end{bmatrix} \quad \Delta X_j = \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad F_i = \begin{bmatrix} F_i \\ F_i^* \end{bmatrix}$$

Частинні похідні для форми 1 і форми 2 з виділенням компонентів ($i=j$) та ($i \neq j$), відповідно дорівнюють:

Форма 2	Форма 1
$\frac{\partial F_i}{\partial U_j} (i = j) = -2G_{ii}U_i - \sum U_j \alpha_{ij}$	$= 1/U_i (-2U_i^2 G_{ii} - \sum p_{ij})$
$\frac{\partial F_i}{\partial U_j} (i \neq j) = -U_i \alpha_{ij}$	$= -\frac{1}{U_j} p_{ij}$
$\frac{\partial F_i^*}{\partial U_j} (i = j) = 2B_{ii}U_i - \sum U_j \beta_{ij}$	$= 1/U_i (2U_i^2 B_{ii} + \sum q_{ij})$
$\frac{\partial F_i^*}{\partial U_j} (i \neq j) = -U_i \beta_{ij}$	$\frac{1}{U_j} \cdot q_{ij}$
$\frac{\partial F_i}{\partial \theta_j} (i = j) = -\sum U_i U_j \beta_{ij}$	$= \sum q_{ij}$
$\frac{\partial F_i}{\partial \theta_j} (i \neq j) = U_i U_j \beta_{ij}$	$= -q_{ij}$
$\frac{\partial F_i^*}{\partial \theta_j} (i = j) = \sum U_i U_j \alpha_{ij}$	$= \sum p_{ij}$
$\frac{\partial F_i^*}{\partial \theta_j} (i \neq j) = -U_i U_j \alpha_{ij}$	$= -p_{ij}$

Відзначимо, що зв'язок між формами 1 і 2 визначається виразами

$$Re(\hat{U}_i \hat{U}_j \hat{Y}_{ij}) = p_{ij} = U_i U_j \alpha_{ij}$$

$$Im(\hat{U}_i \hat{U}_j \hat{Y}_{ij}) = q_{ij} = -U_i U_j \beta_{ij}$$

Матричне подання лінеаризованого рівняння Ньютона показано на рис. 4.1. (для простоти прийнята блокова розмірність 3×3). Всі колонки матриці Якобі з похідними $\partial F_i / \partial U_j$ и $\partial F_i^* / \partial U_j$ діляться на модуль U_i . Це дозволяє представити матрицю Якобі у вигляді добутку спрощеного її варіанту на діагональну блочну матрицю, в якій кожен діагональний блок 2×2 має вигляд:

$$D_i = \begin{bmatrix} U_i^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Отримали лінеаризовану систему

$$[J^*][D][\Delta X] = -[F], \quad [J^*][\Delta X^*] = -[F],$$

де $[J^*]$ - матриця Якобі зі спрощеними елементами $\frac{\partial F}{\partial U}$;

$[\Delta X^*]$ - вектор невідомих з відносними значеннями поправок

$$\Delta U_i^* = \Delta U_i / U_i.$$

Після розв'язання блокової лінійної системи виконується повернення до абсолютних одиниць напруги за виразом

$$U^{(t+1)} = U^{(t)}(1 + \Delta U^*).$$

Відзначимо, що блокова структура матриці Якобі повністю відповідає структурі матриці Y , оскільки при $Y_{ij} = 0$, маємо нульові значення p_{ij}, q_{ij} .

Отже, для факторизації матриці Якобі з повним правом можна користуватися моделлю ICM матриці Y (JK, INS, KI, NO, ON).

Згідно блокової факторизації матриця Якобі розміщується в векторах:

$$\begin{aligned} D_{11} &= -2 \cdot G_s \cdot U^2 - \sum p_{ij}; & D_{12} &= \sum q_{ij}; & \text{діагональні елементи;} \\ D_{21} &= 2 \cdot B_s \cdot U^2 + \sum q_{ij}; & D_{22} &= \sum p_{ij}; \\ V_{11} &= -p_{ij}; & V_{12} &= -q_{ij}; & \text{- елементи верхньої трикутної матриці;} \\ V_{21} &= q_{ij}; & V_{22} &= -p_{ij}; \\ H_{11} &= -p_{ji}; & H_{12} &= -q_{ji}; & \text{- елементи нижньої трикутної матриці;} \\ H_{21} &= q_{ji}; & H_{22} &= -p_{ji}; \end{aligned}$$

$$F = P_s - G_s \cdot U^2 - \sum p_{ij}; \quad F^* = Q_s + B_s \cdot U^2 + \sum q_{ij} \quad \text{- елементи нев'язок.}$$

I	$(-2G_{11}U_1^2 - \sum p_{1j})/U_1$	$\sum q_{1j}$	$-p_{12}/U_2$	$-q_{12}$	$-p_{13}/U_3$	$-q_{13}$
	$(2B_{11}U_1^2 + \sum q_{1j})/U_1$	$\sum p_{1j}$	q_{12}/U_2	$-p_{12}$	q_{13}/U_3	$-p_{13}$
II	$-p_{21}/U_1$	$-q_{21}$	$(-2G_{22}U_2^2 - \sum p_{2i})/U_2$	$\sum q_{2j}$	$-p_{23}/U_3$	$-q_{23}$
	q_{21}/U_1	$-p_{21}$	$(2B_{22}U_2^2 + \sum q_{2j})/U_2$	$\sum p_{2j}$	q_{23}/U_3	$-p_{23}$
III	$-p_{31}/U_1$	$-q_{31}$	$-p_{32}/U_2$	$-q_{32}$	$(-2G_{33}U_3^2 - \sum p_{3j})/U_3$	$\sum q_{3j}$
	q_{31}/U_1	$-p_{31}$	q_{32}/U_2	$-p_{32}$	$(2B_{33}U_3^2 + \sum q_{3j})/U_3$	$\sum p_{3j}$
	I		II		III	

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta U_3 \\ \Delta \theta_3 \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} F_1 \\ F_1^* \\ F_2 \\ F_2^* \\ F_3 \\ F_3^* \end{bmatrix} & [J][\Delta X] &= [F] & \Delta X_j &= \begin{bmatrix} \Delta U_j \\ \Delta \theta_j \end{bmatrix} \\ & & J_{ij} &= \begin{bmatrix} \delta F_i / \delta U_j & \delta F_i / \delta \theta_j \\ \delta F_i^* / \delta U_j & \delta F_i^* / \delta \theta_j \end{bmatrix} & & F_i = \begin{bmatrix} F_i \\ F_i^* \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Рис. 4.1. Блочно-матричне подання лінеаризованого рівняння стану електричної мережі за методом Ньютона-Рафсона.

Блочно-матричне подання матриці Якобі у відносних одиницях ΔU .

I	$-2G_{21}U_1^2 - \sum p_{1j}$	$\sum q_{1j}$	$-p_{12}$	$-q_{12}$	$-p_{13}$	$-q_{13}$
	$2B_{11}U_1^2 + \sum q_{1j}$	$\sum p_{1j}$	q_{12}	$-p_{12}$	q_{13}	$-p_{13}$
II	$-p_{21}$	$-q_{21}$	$-2G_{22}U_2^2 - \sum p_{2j}$	$\sum q_{2j}$	$-p_{23}$	$-q_{23}$
	q_{21}	p_{21}	$2B_{22}U_2^2 + \sum q_{2j}$	$\sum p_{2j}$	q_{23}	p_{23}
III	$-p_{31}$	$-q_{31}$	$-p_{32}$	$-q_{32}$	$2G_{33}U_3^2 \sum p_{3j}$	$\sum q_{3j}$
	q_{31}	$-p_{31}$	q_{32}	$-p_{32}$	$2B_{33}U_3^2 + \sum q_{3j}$	$\sum p_{3j}$
	I		II		III	

Блок вектора невідомих:

ΔU_i^*	$\Delta U_i^* = \Delta U_i / U_i \longrightarrow$ перехід у відносні одиниці U_i .
$\Delta \theta_i$	Повернення в абсолютні одиниці $U^{(t+1)} = U^{(t)} (1 + \Delta U^*)$

Рис. 4.1. Продовження.

Будемо називати розглянутий метод Ньютона N_REGIM_S. У пакеті № 2 лабораторних робіт метод має номер 7. Програмна реалізація наведена у відповідній лабораторній роботі.

Алгоритм методу представлений на рис. 4.2. Використовуються процедури розрахунку моделі INM блокової матриці Якобі (N_MOD), факторизації (N_FKT) і розв'язання СЛУ (N_RSL) згідно лінеаризованої форми 1. В алгоритмі виділено створення у динамічній пам'яті блокових масивів D, V, H. Модель ICM не створюється, а використовуються рішення для матриці Y (LAB3).

Приклад: Розглянемо схему з трьома вузлами і відомим збалансованим режимом (рис. 4.3.).

Перевіримо правильність рівняння стану форми 1. Значення величин p_{ij} , q_{ij} згідно зі схемою будуть дорівнювати:

$$p_{12} + jq_{12} = 100 \cdot (70 - j10) \cdot (0.02 - j0.04) = 100 - j300;$$

$$p_{21} + jq_{21} = 100 \cdot (70 + j10) \cdot (0.02 - j0.04) = 180 - j260;$$

$$p_{23} + jq_{23} = (70 + j10) \cdot (66 - j11) \cdot (0.1 - j0.1) = 462 - j484;$$

$$p_{32} + jq_{32} = (70 - j10) \cdot (66 + j11) \cdot (0.1 - j0.1) = 484 - j462.$$

При цих даних нев'язки рівнянь станів мережі $F_i = 0$; $F_i^* = 0$:

$$\text{Вузол 1: } F_1 = 100 + 0.02 \cdot 100^2 - 100 = 0$$

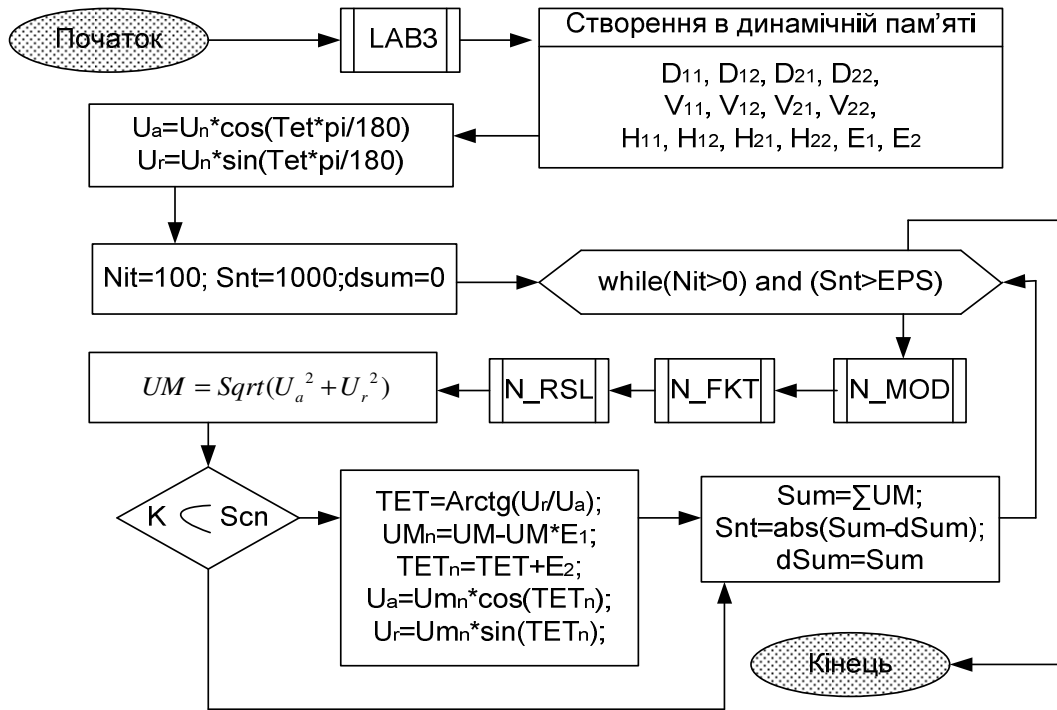
$$F_1^* = -100 + 0.04 \cdot 100^2 + (-300) = 0$$

$$\text{Вузол 2: } F_2 = 42 + 0.12 \cdot (70^2 + 10^2) - (180 + 462) = 0;$$

$$F_2^* = 44 + 0.14 \cdot (70^2 + 10^2) + (-260 - 484) = 0.$$

Вузол 3: $F_3 = 36.3 + 0.1 \cdot (66^2 + 11^2) - 484 = 0;$

$$F_3^* = 14.3 + 0.1 \cdot (66^2 + 11^2) + (-462) = 0.$$



N_MOD - процедура розрахунку матриці Якобі і вектора F;
 N_FKT, N_RSL - процедури факторизації і розв'язання СЛР,
 орієнтовані на блоковий варіант (2x2) моделі матриці;
 U_{mn}, TET_n – нові модулі напруг і їх кути.

Рис. 4.2. Алгоритм розрахунку режиму методом Ньютона N_REGIM_S.

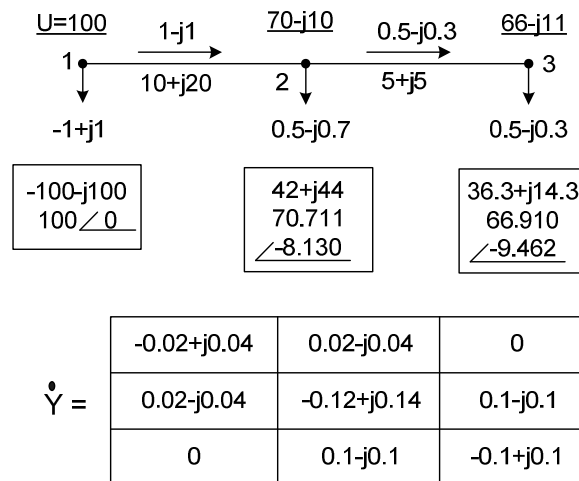


Рис. 4.3. Приклад схеми для розрахунку режиму за Ньютоном.

5. Методичний матеріал до оптимізації режимів за критерієм мінімуму втрат активної потужності

При оптимізації цільової функції методом спуску по антиградієнту одним з принципових питань є формалізація вибору кроку спуску і динаміки його зміни в оптимізаційному процесі. Це завдання досить складне. У сучасних промислових програмних комплексах оптимізації режимів, як правило, задачу вибору кроку розв'язує користувач. Це рішення є вимушеними, збільшує витрати часу на оптимізацію і вимагає участі кваліфікованого персоналу. Нижче розглядається метод, що автоматизує вибір кроку спуску.

При оптимізації з використанням методу спуску по антиградієнту, коли заведомо відомо, що критерій оптимальності є *квадратичною формою*, можна запропонувати наступну модернізацію процесу:

1. Маємо стандартний математичний вираз процесу

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + \lambda [\partial F / \partial X]^{(k)}, \quad (5.1)$$

де $[X]^{(k)}, [X]^{(k+1)}$ - вектор невідомих до і після k-го кроку оптимізації;

F - квадратична форма критерію оптимальності;

$[\partial F / \partial X]^{(k)}$ - вектор-градієнт в даній точці простору. Кожен

елемент градієнта є частинною похідною критерію оптимальності за конкретним регулятором;

λ - оптимальний або вибраний евристично крок спуску.

2. Даний вираз можна розглядати у формі з поправками координат

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [\Delta X]^{(k)}, \quad (5.2)$$

3. Оскільки для квадратичної форми функція $f[\partial F / \partial x]$ по кожній координаті незалежно є лінійною, можна визначити принципові оптимальні значення поправок $\Delta X_i^{\text{опт}}$, які забезпечують рух в точку глобального оптимуму за окремими координатами

$$\Delta X_i^{\text{опт}} = X_i + \Delta X_i^{\text{опт}}, \quad (5.3)$$

4. Маючи вектор $[\Delta X^{\text{опт}}]$, можна запропонувати оптимізаційний процес

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [\omega][\Delta X^{\text{опт}}]^{(k)}, \quad (5.4)$$

де $[\omega]$ - діагональна матриця формально обчислюваних коефіцієнтів для кроків спуску з різних координатами квадратичної форми.

При переході до завдань оптимізації розподілу реактивних потужностей, де головним критерієм є мінімум сумарних втрат активної потужності, необхідно розраховувати частинні похідні $\partial \Delta P / \partial Q_i$. Оскільки явної функції розрахунку втрат для складної електричної мережі не маємо (загальне математичне вираження порівняно громіздке), доцільно користуватися методом чисельного диференціювання. Для цього необхідно мати швидкодіючу програму розрахунку усталеного режиму, яка забезпечує розрахунок втрат з високою точністю (небаланс у вузлі $10^{-5} \div 10^{-7}$). У даній роботі такою програмою обрана навчальна процедура розрахунку режиму методом Ньютона. Висока розрахункова

точність дозволяє використовувати найпростіші варіанти чисельного диференціювання на підставі двох близько розташованих точок функції критерію:

$$\partial \Delta P / \partial Q_i \approx (\Delta P - \Delta P_i) / \Delta Q_i, \quad (5.5)$$

де ΔQ_i - приріст реактивної потужності до поточного значення Q_i ;

$\Delta P, \Delta P_i$ - поточне і нове (з урахуванням приросту ΔQ_i) значення втрат.

Величина ΔQ_i може бути обрана автоматично, наприклад, в залежності від номінального рівня напруги в точці регулювання $\Delta Q_i = U_{\text{ні}} \cdot K_d$.

Якщо коефіцієнт $K_d = 0,001$, маємо

$$750 \text{ кВ: } \Delta Q = 0,75 \text{ Мвар}$$

$$330 \text{ кВ: } \Delta Q = 0,33 \text{ Мвар}$$

$$220 \text{ кВ: } \Delta Q = 0,22 \text{ Мвар}$$

$$10 \text{ кВ: } \Delta Q = 0,01 \text{ Мвар}$$

Для розрахунку $\Delta Q_i^{\text{опт}}$ по кожній координаті, необхідно формалізувати обчислення коефіцієнтів лінійного рівняння $y = ax + b$ за двома заданими точками $[x_1, y_1], [x_2, y_2]$. Маємо наступне розв'язання:

$$\begin{cases} y_1 = ax_1 + b \\ y_2 = ax_2 + b \end{cases} \quad \begin{cases} a = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) \\ b = (x_1 y_2 - x_2 y_1) / (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (5.6)$$

Вважаємо функцію похідної втрат по реактивній потужності лінійною. Її коефіцієнти будемо отримувати методом чисельного диференціювання. Графічний сенс чисельного диференціювання та пошуку оптимуму для реактивної потужності за окремою координатою показаний на рис. 5.1.

Таким чином, маємо координати трьох точок залежності $\Delta P = f(Q)$

Q_t	$Q_t + dQ_t$	$Q_t + 2dQ_t$
DP_t	DP_1	DP_2

Наявність зазначених трьох точок функції $\Delta P = f(Q)$ дозволяє обчислити значення двох точок функції градієнта $\partial \Delta P / \partial Q = f'(Q)$

Q_t	$Q_t + dQ_t$
GR_1	GR_2

$$\begin{aligned} GR_1 &= (DP_t - DP_1) / dQ_t \\ GR_2 &= (DP_1 - DP_2) / dQ_t \end{aligned} \quad (5.7)$$

Наявність двох точок для градієнта дає можливість визначити коефіцієнти (a, b) лінійної функції згідно (5.6):

$$\begin{aligned} \partial \Delta P / \partial Q &= a * Q + b, \\ a &= -(GR_1 - GR_2) / dQ_t, \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$b = GR1 + (GR1 - GR2)/dQt$$

Якщо перейти до $Q = Qt + \Delta Q$ (відхилення від поточного значення), отримаємо остаточну формулу:

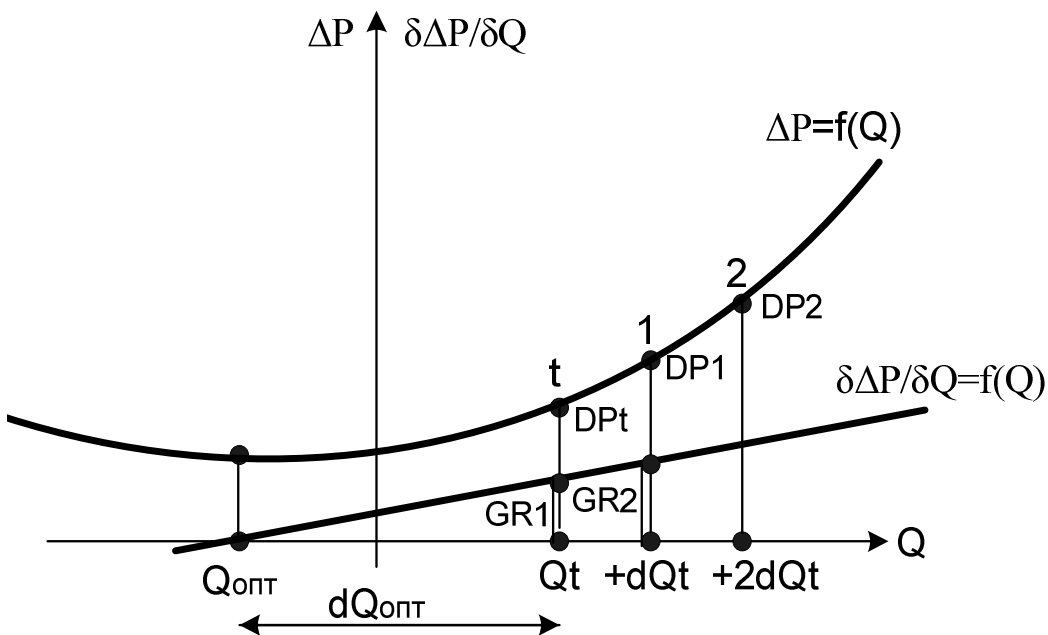
$$\partial \Delta P / \partial Q = -[(GR1 - GR2)/dQt] * \Delta Q + GR1 \quad (5.9)$$

Оскільки в точці мінімальних втрат (Q^{opt}) похідна $\partial \Delta P / \partial Q$ має дорівнювати нулю, маємо оптимальне відхилення рівне

$$\Delta Q^{opt} = GR1 * dQt / (GR1 - GR2) \quad (5.10)$$

Таким чином, необхідно реалізувати спуск згідно з формулою

$$[Q]^{(k+1)} = [Q]^{(k)} + [\omega][\Delta Q^{opt}] \quad (5.11)$$



де ΔP - квадратична функція залежності втрат від реактивної потужності;

$\partial \Delta P / \partial Q$ - лінійна функція похідних по реактивній потужності;

DPt, Qt - втрати і реактивна потужність в поточній точці;

$DP1, (Qt + dQt)$ - втрати і реактивна потужність з відхиленням dQt ;

$DP2, (Qt + 2dQt)$ - втрати і реактивна потужність з відхиленням $2dQt$.

Рис. 5.1. Графічний зміст чисельного диференціювання та пошуку оптимального значення.

Коефіцієнт ω_i може бути індивідуальним для кожної координати і визначається згідно з принципом вагової пропорційності

$$\begin{aligned}\omega_i &= |GR_i|/\sum |GR_i|, \text{ або} \\ \omega_i &= |GR_i|/\sqrt{\sum GR_i^2}, \text{ або} \\ \omega_i &= GR_i^2/\sum GR_i^2.\end{aligned}\tag{5.12}$$

Всі наведені формули забезпечують крок по конкретній координаті пропорційно значенню відповідної похідної - компоненті вектора-градієнта. Відзначимо, що в одновимірному просторі $\omega_i = 1$.

Загальний алгоритм оптимізації має вигляд:

- 1: **Визначення** в розрахунковій схемі вузлів регулювання реактивної потужності;
- 2: **Розрахунок** вихідного режиму;
- 3: **Вибір** приростів dQt для розрахунку похідних;
- 4: **Запуск** програми N_REGIM_S. Отримання таблиці втрат:

N_{yz}	Q_i	dQt_i	DPt_i	$DP1_i$	$DP2_i$
----------	-------	---------	---------	---------	---------

- 5: **Розрахунок** похідних згідно (5.7.):

$$GR1_i = (DPt - DP1_i)/dQt_i$$

$$GR2_i = (DP1_i - DP2_i)/dQt_i$$

- 6: **Розрахунок** оптимальних координатних приростів згідно (5.10.):

$$\Delta Q_{opt}_i = GR1_i * dQt_i / (GR1_i - GR2_i);$$

- 7: **Розрахунок** коефіцієнтів кроку спуску згідно (5.12):

$$SGR = \sum GR1_i^2; \quad \omega_i = |GR1_i|/\sqrt{SGR};$$

- 8: **Розрахунок** нових значень реактивних потужностей:

$$Q_{нов}_i = Q_i + \omega_i * \Delta Q_{opt}_i;$$

- 9: **Фіксація** вектора $Q_{нов}_i$ в розрахунковій схемі;

- 10: **Аналіз** збіжності процесу.

Розглянутий метод спуску по антиградієнту будемо називати *методом з прогнозом глобальних оптимумів* по кожній координаті.

Виконаємо оптимізацію режиму по реактивній потужності для розрахункової схеми рис. 5.2., де наведені конфігурація, параметри схеми і результати розрахунку режиму за допомогою програми N_REGIM_S.

Як регулятори реактивної потужності виберемо два вузли 5 (330 кВ) і 10 (150 кВ). Оптимізацію будемо виконувати без урахування технологічних обмежень.

На рис. 5.3. і рис 5.4. представлені результати оптимізації схеми рис. 5.2. в автоматичному режимі без участі користувача.

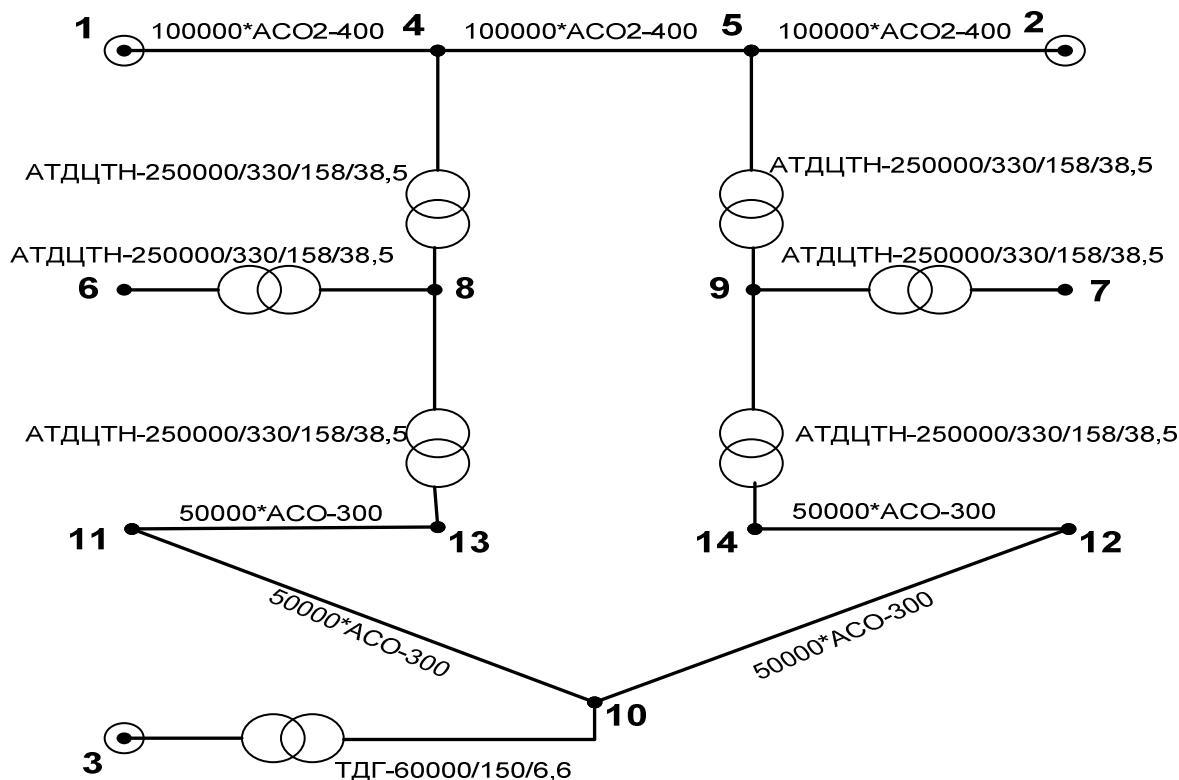


Рис. 5.2. Розрахункова схема прикладу paket2.

Таблиця рис. 5.3. містить інформацію про процес спуску:

Q_s - стан реактивних потужностей вузлів 5, 10;

dQ - приріст реактивної потужності для розрахунку похідних;

$DPT, DP1, DP2, GR1, GR2, DQT$ - числові значення втрат, градієнтів і оптимальних приростів для обчислення Q^{opt} по кожній координаті.

Праворуч на малюнку представлена збіжність процесу

$$0.02020 \rightarrow 0.00357 \rightarrow 0.00056 \rightarrow 0.0002$$

На рис. 5.4. показані результати розрахунку оптимального режиму і для порівняння інтегральні характеристики вихідного режиму. Отримано зниження втрат

$$\Delta DP = (3.573 + 1.318) - (2.812 + 1.359) = 0.72 \text{ МВт.}$$

Згідно наведеного алгоритму розрахунків за участю користувача процедура оптимізації видає таблицю даних для ручних розрахунків. Оскільки розрахунки похідних вимагають дуже високої точності в таблиці величини втрат доцільно представляти масштабовані (наприклад збільшеними в 1000 разів) і друкувати тільки дробову частину. При цьому збільшиться кількість значущих цифр для ручних обчислень. Відповідно величини $DPT, DP1, DP2$ будуть представлені значеннями $dDPT, dDP1, dDP2$,

наприклад: $DPT = 4.8912914 \rightarrow dDPT = 0.2914440$

***** Результаты расчета GRADIENT File= paket2 *****

Nnn	Name	Qs	dQt	DPT	DP1	DP2	GR1	Gr2	DQT
1	5	0.0000	0.3300	4.8912914	4.8919125	4.8925384	-0.0018820	-0.0018968	-42.18653398
2	10	20.0000	0.1500	4.8912914	4.8940393	4.8967932	-0.0183193	-0.0183593	-68.57026345
									### 0 0.02020 0.02020 ###
1	5	-4.3113	0.3300	4.1958078	4.1960706	4.1963381	-0.0007964	-0.0008107	-18.42353385
2	10	-48.2112	0.1500	4.1958078	4.1962240	4.1966446	-0.0027748	-0.0028039	-14.32716141
									### 1 0.00357 0.01663 ###
1	5	-9.3940	0.3300	4.1730832	4.1732261	4.1733736	-0.0004329	-0.0004470	-10.11597565
2	10	-61.9824	0.1500	4.1730832	4.1731030	4.1731269	-0.0001319	-0.0001593	-0.72182942
									### 2 0.00056 0.00301 ###
1	5	-19.0709	0.3300	4.1709580	4.1709643	4.1709751	-0.0000189	-0.0000329	-0.44711250
2	10	-62.1927	0.1500	4.1709580	4.1709574	4.1709609	0.0000040	-0.0000233	0.02196560
									### 3 0.00002 0.00054 ###

***** Результаты расчета OPTIM_Q(Grad) File= paket2

Nnn	Name	Qs	Qmin	Qmax
1	5	-19.5084	-200.0000	200.0000
2	10	-62.1882	-100.0000	0.0000

4 0.00002 0.00054

Рис. 5.3. Процес автоматичної оптимізації розподілу реактивних потужностей з урахуванням обмежень по напрузі в схемі ракет2 (вузли 5, 10). Реактивна потужність регулюється у вузлах 5, 10. Процес зійшовся за 4 кроки спуску по антиградієнту.

***** Результаты расчета (N_REGIM_S) File= paket2 1 *****
 1 0.00000

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	0.000	0.000	0.133	-20.346	-113.050	28.635	1
2	2	345.000	0.000	345.000	0.000	0.000	0.000	0.137	-20.948	-119.057	-0.320	1
3	3	6.600	0.000	6.600	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-52.064	31.594	1
4	4	339.724	-1.813	339.554	-10.751	0.000	0.000	0.450	-38.767	0.000	0.000	0
5	5	341.917	-1.816	341.746	-10.837	0.000	-19.508	0.456	-39.269	0.000	0.000	0
6	6	38.044	-6.366	37.809	-4.218	40.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
7	7	38.262	-6.334	38.028	-4.221	40.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
8	10	159.571	-5.699	158.783	-15.846	40.000	-62.188	0.183	-1.686	0.000	0.000	0
9	11	157.525	-5.845	156.706	-16.041	40.000	20.000	0.000	-3.362	0.000	0.000	0
10	12	157.967	-5.832	157.149	-16.051	40.000	20.000	0.000	-3.381	0.000	0.000	0
11	13	159.013	-4.247	158.577	-11.776	40.000	20.000	0.000	-1.713	0.000	0.000	0
12	14	159.885	-4.234	159.449	-11.805	40.000	20.000	0.000	-1.732	0.000	0.000	0
13	8	332.760	-4.277	331.834	-24.815	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
14	9	334.586	-4.268	333.658	-24.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
SUMMA :						280.000	38.303	1.359	-131.204	-284.171	59.909	
BALANS:										2.812	32.992	
PAST SUMMA :						280.000	140.000	1.318	-128.687	-284.891	-48.004	
PAST BALANS:										3.573	36.690	

Рис. 5.4. Результаты автоматической оптимизации розподілу реактивних потужностей схеми paket2.
 Зниження втрат: $\Delta\Delta P = 0.72$ МВт.

Покрокова оптимізація згідно алгоритму має вигляд:

Крок 1

4: Маємо таблицю даних для кроку оптимізації (похідні у масштабі 10^2)

Name	Q_s	dQt	DPT	$dDPT$	$dDPT1$	$dDPT2$	MM
5	0.0000	0.0330	4.8912914	0.2914440	0.1912515	0.2538444	100
10	20.0000	0.0150	4.8912914	0.1291444	0.4039334	0.6793236	100

5: Розрахунок похідних (у масштабі 10^2)

вузол 5: $GR1 = (0.1291444 - 0.1912515) / 0.3300 = -0.1882$

$GR2 = (0.1912515 - 0.2535444) / 0.3300 = -0.1897$

вузол 10: $GR1 = (0.1291444 - 0.4039334) / 0.1500 = -1.8319$

$GR2 = (0.4039334 - 0.6793236) / 0.1500 = -1.8359$

6: Розрахунок оптимальних приростів:

вузол 5: $\Delta Q^{opt} = -0.1882 \cdot 0.3300 / (-0.1882 + 0.1897) = -41.404$

вузол 10: $\Delta Q^{opt} = -1.8319 \cdot 0.1500 / (-1.8319 + 1.8359) = -68.696$

7: Розрахунок коефіцієнтів кроку

$SGR = (0.1882^2 + 1.8319^2) = 3.3913$

вузол 5: $\omega = 0.1882 / \sqrt{3.3913} = 0.1022$

вузол 10: $\omega = 1.8319 / \sqrt{3.3913} = 0.9948$

8: Розрахунок нових значень Q:

вузол 5: $Q = 0.0000 + (-41.404) \cdot 0.1022 = -4.2315 \approx -4.3113 !!!$

вузол 10: $Q = 20.0000 + (-68.696) \cdot 0.9948 = -48.3388 \approx -48.2112 !!!$

9: Занесення (фіксація) нових значень Q відповідно до інструкції.

10: Контроль збіжності

$\sum |GR1| = (0.1882 + 1.8319) \cdot 10^{-2} = 0.0202 > EPS = 0.0001$

Крок 2

4: Маємо таблицю даних для оптимізації

Name	Q_s	dQt	DPT	$dDPT$	$dDPT1$	$dDPT2$	MM
5	-4.2315	0.3300	4.1955203	0.5520323	0.5783820	0.6052026	100
10	-48.3388	0.1500	4.1955203	0.5520323	0.5932973	0.6349979	100

5: Розрахунок похідних (у масштабі 10^3):

вузол 5: $GR1 = (0.5520323 - 0.5783820) / 0.330 = -0.07985$

$GR2 = (0.5783820 - 0.6052026) / 0.330 = -0.08127$

вузол 10: $GR1 = (0.5520323 - 0.5932973) / 0.150 = -0.2751$

$GR2 = (0.5932973 - 0.6349979) / 0.150 = -0.2780$

6: Розрахунок оптимальних приростів:

вузол 5: $\Delta Q^{opt} = -0.07985 \cdot 0.330 / (-0.07985 + 0.08127) = -18.5567$

вузол 10: $\Delta Q^{opt} = -0.2751 \cdot 0.150 / (-0.2751 + 0.2780) = -14.2293$

7: Розрахунок коефіцієнтів кроку

$$SGR = (0.07985^2 + 0.2751^2) = 0.08206$$

$$\text{вузол 5: } \omega = 0.07985 / \sqrt{0.08206} = 0.2787$$

$$\text{вузол 10: } \omega = 0.2751 / \sqrt{0.08206} = 0.9603$$

8: Розрахунок нових значень Q:

$$\text{вузол 5: } Q = -4.2315 - 18.5567 \cdot 0.2787 = -9.4032 \approx -9.3940 !!!$$

$$\text{вузол 10: } Q = -48.3388 - 14.2293 \cdot 0.9603 = -62.0032 \approx -61.9824 !!!$$

9: Занесення (фіксація) нових значень Q відповідно до інструкції.

10: Контроль збіжності

$$\sum |GR| = (0.07985 + 0.2780) \cdot 10^{-2} = 0.0036 > EPS = 0.0001$$

$$0.00036 > EPS = 0.0001$$

Аналогічно реалізуються кроки 3, 4, 5 тощо.

6. Методичний матеріал до розрахунку трифазних струмів короткого замикання на основі матриці Y

Режими з трифазними коротким замиканням є симетричними і можуть бути визначені для довільних точок розрахункової схеми (або їх сукупності) на основі звичайної режимної математики. У стандартних лекційних (спрощених) методах визначення струмів короткого замикання схеми приводяться до одного рівня напруги і розрахунок реалізуються шляхом перетворення схеми до $X_{\text{екв}}$. При необхідності мати результуючий струморозподіл у повній схемі реалізується зворотне розгортання від еквівалентного опору до вихідної схеми.

Використання стандартних програм розрахунку режиму для розрахунків короткого замикання базується на загальних електротехнічних залежностях струмів і напруг через матрицю провідностей Y . Оскільки в заданій ситуації задача є лінійною можна використовувати процедури Z_REGIM_T (у струмах). Маємо вихідну систему рівнянь:

$$[Y][U] = [I].$$

Виділимо в заданій матричній структурі блоки, що відповідають балансуєчим вузлам (b), вузлам, в яких фіксується струм короткого замикання (k), і навантажувальним вузлам (n):

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} & Y_{bk} & Y_{bn} \\ Y_{kb} & Y_{kk} & Y_{kn} \\ Y_{nb} & Y_{nk} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_{k3} \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b \\ I_{k3} \\ I_n \end{bmatrix}$$

Вузли (b) є системними і трактуються як шини нескінченної потужності. Вузли (k) мають фіксоване значення напруги $U_{k3} \approx 0$ і по суті також є

балансуючими. Напруги у всіх інших вузлах (n) можуть бути визначені за стандартним виразом методу Z_REGIM_T:

$$[\dot{U}_n] = [\dot{Z}_{nn}][\dot{Y}_{nb}][\dot{U}_b] - [\dot{Z}_{nn}][\dot{I}_n], \quad (6.1.)$$

де $[\dot{Z}_{nn}]$ - матриця опорів впливу, зворотня матриці $[\dot{Y}_{nn}]$;

$[\dot{Y}_{nb}]$ - об'єднана блокова структура $[\dot{Y}_{nb} \quad \dot{Y}_{nk}]$;

$[\dot{U}_b]$ - об'єднаний вектор балансуючих вузлів $\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_{kz} \end{bmatrix}$.

Як правило, при розрахунках струмів короткого замикання поперечні провідності ліній і навантажувальні струми вузлів не враховуються.

Для розрахунку короткого замикання безпосередньо програмою Z_REGIM_T необхідно у вихідних даних занулити навантаження і поперечні провідності, ввести до складу БП вузли, де має місце коротке замикання ($U \approx 0$), розрахувати звичайний режим і обчислити струми в гілках за різницею напруг

$$I_{kz} = (U_{нач} - U_{кон}) / \sqrt{3} \times Z_l, \quad (6.2.)$$

де всі величини U модулі комплексних чисел.

Розрахунок струмів короткого замикання виконується в середовищі пакетів лабораторних робіт LB_APEZ_Z. Умови для розрахунку задаються відповідно до індивідуального варіанту у ключовому файлі AP_AKEY.PAS, що має структуру:

KEYf – ключ фіксації модулів напруги. При розрахунку короткого замикання не використовується і завжди дорівнює \emptyset , тобто KEYf = \emptyset ;

KEYz - ключ розрахунків струмів короткого замикання KEYz = 1. Якщо KEYz = \emptyset , в результуючому файлі будемо мати повідомлення ERROR;

KZ1, KZ2, KZ3 - номери вузлів розрахункової схеми, в яких (одночасно) моделюється трифазне коротке замикання. Якщо вузлів менше трьох, зайве заповнюються нулями.

Нехай для контрольної схеми raket2 (рис. 5.2.) необхідно розрахувати коротке замикання для вузла 10. Ключовий файл дорівнює:

```
KEYf KEYz KZ1 KZ2 KZ3
0 1 10 0 0
```

Структура результатів з режимом напруги і струморозподіленням представлена на рис. 6.1.

Значення струмів короткого замикання в гілках розрахункової схеми має напрямок від вузла початку (NameN) до вузла кінця (NameK) і фіксується на початку гілки. На рис. 6.2. отримані значення напруг та струмів короткого замикання нанесені на контрольну схему.

***** Результати розрахунку LAB8 (Z_REGIM_TKZ) File= paket2 *****

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000
2	2	345.000	0.000	345.000	0.000
3	3	6.600	0.000	6.600	0.000
4	4	300.085	-0.650	300.066	-3.402
5	5	301.678	-0.647	301.659	-3.409
6	6	28.534	-2.592	28.505	-1.290
7	7	28.686	-2.590	28.657	-1.296
8	10	0.000	0.000	0.000	0.000
9	11	58.350	-1.824	58.320	-1.857
10	12	58.660	-1.822	58.630	-1.865
11	13	116.700	-1.824	116.641	-3.714
12	14	117.319	-1.822	117.260	-3.729
13	8	244.569	-2.592	244.319	-11.060
14	9	245.867	-2.590	245.616	-11.109

Nnn	NameN	NameK	TKZ
1	1	4	0.716
2	2	5	0.777
3	4	5	-0.028
4	10	11	-1.555
5	10	12	-1.563
6	11	13	-1.555
7	12	14	-1.563
8	4	8	0.744
9	8	13	0.744
10	8	6	0.000
11	5	9	0.748
12	9	14	0.748
13	9	7	0.000
14	10	3	-1.941

Рис.6.1. Результати розрахунку струмів короткого замикання прикладу paket2.

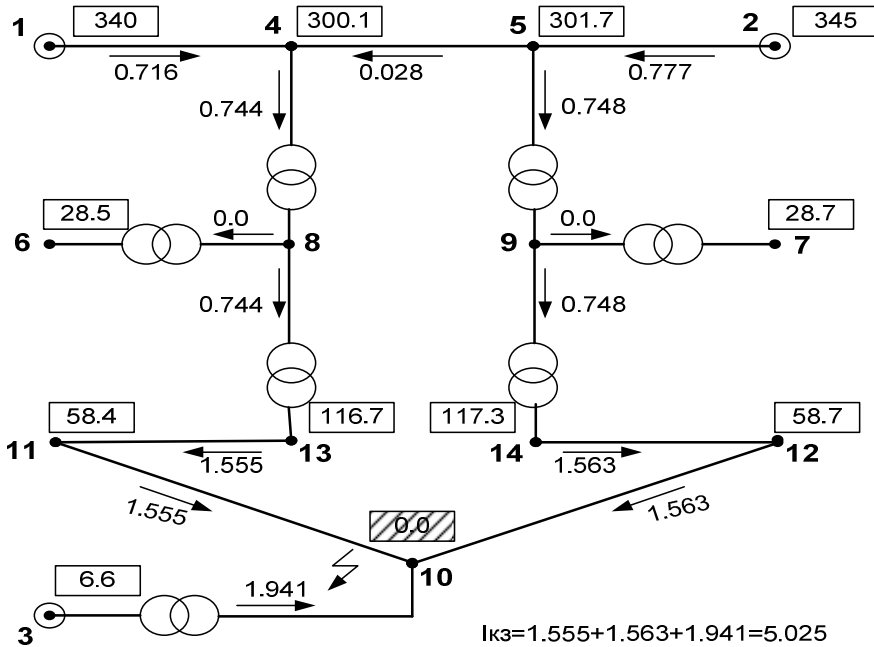


Рис. 6.2. Контрольна схема розрахунку струмів короткого замикання прикладу paket2.

7. Інтелектуальна технологія в реалізації розрахункових завдань бакалаврського проекту

Під інтелектуальної технологією розв'язання складної задачі будемо розуміти **процес взаємодії з провідною комп'ютерною програмою**, яка **підключає** до розрахункових дій користувача в певних алгоритмічних ситуаціях, **вимагає** від нього числової реалізації для виділеного функціонального фрагменту алгоритму, **вимагає** введення розрахункового результату, **контролює** коректність ручного розрахунку з заданою точністю, **продовжує** автоматичні розрахунки без участі користувача, **знову підключає** його для чергових дій ... тощо. Відповідно, **при прийомі некоректних** проміжних рішень від користувача, провідна програма сигналізує про помилкові пропозиції і повторює (можливо багаторазово) поточний запит. Користувач у момент **переривання** провідної програми повинен знайти (запитати) необхідні вихідні дані, виконати своїми засобами обумовлені алгоритмом розрахункові операції та за формальним протоколом взаємодії передати результати згідно запиту, що відпрацьовується. Інтелектуальна технологія розрахунків задіюється в **тренажерних** комп'ютерних системах, програмних **засобах навчання**, в автоматизованих **системах управління** з безперервним циклом роботи провідної програми та ін. В принципі, можливі універсальні програмні рішення на основі запрограмованих **синхронних** переривань, а також можливі рішення з підключенням до обчислювального процесу **«керівника»**, що генерує механізм запитів в **асинхронному режимі**. Необхідність у використанні інтелектуальних розрахункових технологій виявляється в ситуаціях, коли, наприклад, згідно з промисловим методичним рішенням є значна кількість різноманітних параметричних визначень, коли тривіальні розрахункові схеми не задовольняють вимогам оцінки знань користувача (у складних схемах виконання ручних розрахунків повністю неможливо і недоцільно), коли керівник не в змозі коректно проконтролювати багатоваріантний розрахунковий матеріал тощо.

8. Контрольні приклади

8.1. Інструкція і приклад розробки розрахункової схеми, режимно-схемний аналіз, введення режиму в допустиму область

Розрахункова схема енергосистеми є спільною для всіх бакалаврських робіт. Структура мережі ЕС представлена на рис. 8.1. Кодування конфігурації, параметри ліній і трансформаторів, задані і невідомі режимні характеристики записані в загальних файлах з ім'ям ES комплексу РАОТП. Файли вузлів та гілок, загальні характеристики і автоматична графіка з вихідним режимом наведені на рис.8.2.

Схема: ES - Вузли схеми

№	N вузла	П	Rнав	Qнав	Pген	Qген	Um	Uрасч	Вугол	P расч	Q расч
1	1	b			218,9044	63,5099	340	340,000		-218,904400	-63,509910
2	2		200,000	120,000			330	336,285	-1,942	200,000000	120,000000
3	3	b			194,4225	97,2200	345	345,000		-194,422500	-97,220050
4	4		50,000	30,000			110	119,739	-2,787	50,000000	30,000000
5	5		70,000	50,000			110	119,867	-3,360	70,000000	50,000000
6	6		15,000	7,000			110	114,846	-5,503	15,000000	7,000000
7	7		10,000	8,000			110	114,941	-5,633	10,000000	8,000000
8	8		18,000	10,000			110	112,025	-7,080	18,000000	10,000000
9	9		20,000	10,000			110	112,238	-6,977	20,000000	10,000000
10	10		3,000	1,000			35	37,819	-4,478	3,000000	1,000000
11	11		3,000	1,000			35	37,784	-5,248	3,000000	1,000000
12	12		10,000	5,000			35	38,291	-3,674	10,000000	5,000000
13	13		10,000	5,000			35	38,340	-4,255	10,000000	5,000000
14	100						330	330,584	-2,806		
15	101						330	330,991	-3,3		

Схема : ES - загальні характеристики режиму
Схема : ES (Дата розрахунку: 13.04.2010 10:37:14)

Вузлів=15 Гілок=15 Контурів=2 БП=2 ФМ=0

Точність розрахунку : 1E-7
Нев'язка по напрузі : 0,000000, вузол: 8
Нев'язка по конт.струмам : 0,000000
Кількість ітерацій : 12, час розрахунку: 0:00:00

Споживання: 409.000 МВт 247.000 МВАр
Генерація : -413.327 МВт -160.730 МВАр
Балансна потужність : 0.000 МВт 0.000 МВАр
Втрати в схемі : 4.327 МВт -86.270 МВАр
Втрати від навантаження : 3.222 МВт 30.641 МВАр
від актив.перетоків: 2.627 МВт
від реакт.перетоків: 0.595 МВт
Втрати холост.ходу : 1.105 МВт -116.911 МВАр
шунтуючі реакт.: 0.000 МВт 0.000 МВАр
конденсатор. уст. : 0.000 МВт 0.000 МВАр
Небаланс в схемі : -0.000 МВт -0.000 МВАр

Схема: ES – Гілки схеми

№	Nпоч.	Nкін.	k	R	X	G	B	Kт'	Марка	Nвідг	Регулювання
1	1	2		3,700	32,10000	2,3	-352,0		100000*AC2-400		
2	2	3		6,290	54,57000	3,9	-598,4		170000*AC2-400		
3	4	6		7,860	24,24000		-169,2		60000*ACO-240		
4	5	7		6,550	20,20000		-141,0		50000*ACO-240		
5	6	8		7,800	26,06500		-185,3		65000*AC-240		
6	7	9		6,240	16,36000		-112,8		40000*AC-240		
7	8	9		4,680	12,27000		-84,6		30000*AC-185		
8	12	10		3,400	7,86000		-58,2		20000*ACO-185		
9	13	11		3,900	9,60000		-74,0		25000*AC-185		
10	1	100		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
11	100	4		0,817				2,7592	АТДЦТН-200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П-13-7-2
12	100	12		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
13	3	101		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
14	101	5		0,817				2,7592	АТДЦТН-200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П-13-7-2
15	101	13		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		

Рис. 8.1. Збалансований вихідний режим живлячої системи ES (режим в допустимій області)

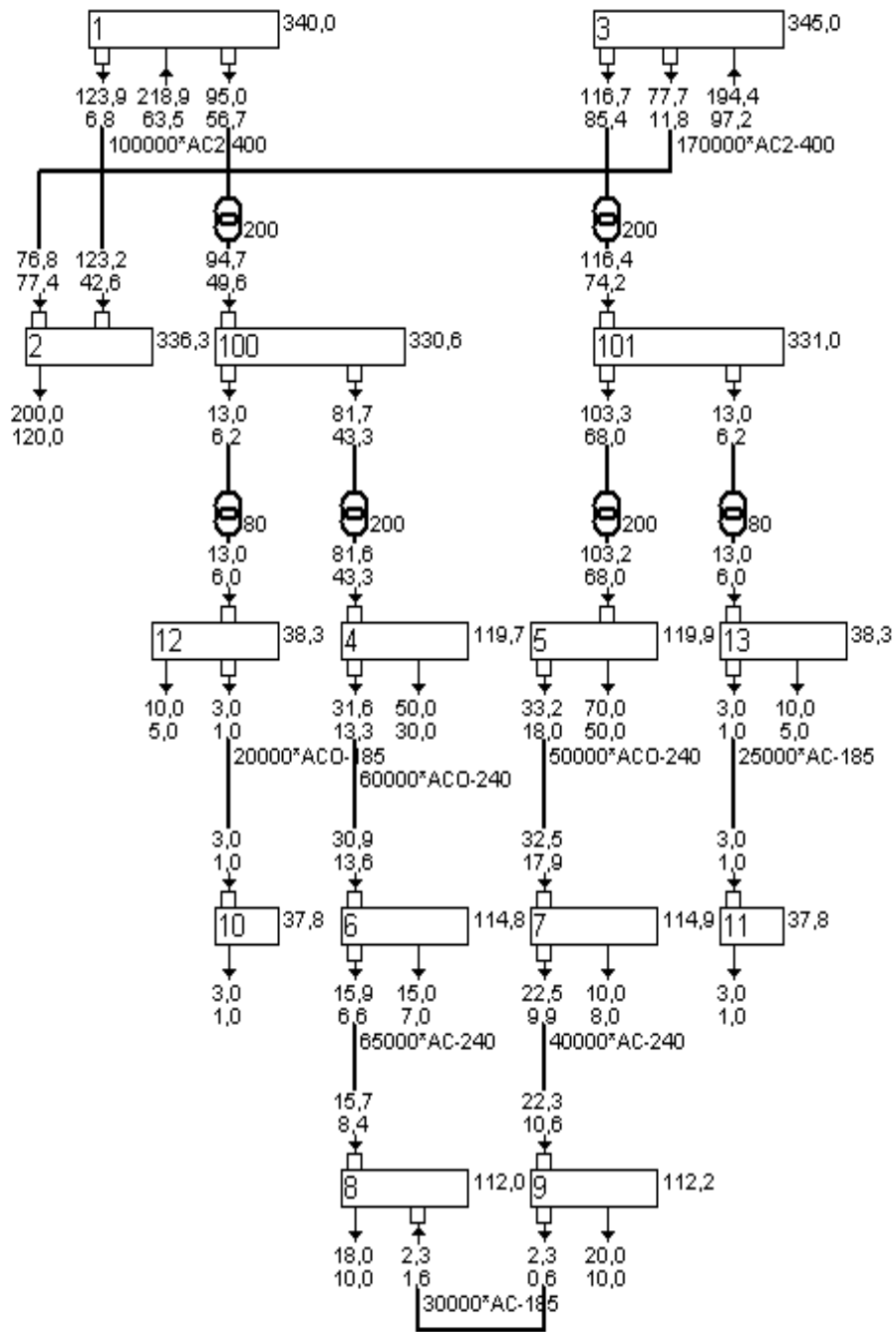


Рис. 8.2. Вихідний режим живлячої системи ЕС (графіка).

Як індивідуальне завдання обрана підстанція 110/35/10 кВ з номером варіанту $NB = 3/5/4$, що призводить до розрахункової схеми рис. 8.3. Тут обрана нумерація секції шин 110 кВ (200, 201), 35 кВ (202, 203), 10 кВ (204, 205), віддалений фідер 35 кВ (207), середні точки трансформаторів Т3, Т4 (300, 301). Прийнято, що на ПС два трансформатора ТДТГ-31000/121/38.5/11 з регулюванням РПН. Один з них - Т4 знаходиться в ремонті. Реально електропостачання ПС виконується по одній лінії 8 - 200. Задані зосереджені (сумарні) навантаження на секції 35 і 10 кВ. Слід очікувати, що в режимі ПС будемо мати занижені напруги і перевантажений трансформатор Т3. Необхідно в подальшому реалізувати введення режиму ПС в допустиму область експлуатаційними засобами, наявними на ПС (наприклад, РПН трансформатора Т3, включення ШСВ 110 кВ та ін.)

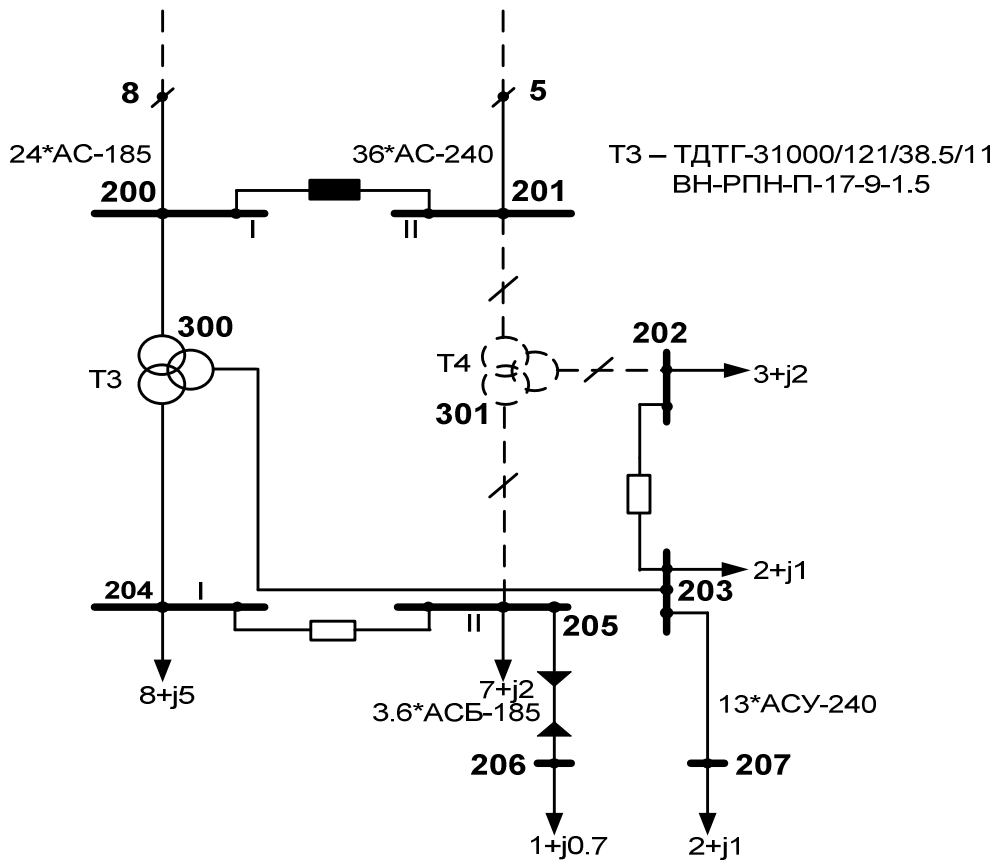


Рис. 8.3. Індивідуальна розрахункова схема ПС 110/35/10 кВ. Варіант пв = 3/5/4.

Розробка комплексної схеми ЕС+ПС реалізується копіюванням файлів живлячої енергосистеми (ЕС) у файли з ім'ям ES_PS і розширенням його кодуванням конфігурації, параметрів ліній і трансформаторів, заданими характеристиками режимними індивідуальної підстанції PS. Розширені файли вузлів та гілок комплексної схеми ES_PS, та результати розрахунку режиму комплексної схеми наведені на рис. 8.4, 8.5. Відзначимо, що трансформатор Т4 відключений (обмотки ВН-201/301, СН-301/202, НН-301/205 мають ознаку відключення «О»). Також відключений секційний вимикач на боці ВН-201/301. Аналіз режиму, виконаний за допомогою комплексу РАОТП, свідчить про неприпустимі рівні напруги і перевантаження трансформатора Т3. **Отриманий вихідний режим перебуває в неприпустимій області.**

Для введення режиму в допустиму область приймаємо такі рішення:

- включаємо секційний вимикач на високій стороні (200 - 201): в результаті повинна підвищитись неприпустимо низька напруга живлення (99.6 кВ);
- встановлюємо на трансформаторі Т3 8-ме регульовальне відгалуження з метою отримання нормальних напруг на секціях шин середньої (35 кВ) і низького (НН) напруги.

Для внесення коригувань у розрахункову комплексну схему скопіюємо файли ES_PS в **робочі файли** з ім'ям ES_PS_D (допустима область). Результати розрахунку режиму цієї схеми наведені на рис. 8.6, 8.7. **Режим в допустимій області.**

Для подальших розрахунків реалізуємо імпорт схеми ES_PS_D в деректорії LAB_APEZ2_N (моделювання режиму), LAB_OPTIM (оптимізація реактивних потужностей) і LAB_APEZ2_Z (розрахунок струмів к. з.).

Схема: ES_PS – Вузли схеми

№	N вузла	П	Rнав	Qнав	Pген	Qген	Uм	Uрасч	Вугол	Pрасч	Qрасч
1	1	b			233,0764	82,5760	340	340,000		-233,076400	-82,575950
2	2		200,000	120,000			330	336,285	-1,942	200,000000	120,000000
3	3	b			209,7422	115,7117	345	345,000		-209,742200	-115,711700
4	4		50,000	30,000			110	118,571	-3,227	50,000000	30,000000
5	5		70,000	50,000			110	118,763	-3,831	70,000000	50,000000
6	6		15,000	7,000			110	109,473	-7,048	15,000000	7,000000
7	7		10,000	8,000			110	110,261	-7,101	10,000000	8,000000
8	8		18,000	10,000			110	102,610	-10,079	18,000000	10,000000
9	9		20,000	10,000			110	104,740	-9,352	20,000000	10,000000
10	10		3,000	1,000			35	37,439	-4,958	3,000000	1,000000
11	11		3,000	1,000			35	37,424	-5,761	3,000000	1,000000
12	12		10,000	5,000			35	37,917	-4,138	10,000000	5,000000
13	13		10,000	5,000			35	37,986	-4,750	10,000000	5,000000
14	100						330	327,399	-3,253		
15	101						330	327,985	-3,867		
16	200						110	99,621	-11,046		
17	201						110	118,851	-3,844		
18	202		3,000	2,000			35	28,137	-20,358	3,000000	2,000000
19	203		2,000	1,000			35	28,137	-20,358	2,000000	1,000000
20	204		10,000	5,000			10	8,142	-18,809	10,000000	5,000000
21	205		7,000	5,000			10	8,142	-18,809	7,000000	5,000000
22	206		1,000	0,700			10	8,044	-18,693	1,000000	0,700000
23	207		2,000	1,000			35	27,836	-20,966	2,000000	1,000000
24	300						110	89,908	-18,940		
25	301										

Схема: ES_PS – Гілки схеми

№	N нач.	N кон.	K	R	X	G	B	Kг'	Марка	N от в'	Регулюван-ня
1	1	2		3,700	32,10000	2,3	-352,0		100000*AC2-400		
2	2	3		6,290	54,57000	3,9	-598,4		170000*AC2-400		
3	4	6		7,860	24,24000		-169,2		60000*ACO-240		
4	5	7		6,550	20,20000		-141,0		50000*ACO-240		
5	6	8		7,800	26,06500		-185,3		65000*AC-240		
6	7	9		6,240	16,36000		-112,8		40000*AC-240		
7	8	9		4,680	12,27000		-84,6		30000*AC-185		
8	12	10		3,400	7,86000		-58,2		20000*ACO-185		
9	13	11		3,900	9,60000		-74,0		25000*AC-185		
10	1	100		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
11	100	4		0,817				2,7592	АТДЦТН-200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П-13-7-2
12	100	12		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
13	3	101		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
14	101	5		0,817				2,7592	АТДЦТН-200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П-13-7-2
15	101	13		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН-200000/330/115/38,5		
16	8	200		3,744	9,81600		-67,7		24000*AC-185		
17	5	201		4,320	14,43600		-102,6		36000*AC-240		
18	205	206		0,601	0,27720		-540,6		36000*АСБ-185		
19	203	207		1,703	4,99200		-38,7		13000*АСУ-240		
20	200	300		1,719	49,96532	7,2	64,5	1,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11	9	ВН-РПН-П-17-9-1.5
21	300	203		1,719	29,04960			3,1429	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
22	300	204		1,719				11,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
23	201	301	О	1,719	49,96532	7,2	64,5	1,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11	9	ВН-РПН-П-17-9-1.5
24	301	202	О	1,719	29,04960			3,1429	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
25	301	205	О	1,719				11,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
26	200	201	О								
27	202	203									
28	204	205									

Рис. 8.4. Режим комплексної системи ES_PS (режим не в допустимій області).

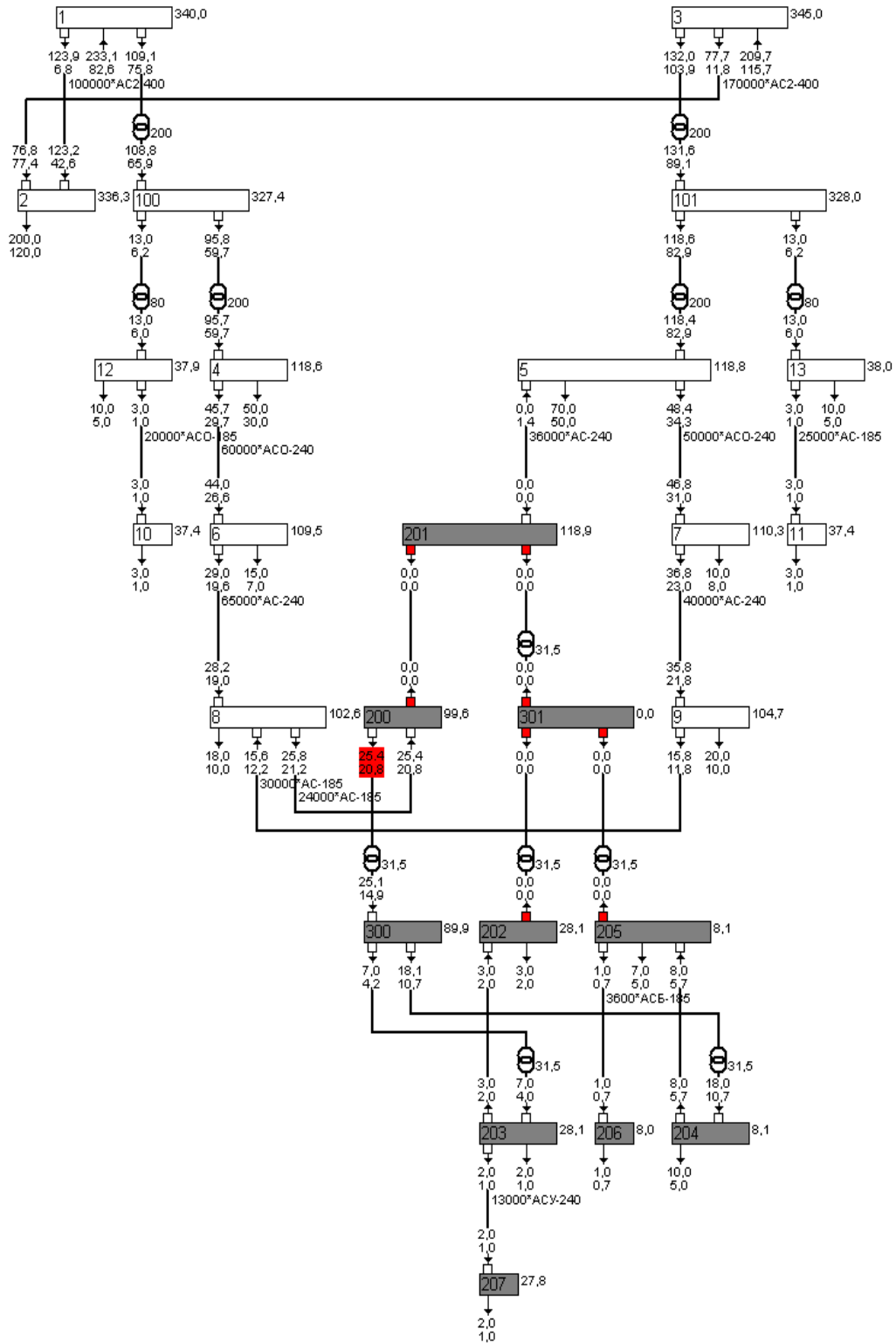


Рис. 8.5. Режим комплексної системи ES_PS. Є відключені вузли та гілки, перевантаження трансформатора ТЗ, низькі напруги, втрати у схемі 8.82 МВт (режим не в допустимій області).

Схема: ES_PS_D - Вузли схеми

№	N узла	П	Rнав	Qнав	Pген	Qген	Um	Uрасч	Вугол	Pрасч	Qрасч
1	1	b			215,9747	61,0127	340	340,000		-215,974700	-61,012680
2	2		200,000	120,000			330	336,285	-1,942	200,000000	120,000000
3	3	b			222,8223	122,6945	345	345,000		-222,822300	-122,694500
4	4		50,000	30,000			110	119,891	-2,698	50,000000	30,000000
5	5		70,000	50,000			110	118,368	-4,229	70,000000	50,000000
6	6		15,000	7,000			110	115,595	-5,168	15,000000	7,000000
7	7		10,000	8,000			110	114,602	-5,915	10,000000	8,000000
8	8		18,000	10,000			110	113,339	-6,455	18,000000	10,000000
9	9		20,000	10,000			110	112,857	-6,743	20,000000	10,000000
10	10		3,000	1,000			35	37,868	-4,384	3,000000	1,000000
11	11		3,000	1,000			35	37,298	-6,173	3,000000	1,000000
12	12		10,000	5,000			35	38,340	-3,582	10,000000	5,000000
13	13		10,000	5,000			35	37,862	-5,155	10,000000	5,000000
14	100						330	330,996	-2,716		
15	101						330	326,929	-4,267		
16	200						110	114,070	-6,044		
17	201						110	114,070	-6,044		
18	202		3,000	2,000			35	33,889	-12,851	3,000000	2,000000
19	203		2,000	1,000			35	33,889	-12,851	2,000000	1,000000
20	204		10,000	5,000			10	9,767	-11,778	10,000000	5,000000
21	205		7,000	5,000			10	9,767	-11,778	7,000000	5,000000
22	206		1,000	0,700			10	9,685	-11,700	1,000000	0,700000
23	207		2,000	1,000			35	33,642	-13,269	2,000000	1,000000
24	300						110	107,723	-11,869		
25	301										

Схема: ES_PS_D - Гілки схеми

№	Nп	Nк	K	R	X	G	B	Kт'	Марка	Nв	Регулювання
1	1	2		3,700	32,10000	2,3	-352,0		100000*AC2-400		
2	2	3		6,290	54,57000	3,9	-598,4		170000*AC2-400		
3	4	6		7,860	24,24000		-169,2		60000*ACO-240		
4	5	7		6,550	20,20000		-141,0		50000*ACO-240		
5	6	8		7,800	26,06500		-185,3		65000*AC-240		
6	7	9		6,240	16,36000		-112,8		40000*AC-240		
7	8	9		4,680	12,27000		-84,6		30000*AC-185		
8	12	10		3,400	7,86000		-58,2		20000*ACO-185		
9	13	11		3,900	9,60000		-74,0		25000*AC-185		
10	1	100		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
11	100	4		0,817				2,7592	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П- 13-7-2
12	100	12		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
13	3	101		0,817	58,53375	1,7	9,2	1,0000	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
14	101	5		0,817				2,7592	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5	9	СН-РПН-П- 13-7-2
15	101	13		0,817	126,59630			8,5714	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
16	8	200		3,744	9,81600		-67,7		24000*AC-185		
17	5	201		4,320	14,43600		-102,6		36000*AC-240		
18	205	206		0,601	0,27720		-540,6		36000*ACB-185		
19	203	207		1,703	4,99200		-38,7		13000*ACU-240		
20	200	300		1,719	49,96532	7,2	64,5	0,9850	ТДТГ-31500/121/38,5/11	8	ВН-РПН-П- 17-9-1.5
21	300	203		1,719	29,04960			3,1429	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
22	300	204		1,719				11,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
23	201	301	О	1,719	49,96532	7,2	64,5	1,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11	9	ВН-РПН-П- 17-9-1.5
24	301	202	О	1,719	29,04960			3,1429	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
25	301	205	О	1,719				11,0000	ТДТГ-31500/121/38,5/11		
26	200	201									
27	202	203									
28	204	205									

Рис. 8.6. Режим комплексної системи ES_PS_D (режим в допустимій області).

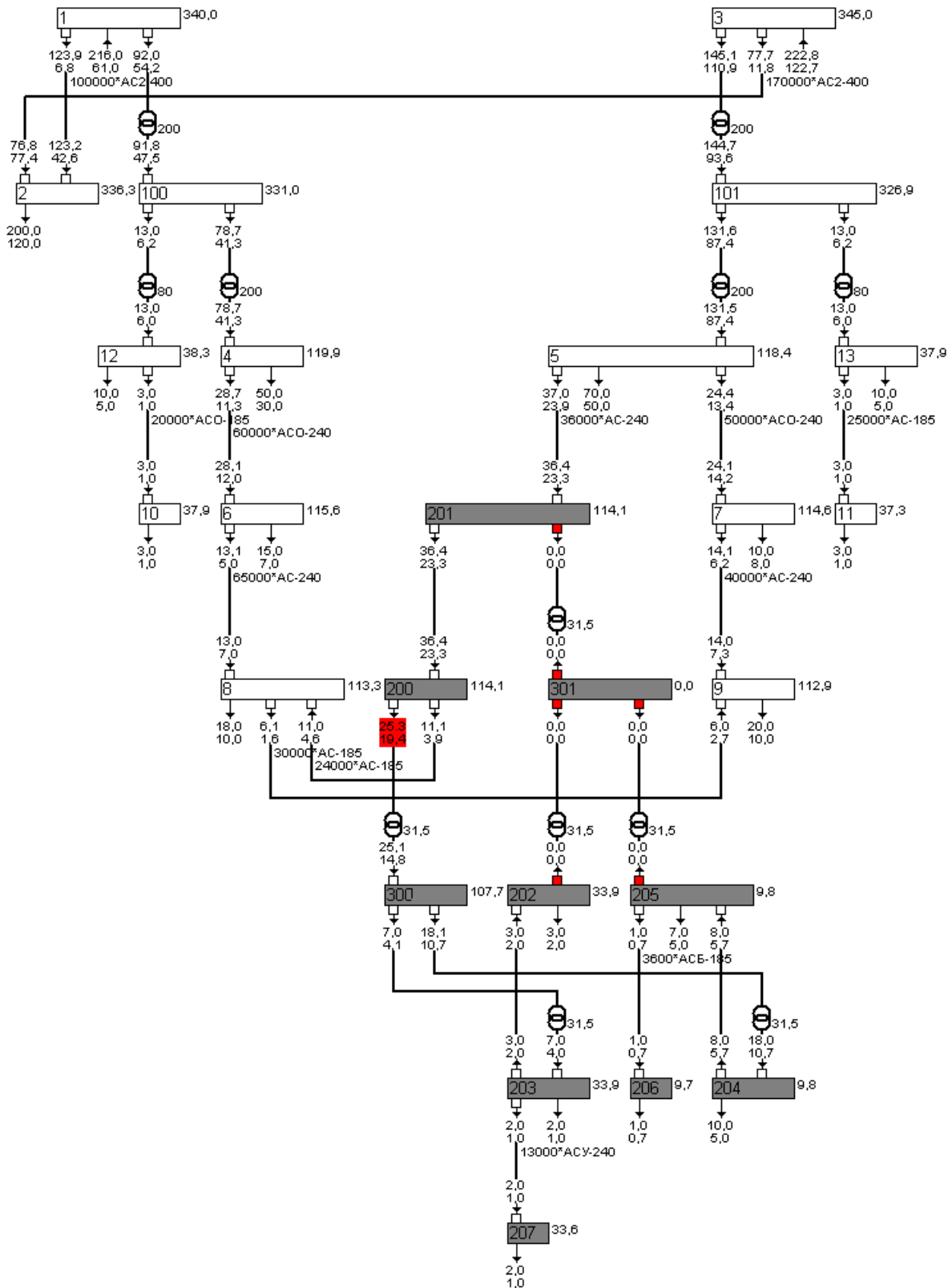


Рис. 8.7. Режим комплексної системи ES_PS_D. Втрати у схемі 4.80 МВт (режим в допустимій області і є вихідним для оптимізації).

8.2. Інструкції і приклад розрахунку режиму методом Ньютона

Розрахунок режиму методом Ньютона реалізується на основі пакету лабораторних робіт LB_APEZ_N за номером роботи № 7. У реалізації алгоритму слід виділити наступні циклічно повторювані векторні операції:

- **розрахунок** блокового вектора нев'язок (F_1 , F_2) для поточного рівняння стану електричної мережі;
- **розрахунок** блокових векторів моделі матриці Якобі:
D11, D12, D21, D22 - діагональні елементи;
V11, V12, V21, V22 - елементи верхньої трикутної матриці;
H11, H12, H21, H22 - елементи нижньої трикутної матриці;
- **розв'язання** лінеаризованої системи рівнянь Ньютона;
- **розрахунок** нових значень величин, що ітеруються (UM, Teta).

У бакалаврському проекті реалізуються зазначені розрахунки вручну тільки для однієї ітерації і лише для одного вузла та гілки розрахункової схеми. Взаємодія між програмою N_REGIM_S і користувачем здійснюється через обмінні файли:

AP_AKEY.PAS - ключовий файл, який визначає програмі розрахунку режиму умови зв'язку з користувачем. Використовуються п'ять керуючих параметрів:

KEY - ключ вибору технологічного варіанту взаємодії;

ii, i, j - визначення номеру вузла та гілки розрахункової схеми;

Niter - визначення номера розрахункової ітерації;

par - пароль індивідуального варіанту.

Параметри *ii, i, j, Niter, par* виділяють індивідуальну розрахункову область. Якщо *KEY = 1*, видаються проміжні розрахункові дані про хід ітераційного процесу і кінцеві результати. Завдання для ручного розрахунку друкується в файл ... REZ і містить тільки матеріали трьох послідовних ітерацій:

попередня (*Niter - 1*) - дає вихідну інформацію для планованого ручного розрахунку;

задана (*Niter*) - локалізує обсяг ручних обчислень. Параметри, які повинні бути розраховані, замасковані кодом 9999.9999;

подальша (*Niter + 1*) - дає інформацію про результати використання ручного розрахунку.

Дані ітерації видаються в табличній формі. Матеріал заданої ітерації виділяється сигнальними символами@@@@. Якщо *KEY = 0*, друкується тільки кінцевий результат. При помилковому завданні параметрів ключового файлу (неіснуючі номер ітерації, номер вузла, визначення лінії, неправильний пароль тощо) у файлі результатів видається повідомлення ***** ERROR *****.

AP_APEZ.REZ: результуючий файл, де користувач надає програмі розрахунку режиму результати власних ручних розрахунків величин D11, D12, D21, D22, V11, V12, V21, V22, H11, H12, H21, H22, F1, F2, UM, Teta.

Для обчислень необхідно вибирати дані з різних джерел:

- навантаження P, Q з індивідуальної комплексної розрахункової схеми;
- провідності $G_{ii}, B_{ii}, G_{ij}, B_{ij}$ з матриці Y за результатами лаб. № 3 використovanого пакету;
- при розрахунку нових напруг поправки $dU, dTeta$ слід вибирати з даних попередньої ітерації (у файлі ... REZ є спеціальна таблиця по напругам).

Як розрахунковий приклад розглянемо технологію розрахунків по комплексній схемі, режим якої збалансований і знаходиться в допустимій області. Ця комплексна схема представлена на рис. 3.1. (Системна частина, розділ 3) і рис. 8.3. (Схема індивідуальної ПС, розділ 8.1). Інформаційні файли мають найменування ES_PS_D.PNT (вузли) і ES_PS_D.LIN (гілки). Кінцеві результати розрахунку режиму вже відомі при введенні режиму в допустиму область за допомогою комплексу PAB ТП (розділ 8.1).

Ці ж результати отримуються автоматично при розрахунку режиму методом Ньютона, які наведені на рис. 8.8. за умови $KEY = 0$. Процес зійшовся за 7 ітерацій. Сумарні втрати дорівнюють 4.81 МВт.

***** LAB7 (N_REGIM_S) File= es_ps_d *****

!!!! ITER: 0 1000.00000
 !!!! ITER: 1 41695.29704
 !!!! ITER: 2 3320.44452
 !!!! ITER: 3 1528.16147
 !!!! ITER: 4 209.47541
 !!!! ITER: 5 8.50187
 !!!! ITER: 6 0.01897
 !!!! ITER: 7 0.00000
 !!!! REZULT

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	-215.975	-61.013	0.324	-19.284	-215.975	-61.012	1
2	2	336.285	-1.942	336.092	-11.394	200.000	120.000	0.351	-53.739	0.000	0.000	0
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000	-222.822	-122.694	0.429	-34.519	-222.822	-122.692	1
4	4	119.899	-2.698	119.766	-5.644	50.000	30.000	0.000	-1.216	0.000	0.000	0
5	5	118.376	-4.228	118.054	-8.728	70.000	50.000	0.000	-1.707	0.000	0.000	0
6	6	115.604	-5.167	115.134	-10.412	15.000	7.000	0.000	-2.368	0.000	0.000	0
7	7	114.611	-5.915	114.000	-11.811	10.000	8.000	0.000	-1.667	0.000	0.000	0
8	8	113.348	-6.454	112.629	-12.742	18.000	10.000	0.000	-2.168	0.000	0.000	0
9	9	112.866	-6.743	112.085	-13.251	20.000	10.000	0.000	-1.257	0.000	0.000	0
10	10	37.870	-4.384	37.759	-2.895	3.000	1.000	0.000	-0.042	0.000	0.000	0
11	11	37.300	-6.173	37.084	-4.011	3.000	1.000	0.000	-0.051	0.000	0.000	0
12	12	38.342	-3.582	38.267	-2.395	10.000	5.000	0.000	-0.043	0.000	0.000	0
13	13	37.864	-5.155	37.711	-3.402	10.000	5.000	0.000	-0.053	0.000	0.000	0
14	100	330.996	-2.716	330.625	-15.684	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
15	101	326.929	-4.267	326.023	-24.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
16	200	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.093	0.400	0.000	0.000	0
17	201	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.000	-0.668	0.000	0.000	0
18	202	33.891	-12.850	33.042	-7.537	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	203	33.891	-12.850	33.042	-7.537	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
20	204	9.768	-11.777	9.562	-1.994	10.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
21	205	9.768	-11.777	9.562	-1.994	7.000	5.000	0.000	-0.026	0.000	0.000	0
22	206	9.686	-11.699	9.485	-1.964	1.000	0.700	0.000	-0.025	0.000	0.000	0
23	207	33.644	-13.268	32.746	-7.721	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
24	300	107.733	-11.867	105.430	-22.155	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
SUMMA :						434.000	261.700	1.198	-118.479	-438.797	-183.704	
BALANS:										3.599	40.483	

Рис. 8.8. Результати розрахунку режиму методом Ньютона комплексної схеми ES_PS_D.
 Втрати дорівнюють $3.599 + 1.198 = 4.797$ МВт

Виберемо для розрахункової задачі бакалаврської роботи наступні умови: Niter = 3, вузол 8 живлячої системи і гілку 8-9. Структура зв'язків цього вузла згідно комплексній схемі показана на рис. 8.9. Також необхідно використовувати результати розрахунку лабораторної роботи № 3 пакета LB_APEZ2_N, а саме власні і взаємні провідності, показані на рис. 8.10.

Для виконання проміжних розрахунків режиму згідно завдання умов визначений ключовий файл:

KEY	i	j	Niter	par
1	8	9	3	114

Початковий запуск програми N_REGIM_S з нульовим значенням файлу AP_AREZ.REZ (результати ручних розрахунків), створює умови для ручних розрахунків у файлі ES_PS_D.REZ, показаних на рис. 8.11.

Для розрахунку фрагмента матриці Якобі, нового значення напруг і нев'язок стану мережі на третій ітерації будуть потрібні наступні вихідні дані:

- Рядок матриці Y для вузла, в якому визначається діагональний елемент матриці.

Згідно зі схемою вузол 8 має зв'язок з вузлами 6, 9 і 200.

$$\dot{Y}_{8-6} = 0.01054 - j0.03521$$

$$\dot{Y}_{8-9} = 0.02714 - j0.07115$$

$$\dot{Y}_{8-200} = 0.03392 - j0.08894$$

$$\dot{Y}_{8-8} = -0.0716 + j0.19513$$

- Значення потужностей навантаження $P + jQ$ для заданого вузла 8:

$$\dot{S}_8 = P_8 + jQ_8 = 18 + j10$$

- Для розрахунку напруги вузла 8 на ітерації 3 необхідні його напруги на попередній ітерації, розраховані поправки до нього:

$$U_8^{(t-1)} = 133.924 - j29.09 \quad dU = 0.1404 \quad d\theta = 5.4557$$

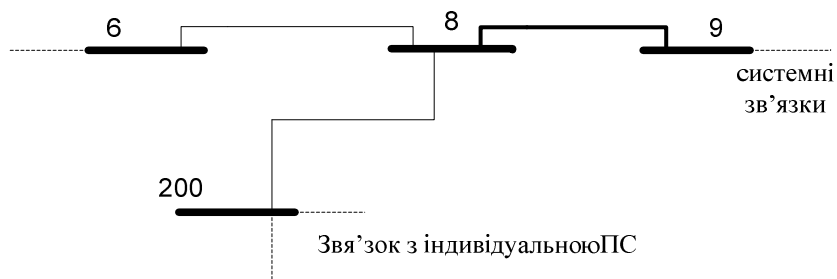


Рис. 8.9. Зв'язки розрахункового вузла

***** Результаты расчетов LAB3 (MATY) File= es_ps_d *****

Nnn	Name	NO	GS	BS
1	1	12	-0.00378	0.04766
2	2	13	-0.00563	0.04835
3	3	14	-0.00233	0.03488
4	4	15	-9.32922	0.03724
5	5	21	-9.35066	0.10825
6	6	16	-0.02264	0.07236
7	7	17	-0.03488	0.09803
8	8	22	-0.07160	0.19513
9	9	18	-0.04749	0.12441
10	10	1	-0.04636	0.10714
11	11	2	-0.03632	0.08937
12	12	3	-0.05010	0.68741
13	13	4	-0.04007	0.66964
14	100	19	-1.22428	0.02498
15	101	20	-1.22428	0.02498
16	200	23	-5000.03462	5000.10896
17	201	24	-5000.01903	5000.06353
18	202	5	-5000.00000	5000.00000
19	203	10	-5000.08127	5000.51828
20	204	8	-5070.38976	5000.00000
21	205	7	-5001.37237	5000.63225
22	206	6	-1.37237	0.63225
23	207	9	-0.06121	0.17942
24	300	11	-0.58443	0.05370

***** ҒІЅГ«МВ вл а бзГв LAB3 (MATY) File= es_ps_d *****

Nnn	NameN	NameK	Ya1	Yr1	Ya2	Yr2
1	1	2	0.00354	-0.03074	0.00354	-0.03074
2	2	3	0.00208	-0.01808	0.00208	-0.01808
3	4	6	0.01210	-0.03733	0.01210	-0.03733
4	7	5	0.01453	-0.04480	0.01453	-0.04480
5	6	8	0.01054	-0.03521	0.01054	-0.03521
6	7	9	0.02035	-0.05336	0.02035	-0.05336
7	9	8	0.02714	-0.07115	0.02714	-0.07115
8	10	12	0.04636	-0.10717	0.04636	-0.10717
9	11	13	0.03632	-0.08941	0.03632	-0.08941
10	1	100	0.00024	-0.01708	0.00024	-0.01708
11	4	100	3.37699	-0.00000	3.37699	0.00000
12	12	100	0.00044	-0.06770	0.00044	-0.06770
13	3	101	0.00024	-0.01708	0.00024	-0.01708
14	101	5	3.37699	0.00000	3.37699	-0.00000
15	13	101	0.00044	-0.06770	0.00044	-0.06770
16	8	200	0.03392	-0.08894	0.03392	-0.08894
17	5	201	0.01903	-0.06358	0.01903	-0.06358
18	206	205	1.37237	-0.63252	1.37237	-0.63252
19	207	203	0.06121	-0.17944	0.06121	-0.17944
20	300	200	0.00068	-0.01969	0.00068	-0.01969
21	203	300	0.00638	-0.10782	0.00638	-0.10782
22	204	300	6.39907	-0.00000	6.39907	0.00000
23	200	201	5000.00000	-5000.00000	5000.00000	-5000.00000
24	202	203	5000.00000	-5000.00000	5000.00000	-5000.00000
25	205	204	5000.00000	-5000.00000	5000.00000	-5000.00000

Рис. 8.10. Результаты розрахунку матриці провідностей схеми ES_PS_D

***** Результати розрахунків LAB7 (N_REGIM_S) File= es_ps_d *****

!!!! ITER: 0 1000.00000
 !!!!! ITER: 1 41695.29704
 !!!!! ITER: 2 3320.44452

(MATJ) (MATJ) (MATJ)

Name	NO	D11	D12	D21	D22
8	22	1329.2185	-3674.8832	3654.8481	1360.2103

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
9	8	-510.8561	1330.6214	-1330.6214	-510.8561	-505.0367	1332.8410	-1332.8410	-505.0367

Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta
8	137.047	-12.255	133.924	-29.090	2.504	-0.018	0.1404	5.4557

!!!! ITER: 3 1528.16147

@@@@ ITER: 3 1528.16147

(MATJ) (MATJ) (MATJ)

Name	NO	D11	D12	D21	D22
8	22	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
9	8	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999	9999.9999

Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta
8	999.999	999.999	116.972	-13.947	999.999	999.999	0.0362	0.3568

Name	Usa	Usr
6	119.4441	-11.9475
9	116.4274	-14.3801
200	117.6926	-13.2957

!!!! ITER: 4 209.47541

Рис. 8.11. Файл ES_PS_D.REZ з проміжними результатами розрахунку режиму (ітерації 1, 2, 3,4).
 Величини, які треба обчислити, замасковані кодом 9999.9999

		(MATJ)	(MATJ)	(MATJ)								
Name	NO	D11	D12	D21	D22							
8	22	905.0382	-2525.2690	2505.2600	940.7661							
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22			
9	8	-352.8533	911.4855	-911.4855	-352.8533	-343.7807	914.9460	-914.9460	-343.7807			
Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta				
8	113.535	-6.443	112.818	-12.740	0.136	-0.004	0.0016	-0.0117				
!!!!	ITER:	5	8.50187									
!!!!	ITER:	6	0.01897									
!!!!	ITER:	7	0.00000									
!!!!	REZULT											
Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	-215.975	-61.013	0.324	-19.284	-215.975	-61.012	1
2	2	336.285	-1.942	336.092	-11.394	200.000	120.000	0.351	-53.739	0.000	0.000	0
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000	-222.822	-122.694	0.429	-34.519	-222.822	-122.692	1
4	4	119.899	-2.698	119.766	-5.644	50.000	30.000	0.000	-1.216	0.000	0.000	0
5	5	118.376	-4.228	118.054	-8.728	70.000	50.000	0.000	-1.707	0.000	0.000	0
6	6	115.604	-5.167	115.134	-10.412	15.000	7.000	0.000	-2.368	0.000	0.000	0
7	7	114.611	-5.915	114.000	-11.811	10.000	8.000	0.000	-1.667	0.000	0.000	0
8	8	113.348	-6.454	112.629	-12.742	18.000	10.000	0.000	-2.168	0.000	0.000	0
9	9	112.866	-6.743	112.085	-13.251	20.000	10.000	0.000	-1.257	0.000	0.000	0
10	10	37.870	-4.384	37.759	-2.895	3.000	1.000	0.000	-0.042	0.000	0.000	0
11	11	37.300	-6.173	37.084	-4.011	3.000	1.000	0.000	-0.051	0.000	0.000	0
12	12	38.342	-3.582	38.267	-2.395	10.000	5.000	0.000	-0.043	0.000	0.000	0
13	13	37.864	-5.155	37.711	-3.402	10.000	5.000	0.000	-0.053	0.000	0.000	0
14	100	330.996	-2.716	330.625	-15.684	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
15	101	326.929	-4.267	326.023	-24.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
16	200	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.093	0.400	0.000	0.000	0
17	201	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.000	-0.668	0.000	0.000	0
18	202	33.891	-12.850	33.042	-7.537	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	203	33.891	-12.850	33.042	-7.537	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
20	204	9.768	-11.777	9.562	-1.994	10.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
21	205	9.768	-11.777	9.562	-1.994	7.000	5.000	0.000	-0.026	0.000	0.000	0
22	206	9.686	-11.699	9.485	-1.964	1.000	0.700	0.000	-0.025	0.000	0.000	0
23	207	33.644	-13.268	32.746	-7.721	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
24	300	107.733	-11.867	105.430	-22.155	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
SUMMA :						434.000	261.700	1.198	-118.479	-438.797	-183.704	
BALANS :									3.599	40.483		

Рис. 8.11. (Продовження). Файл ES_PS_D.REZ з проміжними результатами розрахунку режиму (ітерації 1, 2, 3,4).
Величини, які треба обчислити, замасковані кодом 9999.9999

- Для розрахунку нових значень елементів матриці Якобі необхідні напруги всіх, пов'язаних з ним вузлів. Відзначимо, що напругу заданого вузла необхідно обчислити.

$$U_6^{(t)} = 119.444 - j11.948$$

$$U_9^{(t)} = 116.428 - j14.380$$

$$U_{200}^{(t)} = 117.693 - j13.296$$

Виконаємо розрахунок напруги заданого вузла 8

$$U_8^{(t)} = U_8^{(t-1)} - U_8^{(t-1)} \cdot dU_8^{(t-1)} = 137.047 - 137.047 \cdot 0.1404 = 117.8056$$

$$\theta_8^{(t)} = \theta_8^{(t-1)} + d\theta_8^{(t-1)} = -12.255 + 5.4557 = -6.7993$$

$$\dot{U}_8 = 116.977 - j13.9472$$

Виконаємо розрахунок величин P_{ij}, Q_{ij} для всього ярусу заданого вузла.

$$p_{ij} + jq_{ij} = \tilde{U}_i \cdot \dot{U}_j \cdot \dot{Y}_{ij}$$

$$p_{8-6} + jq_{8-6} = (116.977 + j13.9472) \cdot (119.444 - j11.948) \cdot (0.01054 - j0.03521) = 158.4858 - j495.087$$

$$p_{6-8} + jq_{6-8} = (116.977 - j13.9472) \cdot (119.444 + j11.948) \cdot (0.01054 - j0.03521) = 139.577 - j500.656$$

$$p_{8-9} + jq_{8-9} = (116.977 + j13.9472) \cdot (116.428 - j14.38) \cdot (0.02714 - j0.07115) = 370.9267 - j984.8719$$

$$p_{9-8} + jq_{9-8} = (116.977 - j13.9472) \cdot (116.428 + j14.38) \cdot (0.02714 - j0.07115) = 379.22 - j981.708$$

$$p_{8-200} + jq_{8-200} = (116.977 + j13.9472) \cdot (117.693 - j13.296) \cdot (0.03392 - j0.08894) = 480.9427 - j1238.0408$$

$$p_{200-8} + jq_{200-8} = (116.977 - j13.9472) \cdot (117.693 + j13.296) \cdot (0.03392 - j0.08894) = 465.6163 - j1243.886$$

Виконаємо розрахунок сум $\sum p_{ij}, \sum q_{ij}$

$$\sum p_{3j} = p_{8-6} + p_{8-9} + p_{8-200} = 158.4858 + 370.9267 + 480.9427 = 1010.3552$$

$$\sum q_{3j} = q_{8-6} + q_{8-9} + q_{8-200} = -495.087 - 984.8719 - 1238.0408 = -2717.9997$$

Виконаємо розрахунок компонент. $-G_{ii} U_i^2, B_{ii} U_i^2$

$$-G_{88} \cdot U_8^2 = 0.0716 \cdot 117.8056^2 = 993.676$$

$$B_{88} \cdot U_8^2 = 0.19513 \cdot 117.8056^2 = 2708.045$$

Виконаємо розрахунок правої частини системи рівнянь:

$$F_2 = P_8 - G_{88} \cdot \dot{U}_8^{(t)^2} - \sum p_{ij} = 18 + 0.0716 \cdot 117.8056^2 - 1010.3552 = 1.321$$

$$F_2^* = Q_8 + B_{88} \cdot \dot{U}_8^{(t)^2} + \sum q_{ij} = 10 + 0.19513 \cdot 117.8056^2 - 2717.9997 = 0.0453$$

Сформуємо на основі виконаних розрахунків для вузла 8 його блочний діагональний елемент і блокові елементи верхньої і нижньої трикутної матриць, відповідно до заданої гілки (8 – 9).

$$D_8 = \begin{bmatrix} D_{11} = -2 \cdot G_s \cdot U^2 - \sum p_{ij} & D_{12} = \sum q_{ij} \\ D_{21} = 2 \cdot B_s \cdot U^2 + \sum q_{ij} & D_{22} = \sum p_{ij} \end{bmatrix}$$

$$V, H = \begin{bmatrix} -p & -q \\ q & -p \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = 2 \cdot 0.0716 \cdot 117.8056^2 - 1010.3552 = 976.997$$

$$D_{12} = -2718.000$$

$$D_{21} = 2 \cdot 0.19513 \cdot 117.8056^2 - 2718.000 = 2698.000$$

$$D_{22} = 1010.355$$

$$V_{11} = -370.927$$

$$H_{11} = -379.220$$

$$V_{12} = 984.872$$

$$H_{12} = 981.708$$

$$V_{21} = -984.872$$

$$H_{21} = -981.708$$

$$V_{22} = -370.927$$

$$H_{22} = -379.220$$

Скорегуємо значення результуючого файлу AP_AREZ.REZ згідно виконаним обчислень. Запуск програми N_REGIM_S в даних умовах підтверджує правильність обчислень по даному розділу бакалаврського проекту. Результати спільних рішень наведені на рис. 8.12.

***** Результати розрахунків LAB7 (N_REGIM_S) File= es_ps_d *****

!!!! ITER: 0 1000.00000
 !!!!! ITER: 1 41695.29704
 !!!!! ITER: 2 3320.44452

	(MATJ)	(MATJ)	(MATJ)
Name	NO	D11	D12
8	22	1329.2185	-3674.8832
		D21	D22
		3654.8481	1360.2103

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
9	8	-510.8561	1330.6214	-1330.6214	-510.8561	-505.0367	1332.8410	-1332.8410	-505.0367

Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta
8	137.047	-12.255	133.924	-29.090	2.504	-0.018	0.1404	5.4557

!!!! ITER: 3 1528.16147
 @@@@ ITER: 3 1528.16147

	(MATJ)	(MATJ)	(MATJ)
Name	NO	D11	D12
8	22	976.8349	-2717.7520
		D21	D22
		2697.8429	1010.2579

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
9	8	-370.8759	984.8105	-984.8105	-370.8759	-379.1670	981.6481	-981.6481	-379.1670

Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta
8	117.801	-6.799	116.972	-13.947	1.288	0.045	0.0362	0.3568

Name	Usa	Usr
6	119.4441	-11.9475
9	116.4274	-14.3801
200	117.6926	-13.2957

!!!! ITER: 4 209.47541

Рис. 8.12. Файл ES_PS_D.REZ зі спільними результатами розрахунку режиму

(MATJ)	(MATJ)	(MATJ)										
Name	NO	D11	D12	D21	D22							
8	22	905.0382	-2525.2690	2505.2600	940.7661							
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22			
9	8	-352.8533	911.4855	-911.4855	-352.8533	-343.7807	914.9460	-914.9460	-343.7807			
Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta				
8	113.535	-6.443	112.818	-12.740	0.136	-0.004	0.0016	-0.0117				

!!!! ITER: 5 8.50187
!!!! ITER: 6 0.01897
!!!! ITER: 7 0.00000
!!!! REZULT

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	-215.975	-61.013	0.324	-19.284	-215.975	-61.012	1
2	2	336.285	-1.942	336.092	-11.394	200.000	120.000	0.351	-53.739	0.000	0.000	0
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000	-222.822	-122.694	0.429	-34.519	-222.822	-122.692	1
4	4	119.899	-2.698	119.766	-5.644	50.000	30.000	0.000	-1.216	0.000	0.000	0
5	5	118.376	-4.228	118.054	-8.728	70.000	50.000	0.000	-1.707	0.000	0.000	0
6	6	115.604	-5.167	115.134	-10.412	15.000	7.000	0.000	-2.368	0.000	0.000	0
7	7	114.611	-5.915	114.000	-11.811	10.000	8.000	0.000	-1.667	0.000	0.000	0
8	8	113.348	-6.454	112.629	-12.742	18.000	10.000	0.000	-2.168	0.000	0.000	0
9	9	112.866	-6.743	112.085	-13.251	20.000	10.000	0.000	-1.257	0.000	0.000	0
10	10	37.870	-4.384	37.759	-2.895	3.000	1.000	0.000	-0.042	0.000	0.000	0
11	11	37.300	-6.173	37.084	-4.011	3.000	1.000	0.000	-0.051	0.000	0.000	0
12	12	38.342	-3.582	38.267	-2.395	10.000	5.000	0.000	-0.043	0.000	0.000	0
13	13	37.864	-5.155	37.711	-3.402	10.000	5.000	0.000	-0.053	0.000	0.000	0
14	100	330.996	-2.716	330.625	-15.684	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
15	101	326.929	-4.267	326.023	-24.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
16	200	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.093	0.400	0.000	0.000	0
17	201	114.079	-6.044	113.445	-12.011	0.000	0.000	0.000	-0.668	0.000	0.000	0
18	202	33.891	-12.850	33.042	-7.537	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	203	33.891	-12.850	33.042	-7.537	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
20	204	9.768	-11.777	9.562	-1.994	10.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
21	205	9.768	-11.777	9.562	-1.994	7.000	5.000	0.000	-0.026	0.000	0.000	0
22	206	9.686	-11.699	9.485	-1.964	1.000	0.700	0.000	-0.025	0.000	0.000	0
23	207	33.644	-13.268	32.746	-7.721	2.000	1.000	0.000	-0.022	0.000	0.000	0
24	300	107.733	-11.867	105.430	-22.155	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0

SUMMA : 434.000 261.700 1.198 -118.479 -438.797 -183.704
BALANS: 3.599 40.483

Рис. 8.12. (Продовження). Файл ES_PS_D.REZ зі спільними результатами розрахунку режиму.

8.3. Інструкція і приклад оптимізації режиму по реактивній потужності

Оптимізація режиму по реактивній потужності реалізується на основі пакету лабораторних робіт LB_ОПТИМ за номером робіт N5. При запуску цієї роботи реалізується вибір оптимальних значень реактивної потужності в заданих вузлах електричної мережі.

Можливі наступні алгоритмічні варіанти:

- Оптимізація режиму **без урахування обмежень**;
- Оптимізація режиму з **урахуванням обмежень $Q_{min} - Q_{max}$** ;
- Оптимізація режиму з **урахуванням обмежень $U_{min} - U_{max}$** ;

Управління варіантами здійснюється через ключовий файл AP_AKEY.PAS, який містить наступні дані:

KEYf - ключ фіксації модулів напруги при розрахунку усталеного режиму.

У бакалаврської роботи **KEYf = 0**;

KEY0 - ключ варіантів оптимізації. **Якщо ключ KEY0 = 0**, то виконується **автоматична оптимізація** режиму з виведенням тільки кінцевих результатів без документації самого процесу спуску по антиградієнту. **Якщо KEY0 = 2**, то включається режим інтелектуальної технології оптимізації, який здійснює діалог з користувачем згідно методичного алгоритму (розділ 5);

EPS - задана точність оптимізації, за якою здійснюється контроль збіжності процесу. За замовчуванням EPS = 0.0001;

Kd - коефіцієнт, що регулює збільшення dQt при розрахунку часткових похідних методом чисельного диференціювання. За замовчуванням Kd = 0.001.

Таким чином, для реалізації завдання бакалаврської роботи маємо значення KEYf = 0, KEY0 = 2, EPS = 0.0001, Kd = 0.001.

Вихідними інформаційними файлами для оптимізації режиму є раніше розглянуті файли з розширенням. PNT, LIN, REZ (в даному пакеті вихідний режим незначно відрізняється за рахунок меншої точності параметрів схеми).

Конкретно для бакалаврського проекту маємо:

ES_PS_D.PNT - файл вузлів комплексної схеми, яка містить стандартну живлячу систему та індивідуальну схему підстанції, режим якої введено в допустиму область;

ES_PS_D.LIN - файл гілок цієї схеми;

ES_PS_D. REZ - файл отриманих результатів розрахунків режиму, який при оптимізації обов'язково містить режимні характеристики оптимального режиму і інтегральні характеристики вихідного режиму.

Технологічні умови оптимізації повинні бути визначені у файлах:

ES_PS_D. Vqs - файл номерів вузлів (NUZ), де регулюються реактивні потужності і можливі межі регулювання (Q_{min} , Q_{max}). Якщо потрібен режим без урахування цих обмежень, повинні бути задані досить

широкі межі;

ES_PS_D.vus - файл вузлів (NUZ), де забезпечуються обмеження по напругам і допустимі межі (U_{\min} , U_{\max}). Якщо потрібен режим без урахування цих обмежень, повинен бути записаний знак «-» в макеті таблиці (повне відключення обмежень), або перед номером вузла (конкретне відключення).

При наборі в діалозі нових значень реактивних потужностей можливі наступні операції управління:

«Помилка при наборі» - ESC, повторити набір;

«Повторити попереднє значення Q» - набрати число 888, Enter;

«Вийти з процесу» - набрати число 999, Enter.

Відзначимо, що в таблиці, що викликається процедурою оптимізації, величини dDPt, dDP1, dDP2 (дробові частини втрат) різні вузли можуть бути представлені в різному масштабі. **Автоматично розрахований масштаб виводиться у колонці MM.** Його необхідно враховувати при розрахунку коефіцієнтів ω_i і контролю збіжності.

У розрахунковій схемі ES_PS_D рис. 8.6. (Розділ 8.1) виберемо два вузли, де регулюються реактивні потужності:

204 - для компенсації навантажувальних реактивних потужностей у вузлах 204(5 МВар), 205 (5 МВар), 206 (0,7 МВар), а також для покриття втрат холостого ходу живлячого трансформатора. Визначимо обмеження:

$$Q_{\min}, Q_{\max} = -20 \div 20 \text{ МВар};$$

$$U_{\min}, U_{\max} = 9.5 \dots 11 \text{ кВ.}$$

9 - для компенсації реактивних навантажень в районі цього вузла (10 Мвар), а також для підтримки напруги на шинах підстанції. Визначимо обмеження:

$$Q_{\min}, Q_{\max} = -30 \div 30 \text{ МВар};$$

$$U_{\min}, U_{\max} = 110 \div 120 \text{ кВ.}$$

Завантажимо дані у файли умов _ .vqs, _ .vus і задамо ключовий файл AP_AKEY.PAS. Оскільки ручну оптимізацію будемо виконувати без урахування обмежень у файлі _ .vus поставимо макетний «-». Процес оптимізації буде наступним:

КРОК 1:

Name	Qs	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
204	5.00	0.01	4.8071444	0.1444036	0.5231766	0.9021637	1000
9	10.00	0.11	___//___	0.0714440	0.1025231	0.1337392	10

Відзначимо, що для вузлів 204 і 9 різні масштаби дробних частин, тобто точне значення втрат, наприклад DPT обчислюється:

$$\text{Вузол 204: } DPT = 4.807 + 0.0001444036 = 4.8071444036;$$

$$\text{Вузол 9: } DPT = 4.8 + 0.00714440 = 4.80714440.$$

Це необхідно буде враховувати при обчисленні (GR1 - GR2).

Розрахунок похідних:

$$\begin{aligned} \text{Вузол 204: } GR1 &= (0.1444036 - 0.5231766)/0.01 = -37.8773; \\ GR2 &= (0.5231766 - 0.9021637)/0.01 = -37.8987. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Вузол 9: } GR1 &= (0.0714440 - 0.1025231)/0.11 = -0.2825; \\ GR2 &= (0.1025231 - 0.1337392)/0.11 = -0.2838. \end{aligned}$$

Розрахунок оптимальних приростів:

$$\text{Вузол 204: } \Delta Q_{\text{опт}} = -37.877 \cdot 0.01 / (-37.877 + 37.898) = -17.70;$$

$$\text{Вузол 9: } \Delta Q_{\text{опт}} = -0.282 \cdot 0.11 / (-0.282 + 0.2838) = -23.90.$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку:

$$\begin{aligned} \sqrt{SGR} &= (37.8773 \cdot 10^{-3})^2 + (0.2825 \cdot 10^{-1})^2 = (0.03788)^2 + \\ &+ (0.02825)^2 = \sqrt{0.002233} = 0.04725 \end{aligned}$$

$$\text{Вузол 204: } \omega = 0.03788/0.04725 = 0.8017;$$

$$\text{Вузол 9: } \omega = 0.02825/0.04725 = 0.5979.$$

Розрахунок нових значень $Q_{\text{нов}}$:

$$\text{Вузол 204: } Q_{\text{нов}} = 5 + (-17.70) \cdot 0.8017 = -9.20;$$

$$\text{Вузол 9: } Q_{\text{нов}} = 10 + (-23.90) \cdot 0.5979 = -4.29.$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR| = 0.03788 + 0.02825 = 0.06613 > EPS.$$

КРОК 2:

Name	Q_s	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
204	-9.20	0.01	4.2311548	0.154781	0.2475344	0.3404342	1000
9	-4.29	0.11	___//___	0.1154781	0.2035255	0.292683	100

Розрахунок похідних:

$$\text{Вузол 204: } GR1 = (0.1547810 - 0.2475344)/0.01 = -9.2753;$$

$$GR2 = (0.2475344 - 0.3404342)/0.01 = -9.2899.$$

$$\text{Вузол 9: } GR1 = (0.1154781 - 0.2035255)/0.11 = -0.8004;$$

$$GR2 = (0.2035255 - 0.2926830)/0.11 = -0.8105.$$

Розрахунок оптимальних приростів:

$$\text{Вузол 204: } \Delta Q_{\text{опт}} = -9.27534 \cdot 0.01 / (-9.2753 + 9.2899) = -6.3356;$$

$$\text{Вузол 9: } \Delta Q_{\text{опт}} = -0.8004 \cdot 0.11 / (-0.8004 + 0.8105) = -8.7172.$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку:

$$\begin{aligned} \sqrt{SGR} &= (-9.27534 \cdot 10^{-3})^2 + (-0.8004 \cdot 10^{-2})^2 = (-0.00928)^2 + \\ &+ (-0.008)^2 = \sqrt{0.00015} = 0.01225 \end{aligned}$$

$$\text{Вузол 204: } \omega = 0.00928/0.01225 = 0.7576;$$

$$\text{Вузол 9: } \omega = 0.008/0.01225 = 0.6531.$$

Розрахунок нових значень Q:

$$\text{Вузол 204: } Q_{\text{нов}} = -9.2 + (-6.3356) \cdot 0.7576 = -13.99;$$

$$\text{Вузол 9: } Q_{\text{нов}} = -4.29 + (-8.7172) \cdot 0.6531 = -9.99.$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR| = 0.00928 + 0.008 = 0.01728 > \text{EPS}$$

КРОК 3:

Name	Q _s	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
204	-13.99	0.01	4.1872176	0.1761871	0.4141666	0.6532759	10000
9	-9.99	0.11	___//___	0.2176187	0.3882884	0.5692820	1000

Розрахунок похідних:

$$\text{Вузол 204: } GR1 = (0.1761871 - 0.4141666)/0.01 = -2.37;$$

$$GR2 = (0.4141666 - 0.6532759)/0.01 = -2.3805.$$

$$\text{Вузол 9: } GR1 = (0.2176187 - 0.3882884)/0.11 = -1.5489;$$

$$GR2 = (0.3882884 - 0.5692820)/0.11 = -1.6431.$$

Розрахунок оптимальних приростів:

$$\text{Вузол 204: } \Delta Q_{\text{опт}} = -2.37 \cdot 0.01 / (-2.37 + 2.3805) = -2.2571;$$

$$\text{Вузол 9: } \Delta Q_{\text{опт}} = -1.548 \cdot 0.11 / (-1.548 + 1.643) = -1.8101.$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку:

$$\sqrt{SGR} = (-2.37 \cdot 10^{-4})^2 + (-1.5489 \cdot 10^{-3})^2 = (-0.000237)^2 + (-0.00155)^2 = \sqrt{0.00000331} = 0.00182$$

$$\text{Вузол 204: } \omega = 0.000237/0.00182 = 0.124;$$

$$\text{Вузол 9: } \omega = 0.00155/0.00182 = 0.995.$$

Розрахунок нових значень Q:

$$\text{Вузол 204: } Q_{\text{нов}} = -13.99 + (-2.2571) \cdot 0.124 = -14.269;$$

$$\text{Вузол 9: } Q_{\text{нов}} = -9.99 + (-1.8101) \cdot 0.995 = -11.791.$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR| = 0.000237 + 0.00155 = 0.001787 > \text{EPS}.$$

КРОК 4:

Name	Q _s	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
204	-14.269	0.01	4.1853973	0.3972858	0.4134688	0.4297176	1000
9	-11.791	0.11	___//___	0.7285817	0.1870693	0.65998161	100000

Розрахунок похідних:

$$\text{Вузол 204: } GR1 = (0.3972858 - 0.4134688) / 0.01 = -1.618;$$

$$GR2 = (0.4134688 - 0.4297176)/0.01 = -1.625.$$

$$\text{Вузол 9: } GR1 = (0.7285817 - 0.1870693)/0.11 = 4.923;$$

$$GR2 = (0.1870693 - 0.6599816) / 0.11 = -4.299.$$

Розрахунок оптимальних приростів:

$$\text{Вузол 204: } \Delta Q_{\text{опт}} = -1.618 \cdot 0.01 / (-1.618 + 1.625) = -2.311;$$

$$\text{Вузол 9: } \Delta Q_{\text{опт}} = 4.923 \cdot 0.11 / (4.923 + 4.299) = 0.059.$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку:

$$\sqrt{SGR} = (-1.618 \cdot 10^{-3})^2 + (4.923 \cdot 10^{-3})^2 = (-0.00162)^2 + (-0.000049)^2 = \sqrt{0.00000289} = 0.00017$$

$$\text{Вузол 204: } \omega = 0.00162 / 0.00017 = 0.953;$$

$$\text{Вузол 9: } \omega = 0.000049 / 0.00017 = 0.288.$$

Розрахунок нових значень Q:

$$\text{Вузол 204: } Q_{\text{нов}} = -14.269 + (-2.311) \cdot 0.953 = -16.471;$$

$$\text{Вузол 9: } Q_{\text{нов}} = -11.791 + 0.059 \cdot 0.288 = -11.774.$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR| = 0.00162 + 0.000049 = 0.001669 > EPS.$$

КРОК 5:

Name	Q _s	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
204	-16.471	0.01	4.1841804	0.8042693	0.7555084	0.7076656	10000
9	-11.774	0.11	___//___	0.1804269	0.1128878	0.0554148	1000

Розрахунок похідних:

$$\text{Вузол 204: } GR1 = (0.8042693 - 0.7555084) / 0.01 = 4.876;$$

$$GR2 = (0.7555084 - 0.7076656) / 0.01 = 4.784.$$

$$\text{Вузол 9: } GR1 = (0.1804269 - 0.1128878) / 0.11 = 0.614;$$

$$GR2 = (0.1128878 - 0.0554148) / 0.11 = 0.522.$$

Розрахунок оптимальних приростів:

$$\text{Вузол 204: } \Delta Q_{\text{опт}} = 4.876 \cdot 0.01 / (4.876 - 4.784) = 0.53;$$

$$\text{Вузол 9: } \Delta Q_{\text{опт}} = 0.614 \cdot 0.11 / (0.614 - 0.522) = 0.734.$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку:

$$\sqrt{SGR} = (4.876 \cdot 10^{-4})^2 + (0.614 \cdot 10^{-3})^2 = (0.000488)^2 + (0.000614)^2 = \sqrt{0.000000608} = 0.00078$$

$$\text{Вузол 204: } \omega = 0.000488 / 0.00078 = 0.625;$$

$$\text{Вузол 9: } \omega = 0.000614 / 0.00078 = 0.787.$$

Розрахунок нових значень Q:

$$\text{Вузол 204: } Q_{\text{нов}} = -16.471 + 0.53 \cdot 0.625 = -16.14;$$

$$\text{Вузол 9: } Q_{\text{нов}} = -11.774 + 0.734 \cdot 0.787 = -11.196.$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR| = 0.000488 + 0.000614 = 0.0011 > EPS \quad (\text{вважаємо точність}$$

розрахунку достатньою).

Результуючий файл оптимізації розглянутого прикладу представлений на рис. 8.13, 8.14. В аналізі оптимізації можна відзначити наступне:

- **Спуск** по антиградієнту збігається за 5 кроків;
- **Сумарне** значення градієнта $\sum |GR| = 0.0011 \leq Eps$;
- **Графіки** збіжності процесу оптимізації представлені на рис. 8.15. ;
- **Оптимальні** значення реактивної потужності дорівнюють:

$$Q_{204} = -16.14, Q_9 = -11.196;$$
- **Всього** в регульованих вузлах доцільно встановити компенсуючі пристрої

$$Q_{204}^{KY} = -(16.14 + 5) = -21.14 \text{ МВар},$$

$$Q_9^{KY} = -(11.196 + 10) = -21.196 \text{ МВар};$$

- **Поставлене завдання** з компенсації реактивної потужності виконане:

$$\text{Узел 9: } 21.14 > 5 + 5 + 0.7 + \dots$$

$$\text{Узел 204: } 21.196 > 10 + \dots$$

- **Оптимізація** забезпечила зниження втрат

$$\Delta P_{\text{исх}} = 4.807, \quad \Delta P_{\text{опт}} = 4.184;$$

Економія:

$$\% = (\Delta P_{\text{исх}} - \Delta P_{\text{опт}}) \cdot 100 / \Delta P_{\text{исх}} = (4.807 - 4.184) \cdot 100 / 4.807 = 12.97\%$$

- **Задані у файлі ES_PS_D. vus обмеження** по напрузі порушені для вузла 206

$$U_{\text{max}} < U_{\text{расч}} = 11.00 < 11.089$$

Можна прийняти наступні рішення:

- зарегулювати напругу трансформаторів Т3;
- виконати автоматичну оптимізацію з урахуванням обмежень;
- погодитися з розрахунковим значенням $Q^{\text{опт}}$.

Для реалізації варіанту б) встановимо у ключовому файлі KEY0 = 0 і включимо врахування обмежень по напрузі (прибрати «-» у файлі _ _ . vus). Результат розрахунку наведено на рис. 8.16, 8.17.

Маємо $U_{206} = 10.996$ (в нормі).

Оптимальне значення: $Q_{206} = -14.42 \text{ МВар}, Q_9 = -10.48 \text{ МВар}.$

Зниження втрат:

$$\Delta P_{\text{исх}} = 3.599 + 1.208 = 4.807; \Delta P_{\text{опт}} = 2.969 + 1.217 = 4.186;$$

$$\Delta \Delta P = 0.624; \quad \Delta \Delta P\% \approx 12,97\%.$$

***** Результаты расчета GRADIENT File= es_ps_d *****

Nnn	Name	Qs	dQt	DPT	dDP1	dDP2	MM						
1	204	5.0000	0.0100	4.8071444	0.1444036	0.5231766	0.9021637	1000					
2	9	10.0000	0.1100	4.8071444	0.0714440	0.1025231	0.1337392	10					
									###	0	0.06613	0.06613	###
1	204	-9.2000	0.0100	4.2413437	0.3436961	0.4364500	0.5292888	1000					
2	9	-4.2900	0.1100	4.2413437	0.1343696	0.2223960	0.3115248	100					
									###	1	0.01728	0.04885	###
1	204	-13.9900	0.0100	4.1872176	0.1761871	0.4141666	0.6532759	10000					
2	9	-9.9900	0.1100	4.1872176	0.2176187	0.3882884	0.5692820	1000					
									###	2	0.00393	0.01335	###
1	204	-14.2690	0.0100	4.1853973	0.3972858	0.4134688	0.4297176	1000					
2	9	-11.7910	0.1100	4.1853973	0.7285817	0.1870693	0.6599816	100000					
									###	3	0.00167	0.00226	###
1	204	-16.4710	0.0100	4.1841804	0.8042693	0.7555084	0.7076656	10000					
2	9	-11.7740	0.1100	4.1841804	0.1804269	0.1128878	0.0554148	1000					
									###	4	0.00110	0.00057	###
1	204	-16.1400	0.0100	4.1838767	0.6790349	0.3927494	0.2178053	1000000					
2	9	-11.1960	0.1100	4.1838767	0.6679035	0.1778988	0.7076374	100000					
									###	5	0.00007	0.00103	###
									###	6	0.00007	0.00103	###

***** OPTIM_Q(Grad) File= es_ps_d

Nnn	Name	Qs	Qmin	Qmax
1	204	-16.1400	-20.0000	20.0000
2	9	-11.1960	-100.0000	100.0000

Рис. 8.13. Процес ручної (діалогової) оптимізації розподілення реактивних потужностей в схемі ES_PS_D без урахування обмежень. Реактивна потужність регулюється у вузлах 204; 9. Процес збігається за 5 кроків спуску по антиградієнту

***** Результаты расчета (N_REGIM_S) File= es_ps_d 3 *****

1 0.22000
2 0.00017
3 0.00000

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	-215.975	-61.013	0.329	-19.282	-214.972	-49.851	1
2	2	336.285	-1.942	336.092	-11.394	200.000	120.000	0.351	-53.739	0.000	0.000	0
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000	-222.822	-122.694	0.434	-34.517	-223.212	-83.737	1
4	4	120.595	-2.662	120.465	-5.601	50.000	30.000	0.000	-1.230	0.000	0.000	0
5	5	120.771	-4.188	120.449	-8.819	70.000	50.000	0.000	-1.777	0.000	0.000	0
6	6	118.520	-5.292	118.015	-10.930	15.000	7.000	0.000	-2.490	0.000	0.000	0
7	7	119.161	-6.096	118.487	-12.655	10.000	8.000	0.000	-1.802	0.000	0.000	0
8	8	118.591	-6.717	117.777	-13.872	18.000	10.000	0.000	-2.374	0.000	0.000	0
9	9	119.117	-7.154	118.189	-14.835	20.000	-11.196	0.000	-1.400	0.000	0.000	0
10	10	38.098	-4.323	37.989	-2.872	3.000	1.000	0.000	-0.042	0.000	0.000	0
11	11	38.089	-6.040	37.877	-4.008	3.000	1.000	0.000	-0.054	0.000	0.000	0
12	12	38.567	-3.531	38.494	-2.375	10.000	5.000	0.000	-0.043	0.000	0.000	0
13	13	38.640	-5.062	38.490	-3.410	10.000	5.000	0.000	-0.055	0.000	0.000	0
14	100	332.912	-2.675	332.549	-15.537	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
15	101	333.531	-4.209	332.632	-24.482	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
16	200	119.333	-6.315	118.608	-13.127	0.000	0.000	0.103	0.436	0.000	0.000	0
17	201	119.333	-6.315	118.608	-13.127	0.000	0.000	0.000	-0.731	0.000	0.000	0
18	202	38.804	-12.080	37.944	-8.121	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	203	38.804	-12.080	37.944	-8.121	2.000	1.000	0.000	-0.029	0.000	0.000	0
20	204	11.160	-11.398	10.940	-2.205	10.000	-16.140	0.000	0.000	0.000	0.000	0
21	205	11.160	-11.398	10.940	-2.205	7.000	5.000	0.000	-0.034	0.000	0.000	0
22	206	11.089	-11.340	10.873	-2.181	1.000	0.700	0.000	-0.033	0.000	0.000	0
23	207	38.589	-12.399	37.689	-8.286	2.000	1.000	0.000	-0.029	0.000	0.000	0
24	300	123.012	-11.329	120.615	-24.165	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
SUMMA :						434.000	219.364	1.217	-119.225	-438.184	-133.589	
BALANS :										2.967	33.450	
PAST SUMMA :						434.000	261.700	1.208	-118.476	-438.807	-183.706	
PAST BALANS :										3.599	40.482	

Рис. 8.14. Результат ручної (діалогової) оптимізації розподілу реактивних потужностей в схемі ES_PS_D без урахування обмежень за напругою. Є трохи завищені напруги на низькій і середній напрузі ТЗ.
Зниження втрат: $4.81 - (2.967 + 1.217) = 0.626 \text{ МВт} \approx 13.01\%$.

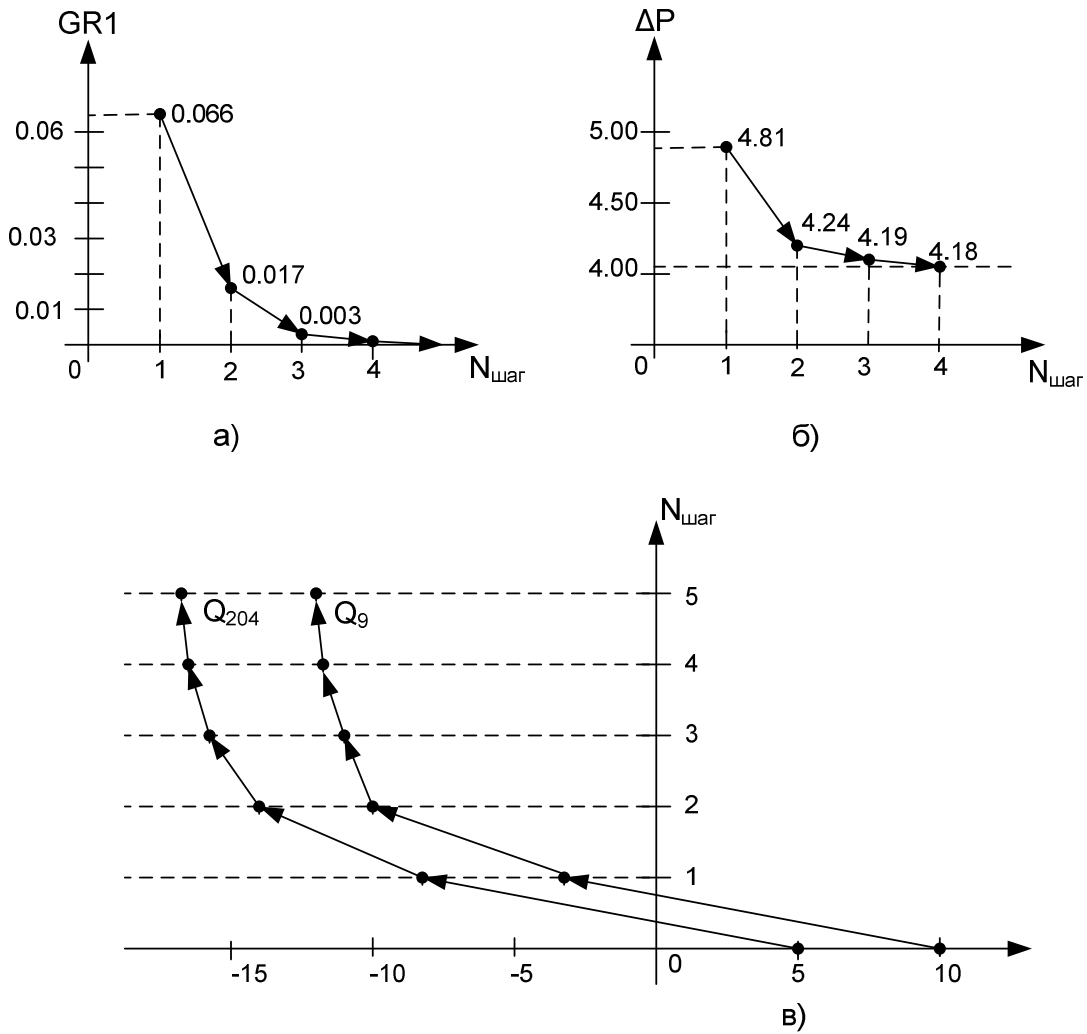


Рис. 8.15. Характеристики процесу оптимізації по кроках:
 а) рух вектора градієнта у Φ ;
 б) зміна сумарних втрат в комплексній схемі;
 в) регулювання реактивних потужностей у вузлах 9; 204.

***** Результаты расчета GRADIENT File= es_ps_d *****

Nnn	Name	Qs	dQt	DPT	DP1	DP2	GR1	Gr2	DQT
1	204	5.0000	0.0100	4.8071444	4.8075232	4.8079022	-0.0378773	-0.0378987	-17.70211074
2	9	10.0000	0.1100	4.8071444	4.8102523	4.8133739	-0.0282537	-0.0283782	-24.96267806
									### 0 0.06613 0.06613 ###
1	204	-9.1894	0.0100	4.2365721	4.2366629	4.2367539	-0.0090865	-0.0090996	-6.91232962
2	9	-4.9254	0.1100	4.2365721	4.2373888	4.2382166	-0.0074251	-0.0075250	-8.18015467
									### 1 0.01651 0.04962 ###
1	204	-14.5419	0.0100	4.1859126	4.1859306	4.1859487	-0.0018006	-0.0018108	-1.75326018
2	9	-10.1015	0.1100	4.1859126	4.1860562	4.1862102	-0.0013063	-0.0013999	-1.53537813
									### 2 0.00311 0.01340 ###
1	204	-14.4419	0.0100	4.1854478	4.1854651	4.1854825	-0.0017264	-0.0017393	-1.33693545
2	9	-10.7418	0.1100	4.1854478	4.1855346	4.1856317	-0.0007892	-0.0008820	-0.93576704
									### 3 0.00252 0.00059 ###
1	204	-14.4153	0.0100	4.1853754	4.1853924	4.1854096	-0.0017067	-0.0017168	-1.68821780
2	9	-10.9175	0.1100	4.1853754	4.1854466	4.1855281	-0.0006475	-0.0007407	-0.76411611
									### 4 0.00235 0.00016 ###
1	204	-14.4112	0.0100	4.1853830	4.1854001	4.1854173	-0.0017126	-0.0017165	-4.39927605
2	9	-10.9165	0.1100	4.1853830	4.1854545	4.1855361	-0.0006495	-0.0007424	-0.76912561
									### 5 0.00236 0.00001 ###
									### 6 0.00236 0.00001 ###

***** OPTIM_Q(Grad) File= es_ps_d

Nnn	Name	Qs	Qmin	Qmax
1	204	-14.4238	-20.0000	20.0000
2	9	-10.4777	-100.0000	100.0000

Nnn	Name	Umin	Umax
1	206	9.5000	11.0000
2	9	110.0000	120.0000

Рис. 8.16. Процес автоматичної оптимізації розподілу реактивних потужностей з урахуванням обмежень за напруги схеми ES_PS_D (вузли 206, 9). Реактивна потужність регулюється у вузлах 204,9. Процес збігається за 6 кроків спуску по антиградієнту.

***** Результаты расчета (N_REGIM_S) File= es_ps_d 1 *****

1 0.00000

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000	-215.975	-61.013	0.329	-19.282	-215.021	-50.421	1
2	2	336.285	-1.942	336.092	-11.394	200.000	120.000	0.351	-53.739	0.000	0.000	0
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000	-222.822	-122.694	0.434	-34.517	-223.165	-85.789	1
4	4	120.559	-2.664	120.429	-5.603	50.000	30.000	0.000	-1.230	0.000	0.000	0
5	5	120.645	-4.189	120.323	-8.812	70.000	50.000	0.000	-1.773	0.000	0.000	0
6	6	118.371	-5.285	117.868	-10.903	15.000	7.000	0.000	-2.484	0.000	0.000	0
7	7	118.945	-6.090	118.273	-12.618	10.000	8.000	0.000	-1.795	0.000	0.000	0
8	8	118.323	-6.704	117.514	-13.813	18.000	10.000	0.000	-2.363	0.000	0.000	0
9	9	118.829	-7.139	117.908	-14.768	20.000	-10.478	0.000	-1.394	0.000	0.000	0
10	10	38.086	-4.326	37.978	-2.873	3.000	1.000	0.000	-0.042	0.000	0.000	0
11	11	38.047	-6.046	37.836	-4.007	3.000	1.000	0.000	-0.054	0.000	0.000	0
12	12	38.555	-3.533	38.482	-2.376	10.000	5.000	0.000	-0.043	0.000	0.000	0
13	13	38.599	-5.066	38.449	-3.409	10.000	5.000	0.000	-0.055	0.000	0.000	0
14	100	332.814	-2.677	332.451	-15.544	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
15	101	333.183	-4.212	332.284	-24.469	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
16	200	119.039	-6.297	118.321	-13.057	0.000	0.000	0.102	0.434	0.000	0.000	0
17	201	119.039	-6.297	118.321	-13.057	0.000	0.000	0.000	-0.727	0.000	0.000	0
18	202	38.479	-12.117	37.622	-8.077	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	203	38.479	-12.117	37.622	-8.077	2.000	1.000	0.000	-0.029	0.000	0.000	0
20	204	11.068	-11.411	10.849	-2.190	10.000	-14.424	0.000	0.000	0.000	0.000	0
21	205	11.068	-11.411	10.849	-2.190	7.000	5.000	0.000	-0.033	0.000	0.000	0
22	206	10.996	-11.353	10.781	-2.165	1.000	0.700	0.000	-0.033	0.000	0.000	0
23	207	38.263	-12.441	37.364	-8.243	2.000	1.000	0.000	-0.028	0.000	0.000	0
24	300	122.001	-11.353	119.614	-24.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
SUMMA :						434.000	221.798	1.217	-119.187	-438.186	-136.210	
BALANS :										2.969	33.598	
PAST SUMMA :						434.000	261.700	1.208	-118.476	-438.807	-183.706	
PAS BALANS :										3.599	40.482	

Рис. 8.17. Результаты автоматической оптимизации розподілу реактивних потужностей схеми ES_PS_D з урахуванням обмежень по напрузі: $9.5 \leq U_{206} = 10.996 \leq 11.0$

$$110 \leq U_9 = 118.829 \leq 120.0$$

Зниження втрат: $4.81 - (2.969 + 1.217) = 0.624 \text{ MВт} \approx 12.97\%$

8.4. Інструкція і приклад розрахунку трифазних струмів кз

Розрахунки струмів трифазних КЗ реалізуються на основі пакету лабораторних робіт LB_APEZ2_Z за номером роботи № 8. При запуску цієї роботи згідно з методом розрахунку автоматично зануляються навантаження, вузли із заданою напругою $U_{кз} \approx 0$, виключаються з розрахунку матриці Y поперечні провідності ліній і трансформаторів і, нарешті, виконується розрахунок режиму в струмах за допомогою процедури Z_REGIM_T. Кінцевий результат розрахунку - напруга всіх вузлів, дозволяє обчислити струморозподілення струмів короткого замикання і власне вузловий струм КЗ заданого вузла.

Управління розрахунком струмів КЗ здійснюється через ключовий файл AP_AKEY.PAS, який містить наступні дані:

- **KEYf** - ключ фіксації модулів напруги при розрахунку усталеного режиму. У бакалаврської роботи KEYf = 0;
- **KEYz** - ключ розрахунку струмів кз. Якщо KEYz = 1, реалізується розрахунок. Якщо KEYz ≠ 1, видається сигнал ERROR;
- **kz1, kz2, kz3** - номери вузлів схеми, в яких відбувається одночасно трифазне КЗ. Номер вузла = 0 сприймається як відсутність кз;

Вихідними інформаційними файлами для оптимізації режиму є раніше розглянуті файли з розширенням .PNT, .LIN, .REZ, а конкретно для бакалаврської роботи маємо:

ES_PS_D.PNT - файл вузлів спільної схеми, яка містить стандартну живлячу систему та індивідуальну схему підстанції, режим якої введено в допустиму область;

ES_PS_D.LIN - файл гілок цієї схеми;

ES_PS_D.REZ - файл результатів розрахунку режиму. При оптимізації обов'язково містить режимні характеристики оптимального режиму і інтегральні характеристики вихідного режиму.

У розрахунковій схемі ES_PS_D для визначення уставки РЗ (струмова відсічення) розрахуємо струм КЗ для віддаленого фідера 10 кВ (вузол 206). Ключовий файл буде мати вигляд: KEYf = 0, KEYz = 1, kz1 = 206, kz2 = kz3 = 0.

Згідно файлу результатів ES_PS_D по живлячому кабелю 205-206 буде протікати струм 6.24 кА. Перевіримо це значення:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{206} &= (\dot{U}_{205} - \dot{U}_{206}) / \sqrt{3} \cdot Z = (6.373 - j3.218) / \sqrt{3} \cdot (0.601 + j0.277) = \\ &= 3.864 - j4.901; \quad I_{206} = 6.24 \text{ кА.} \end{aligned}$$

У розрахунковій схемі ES_PS_D для визначення уставок захисту трансформатора Т3 розрахуємо струм КЗ на шині 10 кВ (вузол 205) при відключеному трансформаторі Т4. Згідно файлу результатів ES_PS_D по розрахунковій гілці буде протікати струм 11.82 кА. Значення струмів по гілках взяті з результуючих таблиць, які наведені згідно рис. 8.18. Потокорозподіл КЗ в комплексній схемі розраховується згідно розділу 6 (рис. 6.2.).

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr
1	1	340.000	0.000	340.000	0.000
2	2	341.852	-0.000	341.852	-0.000
3	3	345.000	0.000	345.000	0.000
4	4	120.403	-0.201	120.402	-0.422
5	5	113.381	-0.343	113.379	-0.678
6	6	111.015	0.455	111.012	0.881
7	7	108.262	0.150	108.261	0.283
8	8	100.977	1.159	100.956	2.043
9	9	104.095	0.709	104.087	1.289
10	10	38.760	-0.219	38.760	-0.148
11	11	36.502	-0.425	36.501	-0.270
12	12	38.760	-0.219	38.760	-0.148
13	13	36.502	-0.425	36.501	-0.270
14	100	332.212	-0.219	332.209	-1.271
15	101	312.860	-0.425	312.851	-2.318
16	200	94.673	2.046	94.613	3.379
17	201	94.673	2.045	94.613	3.379
18	202	1.025	-83.644	0.114	-1.019
19	203	1.025	-83.644	0.114	-1.019
20	204	0.003	-37.850	0.002	-0.002
21	205	0.000	0.000	0.000	0.000
22	206	0.000	-0.000	0.000	-0.000
23	207	1.025	-83.644	0.114	-1.019
24	300	3.223	-83.644	0.357	-3.203

Nnn	NameN	NameK	TKZ
1	1	2	-0.033
2	2	3	-0.033
3	4	6	0.215
4	5	7	0.142
5	6	8	0.215
6	7	9	0.142
7	8	9	-0.142
8	12	10	0.000
9	13	11	0.000
10	1	100	0.078
11	100	4	0.078
12	100	12	0.000
13	3	101	0.318
14	101	5	0.318
15	101	13	0.000
16	8	200	0.356
17	5	201	0.736
18	205	206	0.000
19	203	207	0.000
20	200	300	1.091
21	300	203	0.000
22	300	204	1.075
23	200	201	-0.736
24	202	203	0.000
25	204	205	11.823

Рис. 8.18. Результаты расчета струмів к. з. комплексної схеми ES_PS_D. Трифазне к. з. у вузлі 205.

Список літератури

1. Математичні задачі енергетики [Текст]: метод. вказівки до викон. курсової роботи для студ. напряму підготов. бакалаврів 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Уклад.: Д.Б. Банін, О.В. Хоменко, М.Д. Банін – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 2. Розрахунок, аналіз і оптимізація режимів роботи електричних мереж 750-10(6) кВ – 48 с.
2. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1987.
3. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 575 с.
4. *Уилкинсон Райнш.* Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ – Линейная алгебра. – М.: Машиностроение, 1976. – 389 с.
5. *Басакер Р., Сааги Т.* Конечные графы и сети. – М.: Наука, 1974. – 366 с.
6. *Бромеллер А., Аллан Р., Хэмэн Я.* Слабозаполненные матрицы. – М.: Энергия, 1979. – 191 с.
7. *Тьюарсон Р.* Разреженные матрицы. – М.: Мир, 1977.
8. *Джордж А., Дж. Лю.* Численное решение больших разреженных систем уравнений. – М.: Мир, 1984. – 331 с.
9. *Ортега Дж., Рейнболдт В.* Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений с многими неизвестными. – М.: Мир, 1975. – 558 с.