

УДК 621.316.11.001

Скрипник А.М.

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Голуб Б.Л.

кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри комп'ютерних наук,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Кожан Д.П.

аспірант кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 10 – 110кВ

Анотація: Розглядаються розроблені комплекси програмного забезпечення, які, крім моделювання усталених та експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж, включають оптимізацію неоднорідних контурів мереж напругою 35 кВ та слабозамкннутих напругою 110 кВ, а також вибір економічно доцільних місць розташування та величин потужностей джерел розподіленої генерації (відновлювальних джерел енергії) в мережах напругою 10(6) кВ.

Ключові слова: Моделювання, усталений режим, матриця коефіцієнтів, питомі транспортні витрати, розподільна електрична мережа, джерело розподіленої генерації (ДРГ), градієнтний метод, база даних, прикладне програмне забезпечення.

Вступ

Розподільні електричні мережі 10(6) та 35 кВ за технічними та технологічними умовами експлуатуються розімкненими, а мережі 110 кВ слабозамкнутими або розімкнутими. Для управління вказаними мережами виникає необхідність в моделюванні їх усталених (планування) та експлуатаційних режимів з врахуванням економічного розмикання неоднорідних контурів. Крім того, широке впровадження ДРГ (перетворювачі сонячної та вітрової енергії, ГЕС на малих ріках і т.п.), наприклад в мережах 10(6) кВ, що живляться від системного електропостачання, вимагає вирішення питань щодо визначення економічно доцільних місць їх розташування та величин активної і реактивної потужностей з врахуванням розподілу між усіма живлячими мережу об'єктами.

Огляд останніх досліджень та публікацій

Питаннями щодо моделювання усталених режимів розподільних електричних мереж та пошуку в них економічно доцільних місць розташування і величин потужностей ДРГ у різні часи займалися такі вчені як Jegadeesan M., Nitin Singh, Haesen E., Воропай М.І., Лежнюк П.Д., Кириленко О.В., Козирський В.В., Яндульський О.С., Скрипник А.М., Кирик В.В., Кулик В.В., Тугай Ю.І. та інші.

Мета і задачі досліджень

Пропозиції щодо моделювання усталених режимів електричних мереж напругою 35 – 110(150) кВ з врахуванням економічного розмикання неоднорідних контурів та розробки математичної моделі пошуку оптимальних місць розташування і величин потужності ДРГ в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації.

Матеріали і методи дослідження

Для вирішення вище вказаних задач кафедрою електропостачання ім. проф. В.М. Синькова у співробітництві з кафедрою комп'ютерних наук НУБіП України в періоди з 2003 по 2006 роки та з 2016 по 2017 роки розроблено математичне забезпечення та виконана програмна реалізація моделювання усталених і експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж напругою 10(6) – 110(150) кВ у виді двох програмних комплексів:

- моделювання усталених та економічних по розмиканню неоднорідних контурів режимів розподільних електричних мереж напругою 35 – 110(150) кВ;
- моделювання економічно доцільних місць розташування та величин потужностей джерел розподіленої генерації з орієнтацією на розподільні електричні мережі 10(6) кВ, які живляться від системного електропостачання.

У першому комплексі для моделювання усталених режимів електричних мереж використаний найбільш поширений класичний метод Ньютона – лінеаризація системи нелінійних рівнянь на кожному кроці ітераційного процесу [1,2]. Матриця коефіцієнтів А системи лінійних рівнянь $A \cdot X = B$ формується у вигляді розрідженої матриці.

При застосуванні методу Ньютона використана система вузлових рівнянь усталеного режиму у вигляді вузлових небалансів активних і реактивних потужностей

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_i^P &= P_i + U_i^2 G_{ii} - \sum U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ \mathcal{E}_i^Q &= Q_i - U_i^2 B_{ii} - \sum U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathcal{E}$ – символ нев'язки; i – індекс вузла, який розглядається; j – поточний індекс вузла, який має безпосередній електричний зв'язок з вузлом що розглядається;

G_{ii} , B_{ii} , G_{ij} , B_{ij} – дійсні та уявні складові елементів матриці вузлової провідності;

θ_i , θ_j , U_i , U_j – кути (фази) та модулі напруги i -го та j -го вузлів; P_i , Q_i – задані значення вузлових потужностей.

При цьому ітераційний процес Ньютона має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K+1)} = \begin{bmatrix} \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathcal{E}_i^P \\ \mathcal{E}_i^Q \end{bmatrix}^{(K)} \quad (2)$$

Згідно з ним поправки $\delta \theta_i$ і δU_i до невідомих величин визначаються на кожній ітерації розв'язанням системи лінійних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \delta \theta_i \\ \delta U_i \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathcal{E}_i^P \\ \mathcal{E}_i^Q \end{bmatrix}^{(K)} \quad (3)$$

Система лінійних рівнянь (3) як складова (2), розв'язується з використанням алгоритму Краута (LU – факторизація) та врахуванням розрідженості матриці Якобі [3], яка формується за допомогою ланцюгових посилань на ненульові елементи. Матриця провідності вузлів, що використовується при формуванні розрідженої матриці Якобі, має модель адресних посилань.

Розрахункові схеми електричних мереж формуються з моделей (схем заміщення) ліній електропередачі, трансформаторів, батарей статичних конденсаторів та моделей вузлового споживання.

Повітряні та кабельні лінії електропередачі моделюються П-подібними схемами заміщення в яких активний R_L і реактивний X_L опори, Ом та активна $G_L/2$ і реактивна $B_L/2$ провідності по кінцях ліній, См розраховуються згідно марок проводів та довжин відповідних ділянок.

Двообмоткові трансформатори в розподільних мережах, як правило, моделюються схемами заміщення R_T – активний опір, Ом та X_T – реактивний опір, Ом і є паспортними даними відповідних типів трансформаторів, а коефіцієнти трансформації K_T (в.о.) визначається як відношення номінальної напруги обмотки вищої напруги до номінальної напруги обмотки нижчої напруги.

Триобмоткові трансформатори моделюються трипроменевою схемою заміщення і розглядаються як три двообмоткові трансформатори з однією спільною точкою з'єднання (середня точка). При цьому коефіцієнт трансформації обмотки вищої напруги $K_{T1} = 1$, а коефіцієнти трансформації обмоток середньої та нижчої напруги визначаються, як відношення номінальної напруги обмотки вищої напруги відповідно до номінальних напруг обмоток середньої та нижньої напруги.

Вузли системного живлення (балансуючі вузли) моделюються постійними величинами $U = \text{const}$ і $\theta = 0 = \text{const}$ ($P = \text{vart}$, $Q = \text{var}$).

Батареї статичних конденсаторів як генератори реактивної потужності, моделюються спрощеною математичною моделлю у вигляді $Q = \text{const}$, якщо автоматичне регулювання модуля напруги не передбачено; $U = \text{const}$, якщо передбачено автоматичне регулювання модуля напруги (фіксація модуля напруги).

Споживання електричної енергії у вузлах розрахункової схеми моделюється статичними моделями активної P та реактивної Q потужності, тобто: $P=const$, $Q=const$.

При моделюванні режимів економічних по розмиканню неоднорідних контурів електричних мереж напругою 35 – 110(150) кВ (економічне розмикання мережі) використаний метод питомих транспортних витрат [4] на основі моделі усталеного режиму.

Перетікання активної і реактивної потужностей в умовах експлуатації супроводжується технологічними витратами активної потужності на ділянках мережі $i - j$

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij}, \quad (4)$$

де P_{ij} , Q_{ij} , U_i – відповідно активний і реактивний перетокі початку ділянки $i - j$

та модуль напруги вузла початку ділянки.

Одним із шляхів зниження технологічних витрат активної потужності в електричній мережі є зміна її конфігурації на основі найбільш простих і доступних показників питомих транспортних витрат (ПТВ). Це частинні похідні від витрат активної потужності за активною потужністю, яка передається від джерел генерації до конкретного споживача. Для кожної ділянки $i - j$ електричної мережі ПТВ визначаються відповідно до (4), як:

$$\lambda'_{ij} = \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{2P_{ij}}{U_i^2} R_{ij} \quad (5)$$

Розрахунок ПТВ за схемою складної (розгалуженої) електричної мережі виконується згідно з шляхами електропостачання від вузлів генерації до кінцевих вузлів розімкнутої мережі та до місць розподілу потоків у замкнутій мережі. Якщо шлях електропостачання від вузла генерації S до вузла електроспоживання f не має відгалужень, величина λ'_{sf} знаходиться як алгебраїчна сума ПТВ ділянок, що є між вузлами S і f згідно з виразом (5). Якщо шлях розгалужується на два і більше напрямків, відповідно розгалужується розрахунок ПТВ. У замкнутій мережі розгалужені шляхи можуть знову зійтись в деякому вузлі K з різними значеннями λ'_{sk} . Для подальшого руху за схемою мережі від вузла K до вузла f необхідно для вузла K розрахувати середньоарифметичне значення λ'_{sk} по шляхах його електропостачання як від одного, так і від різних вузлів генерації.

Однією з вимог зниження (мінімізації) технологічних витрат активної потужності в електричній мережі є необхідність, щоб у вузлах сходження шляхів розрахунку величини λ'_{sf} , отримані різними шляхами, співпадали (були максимально наближеними).

За таких умов зниження технологічних витрат можливе шляхом розмикання замкнутої електричної мережі в оптимально вибраних місцях з метою виключення неоднорідних контурів (оптимізація розмикання неоднорідних контурів).

Необхідно зазначити, що виконання оптимізаційних розрахунків по розмиканню неоднорідних контурів електричної мережі базується на результатах моделювання її усталеного режиму.

В другому комплексі для вирішення питання щодо визначення економічно доцільних місць розташування ДРГ в розподільних мережах та величин їх активної і

реактивної потужностей з врахуванням розподілу між живлячими мережу об'єктами на відміну від [5, 8] пропонується підхід в два етапи:

- 1) визначення економічних місць розташування ДРГ;
- 2) визначення величин активних і реактивних потужностей ДРГ в місцях економічного їх розташування.

Для визначення економічно доцільних місць розташування ДРГ в розподільних електричних мережах, які живляться від системного електропостачання, замість [6] використано градієнтний метод, який реалізує питомі транспортні витрати на передачу активної і реактивної потужностей по елементах електричної мережі до вузлів споживання. Математична модель вказаного методу на основі лінеаризованої системи рівнянь має вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial P_i} \\ \frac{\partial \pi}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial \pi}{\partial U_i} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де

$[]^T$ – транспонована матриця частинних похідних (матриця Якобі) елементами якої є частинні похідні від небалансів активних і реактивних потужностей у вузлах схеми електричної мережі (6) по відповідних пошукових вузлових характеристиках P , Q , θ і U ;

π – сумарні втрати активної потужності в елементах схеми електричної мережі:

$$\pi = \sum_{K=1}^m [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}, \quad (7)$$

де m – кількість ділянок мережі в якій пропонується встановлення ДРГ;

$\frac{\partial \pi}{\partial P_i}$ – витрати активної потужності на транспорт одиниці активної потужності до i –

го вузла схеми;

$\frac{\partial \pi}{\partial Q_i}$ – витрати активної потужності на транспорт одиниці реактивної потужності до

i – го вузла схеми;

$\frac{\partial \pi}{\partial \theta_i}$ – похідна від сумарних втрат активної потужності в елементах мережі по куту

напруги i – го вузла схеми:

$$\frac{\partial \pi}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n [2U_i U_j \sin(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}, \quad (8)$$

де $\frac{\partial \pi}{\partial U_i}$ – похідна від сумарних втрат активної потужності в елементах мережі по

модулю напруги i – го вузла схеми:

$$\frac{\partial \pi}{\partial U_i} = \sum_{j=1}^n [2U_i - 2U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}, \quad (9)$$

де n – кількість ділянок мережі, що примикають до i – го вузла схеми.

Питомі транспортні витрати $\frac{\partial \pi}{\partial P_i}$ і $\frac{\partial \pi}{\partial Q_i}$ визначаються для всіх вузлів схеми електричної мережі на основі результатів розрахунків режимів її максимального або перспективного вузлового навантаження.

Максимальні значення вузлових питомих транспортних витрат $\frac{\partial \pi}{\partial P_i}$ і $\frac{\partial \pi}{\partial Q_i}$ вказують на найбільш економічні місця встановлення джерел відповідно активної і реактивної потужностей.

В розімкнутих мережах напругою 10 і 35 кВ, які мають декілька відгалужень від вузла системного живлення, максимальні значення вузлових питомих транспортних витрат, а відповідно і найбільш економічні місця встановлення джерел потужності, визначаються окремо по кожному відгалуженню.

Для визначення економічно доцільних потужностей джерел активної і реактивної генерації пропонується використання модифікованого методу Ньютона [7] матриця частинних похідних якого на відміну від класичного методу Ньютона включає частинні

похідні $\frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial P_i}$, $\frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial Q_i}$, $\frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial P_i}$ і $\frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial Q_i}$. Тому ітераційний процес модифікованого методу виглядає як

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \\ \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K+1)} = \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \\ \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial P_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial Q_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial P_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial Q_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathcal{E}_i^P \\ \mathcal{E}_i^Q \end{bmatrix}^{(K)}. \quad (10)$$

При цьому поправки δP_i , δQ_i , $\delta \theta_i$ і δU_i до невідомих величин в (10) визначаються на кожній ітерації розв'язанням системи лінійних рівнянь

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial P_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial Q_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial P_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial Q_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \mathcal{E}_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta P_i \\ \delta Q_i \\ \delta \theta_i \\ \delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{E}_i^P \\ \mathcal{E}_i^Q \end{bmatrix}, \quad (11)$$

Система лінійних рівнянь (11) розв'язується за допомогою стандартної програми методом найменших квадратів згідно алгоритму Хаусхольдера. Система рівнянь (11) розглядається як визначена (кількість відомих дорівнює кількості невідомих) з різними комбінаціями відомих і пошукових величин. Це надає можливість використовувати при розрахунках поточних, максимальних або перспективних по вузлового навантаженню

експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж у порівнянні з методом Ньютона додаткові вузлові моделі в залежності від поставленої задачі:

1) вузли для визначення економічно доцільної величини генерації активної потужності з обмеженням величини генерації реактивної потужності

$$\begin{array}{ccc} U - const, Q_{min} - Q_{max} & \text{або} & Q - const, \theta - const \\ P - var, \theta - var & & P - var, U - var \end{array}$$

2) вузли для визначення економічно доцільної величини генерації реактивної потужності з обмеженням величини активної потужності

$$\begin{array}{c} U - const, P_{min} - P_{max} \\ Q - var, \theta - var \end{array}$$

При цьому всі пошукові активні і реактивні потужності визначаються безпосередньо без додаткового їх розрахунку після закінчення ітераційного процесу.

Отримані результати. Для реалізації зазначених розрахунків розроблено програмний комплекс, що організаційно складається з бази даних та прикладної програми.

База даних

Призначення бази даних – збереження моделей окремих елементів електричних мереж (ліній, вузлів, трансформаторів) та деякої допоміжної інформації, необхідної для формування зазначених вище розрахунків. Сформована структура бази даних може бути використана різними фахівцями, що застосовують необхідні саме їм алгоритми розрахунку [9]. Для управління базою даних використовується СУБД MS Access. Як відомо, ця СУБД файл-серверного типу, що обмежує її використання у багато користувальницькому середовищі. Але, при необхідності, база даних може бути реалізована і у середовищі клієнт-серверної СУБД, такої як MS SQL Server. Така незалежність від СУБД досягається дотриманням правил реляційності моделі бази даних та використанням мови SQL для маніпуляції даними.

На рис.1 представлена структура (схема) розробленої бази даних.

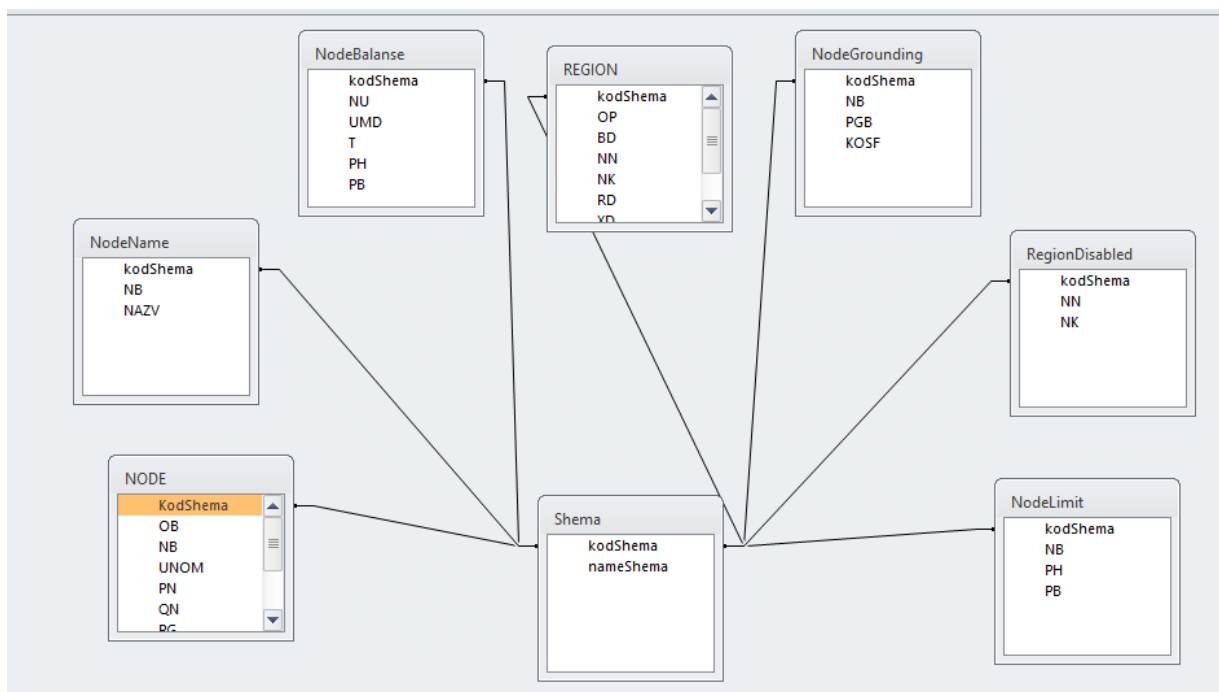


Рис. 1 Структура бази даних

Як видно зі схеми, таблиці бази даних мають прив'язку до певної схеми (поле KodShema). Окрім того, у базі даних зберігаються характеристики електричної мережі з прив'язкою до вузлів (таблиця NODE) та до ділянок (таблиця REGION). Це дозволяє заносити дані для різних електричних мереж і обчислювати необхідні параметри.

Прикладне програмне забезпечення

Програмне забезпечення реалізовано на мові C++ у середовищі C++Builder. На рис.2 зображено головне вікно програми. Меню «Схеми» призначено для формування, корегування (видалення) та перегляду моделей електричних схем. Меню «Розрахунки режиму з ДРГ» та «Вектор-градієнт» дозволяють провести відповідні розрахунки з отриманням графічного зображення ітераційного процесу. Меню «Друк результатів» дозволяє у табличному вигляді передивитися результати розрахунків та вивести їх на друк. Результати розрахунків зберігаються у текстових файлах, що знаходяться у папках, назви яких відповідають даті виконання розрахунку. Назви самих файлів відповідають типам розрахунків режимів електричних мереж.

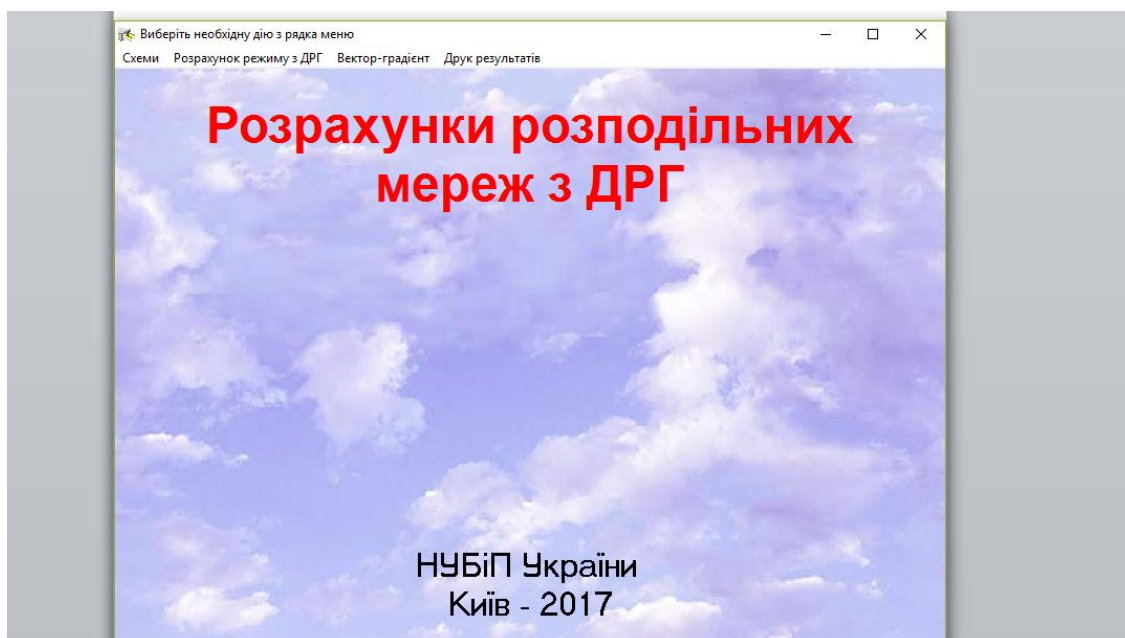


Рис.2 Головне вікно програми

Налагодження програмних компонентів комплексів виконувалось на реальних схемах електричних мереж з досягненням ідентичності результатів, отриманих при використанні промислових програм відповідного профілю.

На даний час розроблені програмні комплекси використовуються студентами факультету енергетики, автоматики і енергозбереження спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання» при виконанні курсового проекту з дисципліни «Математичні задачі енергетики» та при виконанні бакалаврських і магістерських робіт.

Висновки

1. Вперше запропоновано використання методу питомих транспортних витрат який надає можливість розробки простих і достатньо ефективних моделей для визначення економічно обґрунтованих місць розташування ДРГ в розподільних електричних мережах, що живляться від системного електропостачання.

2. Для визначення економічно доцільних потужностей ДРГ з розташуванням їх в економічно обґрунтованих місцях пропонується використовувати розроблену модифікацію методу Ньютона з визначенням поправок до невідомих на кожному кроці ітераційного процесу вирішення системи лінеаризованих рівнянь методом найменших квадратів.

3. Модифікований метод Ньютона, який полягає в доповненні матриці частинних похідних похідними $\frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial P_i}$; $\frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial Q_i}$; $\frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial P_i}$ та $\frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial Q_i}$ надає можливість використовувати вузлові характеристики P_i , Q_i , θ_i і U_i в різних комбінаціях відомих та пошукових вузлових величин.

4. Експериментальні дослідження показали, що при визначенні потужностей ДРГ в розподільних мережах 10 кВ, найбільш доцільним є рівність напруги величиною 10,5 кВ в місцях приєднання виробників електроенергії, включаючи місце системного живлення.

5. Використання розроблених програмно-розрахункових комплексів в навчальному процесі дає можливість студентам отримати практичні навички для вирішення конкретних

технологічних питань управління електричними мережами енергосистем, набути досвіду в підготовці моделей елементів електричних систем і використанні бази даних для їх збереження, навчитися використовувати діючі програмні засоби моделювання усталених та оптимальних режимів електричних мереж енергосистем, а також виконувати аналіз результатів розрахунків та, в разі необхідності, приймати і реалізовувати правильні рішення. При виконанні бакалаврських і магістерських робіт обов'язковою умовою є проведення розрахунків на фрагментах реальних схем електричних мереж з максимальним наближенням до технології розрахунків і аналізу результатів, які проводяться службами режимів енергосистем і обленерго.

Список використаних джерел

1. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. –189 с.
2. Электрические системы, Т.1. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970.–336 с.
3. Моделирование установившихся режимов электрических систем с использованием алгоритма Краута /Щербина Ю.В., Скрипник А.Н., Гадер О.М. – Изв. Вузов СССР – Энергетика, 1988, №1, с. 10–13.
4. Автоматизация управления технологическим расходом и потреблением электроэнергии /Щербина Ю.В., Лепорский В.Д., Жмурко В.А. – К.: «Техніка», 1984. – 113 с.
5. Кирик В.В. Сенсорний метод пошуку місця встановлення джерела розподіленого генерування / В.В. Кирик, О.С. Губатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 136 – 140.
6. Скрипник А.М. Моделювання оптимальних місця розташування та величини потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації / А.М. Скрипник, Д.П. Кожан // «Енергетика і автоматика». – 2016. – № 4. (30). – С. 185 – 193.
7. Скрипник А.Н. Модификация метода Ньютона и ее использование при расчетах режимов распределительных электрических сетей напряжением до 110 кВ / А.Н. Скрипник, Д.П. Кожан, В.В. Ковалева // «Инновации в сельском хозяйстве». – 2015. – Вып. 4 (14). – С. 14 – 20.
8. Jegadeesan M. Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in Radial Distribution Feeder Using Analytical Approach / M. Jegadeesan, V. Keerthana // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3. – Pp. 358–364.
9. Голуб Б.Л. Методи і засоби створення структури бази даних для підсистеми моніторингу автоматизованих систем керування технологічними процесами / Б.Л. Голуб, В.П. Лисенко, А.О. Дудник // «Енергетика і автоматика». – 2012. – №3 (13). – Електронний ресурс – Режим доступу до журн.: archive.nbuv.gov.ua/e-journals/eia/2012_3/12lvp.pdf.