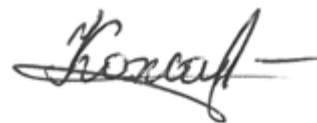


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

КОЖАН ДМИТРО ПЕТРОВИЧ



УДК 621.311

**ОБґРУНТУВАННЯ МІСЦЬ РОЗТАШУВАННЯ ТА ВЕЛИЧИН
ПОТУЖНОСТЕЙ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
ПРИ ТЕРИТОРІАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Скрипник Анатолій Миколайович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Попов Володимир Андрійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри електропостачання

кандидат технічних наук
Бодунов Вадим Миколайович,
Національний університет
«Чернігівська політехніка»,
доцент кафедри електричної інженерії
та інформаційно-вимірювальних технологій

Захист відбудеться «21» вересня 2021 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «19» серпня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку із розвитком розподіленої енергетики в Україні, значна увага приділяється впровадженню джерел генерації електричної енергії, зокрема, – це вітрові, сонячні, малі гідроелектростанції і т. п., які працюють на відновлюваній енергії. За останні роки частка джерел генерації електричної енергії на основі відновлюваних джерел енергії, приєднаних до об'єднаної енергетичної системи України в загальній потужності неухильно зростає, чому і сприяє світова практика підтримки спорудження та розташування установок джерел генерації електричної енергії.

Сьогодні розподільні системи електропостачання в Україні напругою 10 (6) та 35 кВ за технічними та технологічними умовами експлуатуються розімкненими, а системи 110 кВ слабозамкненими або розімкненими, з живленням від системного живлення.

Тенденція щодо впровадження в указаних системах електропостачання джерел генерації електричної енергії, зменшує як витрати основних паливних і водних ресурсів, так і втрати електроенергії в системах електропостачання за рахунок наближення виробників електричної енергії до споживачів та забезпечує чистоту навколишнього середовища. Однак, при не економічно доцільному впровадженні джерел генерації електричної енергії виникає ряд проблемних питань пов'язаних як з режимами напруги в системі електропостачання з джерелами генерації електричної енергії, так і з їх впливом на властивості централізованого системного живлення. Проблемними також є питання щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання та обґрунтованих величин потужностей з урахуванням їх розподілу між живлячими мережу об'єктами. Для вирішення цих питань необхідно провести як аналіз існуючих методів та підходів щодо розташування і визначення потужностей джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання територіально розподіленого навантаження, так і аналіз існуючих методів моделювання (розрахунку) усталених режимів електропостачання.

Питаннями щодо моделювання усталених і експлуатаційних режимів електропостачання та пошуку в них економічно доцільних місць розташування і обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії займаються такі провідні наукові та навчально-наукові центри України як: Інститути електродинаміки, відновлювальної енергетики НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Вінницький національний технічний університет, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київський національний університет технологій та дизайну, Чернігівський національний технологічний університет, Луцький національний технічний університет та ін. Великий внесок в теоретичні основи та розвиток методів підвищення ефективності експлуатаційних режимів електропостачання із джерелами генерації електричної енергії внесли такі вітчизняні вчені як Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, П. Д. Лежнюк, В. В. Козирський,

В. В. Кирик, С. П. Денисюк, В. А. Попов, Ю. І. Тугай, В. М. Бодунов, В. В. Кулик, а також зарубіжні вчені М. Jegadeesan, Nitin Singh, E. Haesen, M. I. Voropay, П. І. Бартоломей та ін. Однак, не дивлячись на великий обсяг досліджень в цьому напрямі, потребують подальшого вирішення питання пов'язані з визначенням економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей різних типів впроваджуваних джерел генерації електричної енергії. Це вимагає нових підходів і методів щодо розрахунку режимів електропостачання з джерелами генерації електричної енергії та оптимального розподілу потужностей між генеруючими об'єктами. Дана робота направлена на вирішення цих питань на прикладі радіальних розподільних систем електропостачання напругою 10–35 кВ в складі територіально розподіленого навантаження з підходом в два етапи: визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії; визначення обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в економічно доцільних місцях їх розташування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертації проведено у Національному університеті біоресурсів і природокористування України відповідно до держбюджетної наукової теми: «Розробка теорії структурно-параметричного синтезу гібридних систем електроживлення та їх інтеграції до розподільних електричних мереж в сільських регіонах» (номер державної реєстрації 0113U003830, 2013–2017 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – розроблення методів визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії для підвищення ефективності функціонування системного живлення територіально розподіленого навантаження.

Для досягнення вказаної мети вирішувалися такі наукові завдання:

– провести аналіз існуючих підходів та методів моделювання (розрахунку) усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження та перспективи впровадження в них джерел генерації електричної енергії;

– удосконалити математичну модель щодо розрахунку усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження з можливістю вибору складу відомих і пошукових вузлових характеристик, як основи з реалізації принципів пошуку економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії та визначення обґрунтованих величин їх потужностей для умов максимального або максимального перспективного споживання електроенергії;

– удосконалити математичну модель щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження;

– розробити алгоритми та виконати програмну реалізацію аналізу роботи територіально розподіленого навантаження згідно розроблених математичних моделей;

– перевірити на достовірність та адекватність розроблені математичні моделі територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії на прикладі базової та реальної схем електропостачання споживачів.

Об'єкт дослідження – режими роботи територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії за умов його системного живлення.

Предмет дослідження – визначення впливу місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії на розподіл питомих транспортних витрат при його територіально розподіленому навантаженні.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертації завдань використано такі методи: метод теорії математичного моделювання, метод теорії графів, метод теорії множин, метод теорії матриць, метод теорії систем, метод теорії нелінійного програмування, а також метод теорії прийняття рішення.

Наукова новизна одержаних результатів. Розвинуто класичний метод Ньютона для розрахунку усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик в напрямі модифікації з розширенням матриці частинних похідних похідними від небалансів активних і реактивних вузлових потужностей, що дало змогу розширити функціональні можливості моделювання усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження і визначення обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії.

Удосконалено математичну модель системи електропостачання територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії в напрямі врахування різнохарактерного їх типу для визначення витрат активної потужності на передачу (транспорт) одиниці активної або реактивної потужності до місця їх споживання, що дало змогу обґрунтувати економічно доцільні місця розташування джерел генерації в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження.

Вперше науково обґрунтовано використання методу питомих транспортних витрат для визначення місць розташування і величин потужностей джерел генерації електричної енергії в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження, який за рахунок математичного урівноваження між вибраними місцями розташування джерел генерації за максимальними значеннями вузлових питомих транспортних витрат, визначеними потужностями джерел генерації відповідно їх типів та величиною зниження втрат активної потужності в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження забезпечує мінімальне значення втрат у порівнянні з втратами у вихідному режимі, а відповідно і мінімальне значення сумарних питомих транспортних витрат в елементах системи, що дало змогу підвищити ефективність електропостачання територіально розподіленого навантаження.

Вперше встановлено взаємозв'язок між місцем розташування і величиною потужностей джерел генерації електричної енергії та навантаженням на основі розробленого підходу, що дало можливість обґрунтувати місця розташування джерел генерації за критерієм максимуму значень вузлових питомих транспортних витрат і мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження при рівності модулів та (або) кутів напруги у вузлах генеруючих об'єктів, включаючи вузол системного живлення.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено методика та програмне забезпечення на алгоритмічній мові C++ для визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в залежності від їх типу, що (як інструмент) дає можливість проводити експериментальні дослідження щодо моделювання процесу впровадження джерел генерації в системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 (6) і 35 кВ.

Одержані в дисертації результати досліджень за розробленою методикою визначення місць розташування та потужностей джерел генерації електричної енергії в залежності від їх типу використовуються у навчальному процесі кафедри електропостачання імені професора В. М. Синькова Національного університету біоресурсів і природокористування України за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при викладанні дисципліни «Електричні мережі і системи» та при підготовці випускних бакалаврських і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дисертації є самостійним науковим дослідженням здобувача. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на: III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (теорія, практика, історія, освіта) (м. Київ, 2015 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Инновации в сельском хозяйстве» (м. Москва, Російська Федерація, 2015 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (теорія, практика, історія, освіта) (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2016 р.); 70-й науково-практичній

конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК» (м. Київ, 2016 р.); науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Підсумки науково-дослідних робіт 2015 року» (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2017 р.); XXVI Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (смт Глеваха, 2018 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 22 наукових працях, з яких монографія, 5 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, стаття в іншому науковому виданні, 3 авторських свідоцтва та 11 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок. Дисертація містить 32 рисунки, 35 таблиць та 7 додатків. Список використаних джерел налічує 173 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми; сформульовано наукове завдання; відзначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та завдання дослідження; визначено об'єкт, предмет і методи дослідження; представлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

У першому розділі «**Система електропостачання територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії**» проведено аналіз структури системи електропостачання територіально розподіленого навантаження з впровадженням джерел генерації, який надає можливість не тільки підвищити ефективність електропостачання і якість електричної енергії споживачів, але і, в перспективі, організувати активне управління їх власним споживанням.

Згідно проведеного аналізу літературних джерел, територіально розподілене навантаження – це радіальні розподільні системи електропостачання напругою 10 (6) та 35 кВ, в які входять лінії електропередавання, трансформаторні підстанції, споживачі електричної енергії та джерела генерації. Зображення такого територіально розподіленого навантаження представлено у вигляді функціональної блок-схеми на рис. 1.



Рис. 1. Функціональна блок-схема системи електропостачання територіально розподіленого навантаження: ЛЕП – лінії електропередавання; ТП – трансформаторні підстанції; ДГ – джерела генерації

На рис. 2. представлено схему електричних з'єднань системи електропостачання територіально розподіленого навантаження. Забезпечення електроенергією споживачів може здійснюватися як від централізованого системного живлення, так і від впроваджених (приєднаних) джерел генерації.

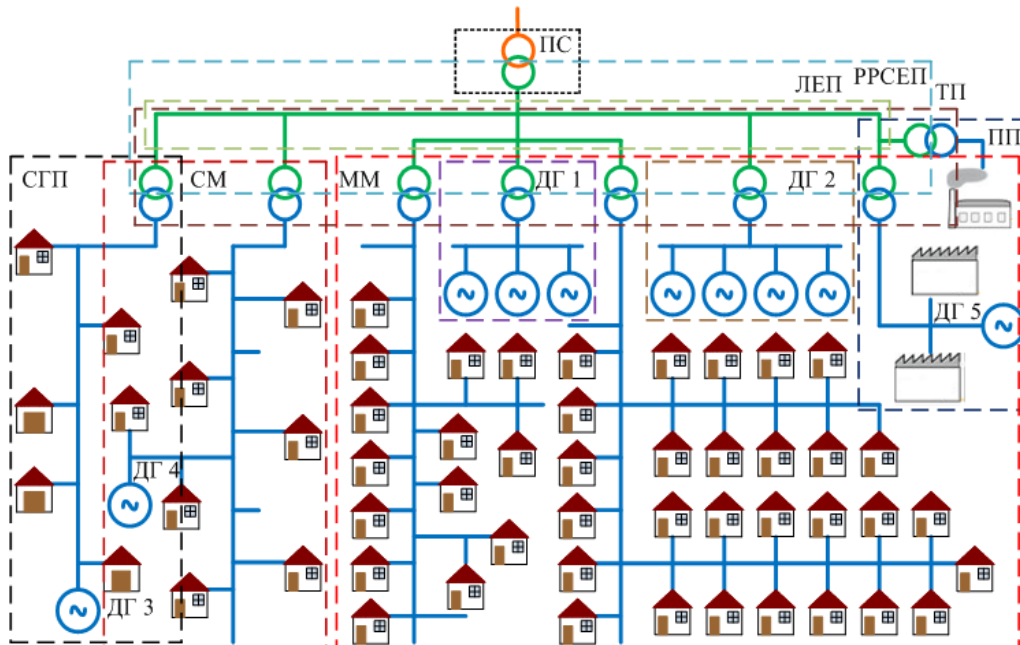


Рис. 2. Схема електричних з'єднань системи електропостачання територіально розподіленого навантаження: ПС – підстанція (110/10 кВ); РРСЕП – радіальні розподільні системи електропостачання напругою 10 кВ; ЛЕП – лінії електропередавання; ТП – трансформаторні підстанції; СГП – сільськогосподарське підприємство; СМ – сільська мережа; ММ – міська мережа; ДГ 1...5 – джерела генерації; ПП – промислові підприємства

Проведений аналіз методів та підходів показав, що досить багато уваги приділяється визначенню економічно доцільних місць розташування та обґрунтуванню величин потужностей джерел генерації, яке призводить до зміни режимних параметрів: рівнів напруг, перетоків по зв'язках, втрат потужності і електричної енергії, струмів короткого замикання як в кращу, так і в гіршу сторону.

Основними параметрами при виборі місця розташування та визначенні потужностей джерел генерації є критерій мінімуму втрат активної потужності та стабілізація рівнів напруги в системі електропостачання.

Характеристики усталених режимів відповідних схем електропостачання є основою для визначення як економічно доцільних місць розташування, так і обґрунтованих величин потужностей впроваджуваних джерел генерації.

З метою моделювання (розрахунків) усталених режимів електропостачання (як нелінійних систем) розроблено цілий ряд математичних ітераційних методів, найбільш поширеними з яких можна вважати наступні: метод накладання струмів, метод Зейделя, класичний метод Ньютона (надалі метод Ньютона) та ін.

Проте, найбільшого поширення набули як метод Ньютона, так і його модифікації. Основною перевагою яких перед іншими методами є не тільки квадратична збіжність ітераційного процесу, а й можливість використання відповідного математичного формулювання в системах реального часу на основі телеметричної інформації.

В загальному суть методу Ньютона полягає в послідовній заміні на кожній ітерації обчислень вихідної нелінійної системи рівнянь деякою лінійною (лінеаризація), розв'язок якої дозволяє визначити чергові наближення пошукових величин. При застосуванні методу Ньютона нелінійна система вузлових рівнянь усталеного режиму може бути записана як у вигляді вузлових потужностей P_i , Q_i , так і у вигляді їх небалансів \mathcal{E}^P_i і \mathcal{E}^Q_i . Система нелінійних рівнянь щодо вузлових небалансів активних і реактивних потужностей без комплексних елементів має вид:

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

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

В загальному вигляді ітераційний процес Ньютона для системи нелінійних рівнянь записується, як:

$$X_i^{(K+1)} = X_i^{(K)} - \Delta X_i^{(K)} = X_i^{(K)} - \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} F(X_i^{(K)}), \quad (2)$$

де K – порядковий номер ітерації; X_i – вектор пошукових величин; ΔX_i – вектор поправок до пошукових величин, який розраховується на кожному кроці ітераційного процесу; $\partial F / \partial X$ – матриця частинних похідних (матриця Якобі) від заданої вектор-функції; $F(X_i)$ – значення вектор-функції.

З орієнтацією на моделювання усталених режимів електропостачання математичне формулювання ітераційного методу Ньютона згідно з (1) і (2) записується у виді:

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K+1)} = \begin{bmatrix} \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_i^P \\ \varepsilon_i^Q \end{bmatrix}^{(K)}. \quad (3)$$

В якості елементів вектора пошукових величин виступають кути та модулі напруги у вузлах θ_i і U_i .

Згідно з (3) поправки $\Delta\theta_i$ та ΔU_i до пошукових величин визначаються на кожній ітерації розв'язанням системи лінійних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_i^P \\ \varepsilon_i^Q \end{bmatrix}, \quad (4)$$

з використанням методів Гауса, подвійної факторизації, алгоритму Краута (LU – факторизація) та ін.

Необхідно відмітити, що матриця частинних похідних згідно (3) і (4) не містить похідних (стовпців і рядків) по відомих вузлових характеристиках, до яких відносяться наперед задані за експлуатаційно-технологічними умовами модуль напруги одного із потужних генеруючих по активній і реактивній потужностях вузлів вибраного в якості балансуєчого вузла, модулі напруги у вузлах за наявності в них джерел реактивної потужності та нульовий кут напруги балансуєчого вузла як координата відліку кутів напруги вузлів розрахункової схеми електропостачання. Відповідно всі пошукові вузлові характеристики (активна і реактивна потужності балансуєчого вузла та реактивні потужності у вузлах схеми за наявності в них відповідних джерел) визначаються згідно додаткових алгоритмів після закінчення ітераційного процесу.

Ітераційний процес методу Ньютона при розрахунку усталеного режиму електропостачання вважається закінченим, коли елементи вектора вузлових небалансів ε_i^P і ε_i^Q стають меншими або рівними наперед заданій величині, яка визначає точність розрахунків.

Аналіз існуючих методів моделювання усталених режимів показав, що моделі їх вузлових характеристик не забезпечують моделювання різних типів джерел генерації щодо визначення обґрунтованих величин їх активних і реактивних потужностей.

У другому розділі «**Модель режиму системи електропостачання з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик**» представлено вирішення завдання щодо визначення обґрунтованих величин потужностей джерел генерації в економічно доцільних місцях їх впровадження і надано можливість розглядати математичні моделі вузлів системи електропостачання у відповідних комбінаціях відомих та пошукових величин як моделі різних типів джерел генерації (з одночасним виробництвом активної і реактивної потужності, з виробництвом тільки активної потужності та з виробництвом тільки реактивної потужності).

Для розширення функціональних можливостей вузлових моделей системи електропостачання з метою моделювання різних типів джерел генерації запропоновано модифікацію математичної моделі методу Ньютона (3) з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик, яка ґрунтується на доповненні матриці частинних похідних похідними по пошукових активних і реактивних потужностях $\partial \varepsilon_i^P / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^P / \partial Q_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial P_i$ і $\partial \varepsilon_i^Q / \partial Q_i$, а вектор поправок до пошукових характеристик доповнюється відповідно поправками ΔP_i і ΔQ_i . Ітераційний процес модифікованого методу Ньютона має вид:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \\ \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K+1)} = \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \\ \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta \theta_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \\ \theta_i \\ U_i \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_i^P \\ \varepsilon_i^Q \end{bmatrix}^{(K)}. \quad (5)$$

Поправки ΔP_i , ΔQ_i , $\Delta \theta_i$ та ΔU_i до пошукових величин (5) визначаються на кожному кроці ітераційного процесу розв'язанням системи лінійних рівнянь:

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

При цьому елементи матриці частинних похідних розраховуються згідно математичних виразів:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial P_j} &= \begin{cases} 1, & \text{при } j=i \\ 0, & \text{при } j \neq i \end{cases} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial Q_j} &= \begin{cases} 0, & \text{при } j=i \\ 0, & \text{при } j \neq i \end{cases} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial P_j} &= \begin{cases} 0, & \text{при } j=i \\ 0, & \text{при } j \neq i \end{cases} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial Q_j} &= \begin{cases} 1, & \text{при } j=i \\ 0, & \text{при } j \neq i \end{cases} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_j} &= \begin{cases} U_i \sum U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)], & j=i \\ -U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)], & j \neq i \end{cases} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_j} &= \begin{cases} 2U_i G_{ii} - \sum U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)], & j=i \\ -U_i [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)], & j \neq i \end{cases} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_j} &= \begin{cases} -\sum U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)], & j=i \\ U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)], & j \neq i \end{cases} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_j} &= \begin{cases} -2U_i B_{ii} - \sum U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)], & j=i \\ -U_i [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)], & j \neq i \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

а елементи вектора вузлових небалансів ε_i^P і ε_i^Q згідно (1).

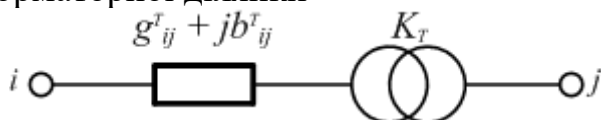
Система лінійних рівнянь (6) розв'язується за допомогою стандартної програми методу найменших квадратів згідно алгоритму Хаусхольдера і розглядається як визначена (кількість відомих характеристик дорівнює кількості пошукових). При цьому всі пошукові активні і реактивні потужності визначаються безпосередньо в ході ітераційного процесу, контроль закінчення якого виконується аналогічно, як і для методу Ньютона – коли елементи

вектора небалансів \mathcal{E}^P_i і \mathcal{E}^Q_i сягають величин менших або рівних наперед заданій величині, яка характеризує точність розрахунків.

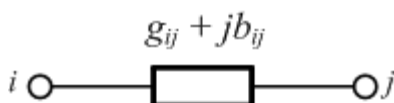
Для спрощення математичних виразів при моделюванні усталених режимів електропостачання запропоновано та реалізовано в модифікованому методі Ньютона приведення моделей трансформаторних ділянок до моделей ліній електропередавання включенням коефіцієнтів трансформації в елементи матриці провідностей (8):

$$g_{ij} + jb_{ij} = K_T (g^T_{ij} + jb^T_{ij}), \quad (8)$$

тобто модель трансформаторної ділянки



приведена до моделі



Це дозволило рівняння (1) та вирази похідних матриці частинних похідних (5) і (6) залишити без зміни їх форми і для трансформаторних ділянок.

Для проведення модельних експериментів з метою підтвердження ефективності використання модифікованого методу Ньютона щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації при впровадженні їх в радіальних розподільних системах електропостачання різного рівня напруги було розроблено відповідний алгоритм та виконано його програмну реалізацію.

Структуру розробленого алгоритму приведено на рис. 3, а його програмну реалізацію виконано з використанням алгоритмічних мов Visual Basic 6.0 та C++.



Рис. 3. Алгоритм розрахунку режиму електропостачання згідно модифікованого методу Ньютона.

У зв'язку з залежністю результатів моделювання величин питомих транспортних витрат і потужностей джерел генерації від результатів моделювання режимів електропостачання згідно запропонованої модифікації методу Ньютона виникає необхідність в підтвердженні достовірності його результатів моделювання. Проведені модельні експерименти з використанням IEEE тестових замкнених схем електропостачання показали, що результати моделювання їх ustalених режимів згідно модифікованого методу Ньютона повністю відповідають тестовим результатам, і можуть використовуватися на рівні існуючих математичних методів моделювання ustalених режимів електропостачання.

У третьому розділі «Математичні моделі для визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 (6) і 35 кВ» представлено вирішення завдання щодо вибору економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 (6) і 35 кВ використанням градієнтних методів, найбільш ефективним з яких виявився градієнтний метод, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати, тобто витрати активної потужності на передачу (транспорт) одиниці активної або реактивної потужності до місця їх споживання.

Математична модель градієнтного методу, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати, згідно модифікованого методу Ньютона (5)–(7), базується на основі лінеаризованої системи рівнянь виду:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^P}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial P_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial Q_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \varepsilon_i^Q}{\partial U_i} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial P_i} \\ \frac{\partial \pi}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \pi}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial \pi}{\partial U_i} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де 1) $[]^T$ – транспонована матриця, отримана в результаті транспонування матриці частинних похідних розрахованої на останній (кінцевій) ітерації при моделюванні ustalеного режиму електропостачання. Елементами транспонованої матриці є частинні похідні від небалансів активної і реактивної потужностей по відповідних пошукових вузлових характеристиках;

2) π – сумарні втрати активної потужності в елементах схеми електропостачання, які визначаються згідно формули:

$$\pi = \sum_{K=1}^m [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}, \quad (10)$$

виведеної на основі виразу повних втрат потужності в системі електропостачання (11):

$$\Delta \dot{S}_{\Sigma} = \sum_{K=1}^m \Delta \dot{S}_{ij} = \sum_{K=1}^m \left(\dot{U}_i - \dot{U}_j \right) \left(U_i^* - U_j^* \right) \dot{Y}_{ij}, \quad (11)$$

рядом перетворень та виділенням окремо складової втрат активної потужності; m – кількість ділянок системи електропостачання;

3) вектор пошукових вузлових питомих транспортних витрат складають: $\partial\pi/\partial P_i$ – витрати активної потужності на транспорт одиниці активної потужності до i -го вузла схеми; $\partial\pi/\partial Q_i$ – витрати активної потужності на транспорт одиниці реактивної потужності до i -го вузла схеми;

4) елементами вектора вільних членів системи рівнянь (9) є: $\partial\pi/\partial\theta_i$ – похідна від сумарних втрат активної потужності в елементах системи електропостачання по куту напруги i -го вузла схеми (12):

$$\frac{\partial\pi}{\partial\theta_i} = \sum_{j=1}^n [2U_i U_j \sin(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}; \quad (12)$$

$\partial\pi/\partial U_i$ – похідна від сумарних втрат активної потужності в елементах системи електропостачання по модулю напруги i -го вузла схеми (13):

$$\frac{\partial\pi}{\partial U_i} = \sum_{j=1}^n [2U_i - 2U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] G_{ij}; \quad (13)$$

n – кількість ділянок системи електропостачання, що примикають до i -го вузла схеми.

Для радіальних розподільних систем електропостачання найбільші значення вузлових питомих транспортних витрат в кожному відгалуженні системи вказують на найбільш економічно доцільні місця розташування відповідно джерел активної і реактивної потужностей.

Аналіз функції сумарних втрат активної потужності в системах електропостачання (10) показує, що для всіх наявних генеруючих об'єктів (включаючи джерело системного живлення) розосереджених в системі електропостачання рівність їх кутів напруги і (або) рівність модулів напруги призводить до відповідної зміни кутів і (або) модулів напруги як у суміжних вузлах, так і у інших вузлах споживання між генеруючими об'єктами. При цьому з урахуванням тісних зв'язків між активними потужностями і кутами та реактивними потужностями і модулями вузлових напруг відбувається перерозподіл потужностями між усіма генеруючими об'єктами із зменшенням значення функції (10).

Вказані функціональні залежності щодо рівності кутів і (або) модулів вузлових напруг генеруючих об'єктів (принцип рівності) можна вважати критерієм мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в системах електропостачання, в тому числі і в радіальних розподільних.

З метою проведення модельних експериментів для підтвердження ефективності використання запропонованих градієнтних методів щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації в розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 (6) і 35 кВ розроблено алгоритм та виконано його програмну реалізацію.

Структуру розробленого алгоритму приведено на рис. 4, а його програмну реалізацію виконано з використанням алгоритмічних мов Visual Basic 6.0 та C++.



Рис. 4. Алгоритм розрахунку елементів вектор-градієнта та елементів вектора вузлових питомих транспортних витрат

З використанням розробленого програмного забезпечення проведено попередній аналіз результатів градієнтного методу у виді вектор-градієнта та градієнтного методу, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати на предмет їх ефективності щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації на основі радіальних розподільних систем електропостачання використаних в розділі 4 дисертації. Аналіз результатів при використанні градієнтного методу у вигляді вектор-градієнта виявив деякі недоліки, які полягали у тому, що визначені місця розташування джерел генерації згідно найбільших значень похідних $\partial \varepsilon_i^P / \partial \theta_i$ і $\partial \varepsilon_i^Q / \partial U_i$ не завжди співпадають з економічно доцільними.

При використанні градієнтного методу, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати такі недоліки відсутні, а тому цей метод рекомендується використовувати для визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації в радіальних розподільних системах електропостачання.

Розроблене програмне забезпечення з використанням схем радіальних розподільних систем електропостачання використане й для визначення величин напруг генеруючих об'єктів та вузла системного живлення щодо принципу їх рівності згідно критерію мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в системі електропостачання.

В радіальних розподільних системах електропостачання при моделюванні їх режимів вузол системного живлення, як правило, відіграє роль балансуєчого з заданими (відомими) модулем напруги і кутом напруги рівним нулю. Тому кути напруги у місцях впровадження джерел активної потужності прирівнюються куту напруги вузла системного живлення.

Для визначення величин модулів напруги вузла системного живлення і впроваджуваних джерел, що генерують реактивну потужність, згідно принципу їх рівності, пропонується аналітично-експериментальний підхід: 1) розраховується усталений режим відповідної схеми електропостачання; 2) на основі результатів розрахунку усталеного режиму розраховуються значення вектора вузлових питомих транспортних витрат для всіх вузлів схеми; 3) вибирається вузол схеми з найбільшим значенням вектора вузлових питомих транспортних витрат по активній потужності; 4) розраховуються ряд режимів електропостачання при постійних значеннях кутів напруги рівних нулю і однакових модулях напруги вибраного вузла та вузла системного живлення із зміною їх в діапазоні від 10 до 11 кВ з кроком 0,2 кВ для системи напругою 10 кВ та в діапазоні від 35 до 38,5 кВ з аналогічним кроком для системи напругою 35 кВ і побудовою у виді графіків зміни повної потужності генерації вибраного вузла S_g та відповідно зміни витрат активної потужності в системі ΔP ; 5) точки перетину побудованих графіків відповідає пошуковий модуль напруги – для систем з рівнем напруги 10 кВ (схеми рис. 7 і 9) вона складає близько 10,5 кВ, рис. 5 відповідно графіки (а) і (б), а для системи з рівнем напруги 35 кВ (схема рис. 10) – близько 36,5 кВ, рис. 5 графік (в).

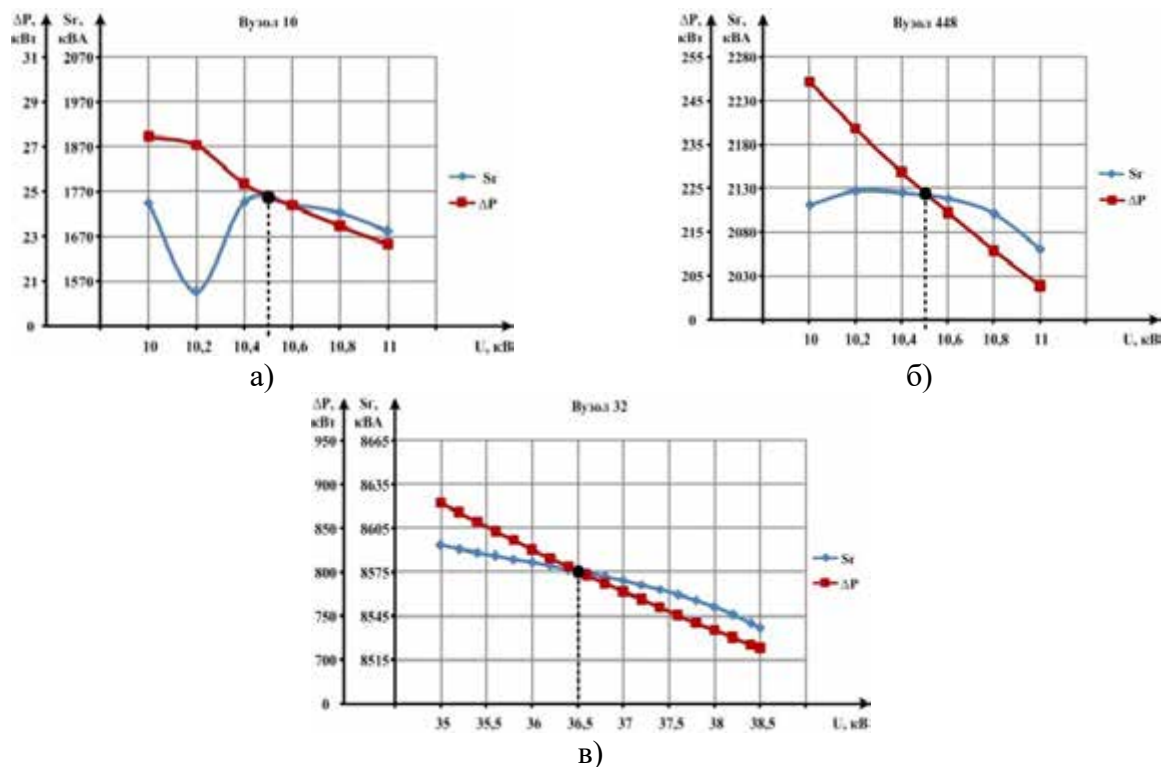


Рис. 5. Графіки визначення величин напруг щодо принципу їх рівності: (а) і (б) згідно схем електропостачання напругою 10 кВ (рис. 7 і 9) та (в) згідно схеми напругою 35 кВ (рис. 10)

Точки перетину приведених графіків вказують не тільки на пошукові величини напруги, а й на величини обґрунтованої видачі джерелами повної потужності, яка в розрахунках розділена на активну і реактивну.

Те, що точки перетину графіків залежності рис. 5 вказують на обґрунтовані величини виробітку відповідними джерелами активної і реактивної потужностей підтверджують результати наступних досліджень, наприклад, з використанням фрагменту схеми електропостачання з рівнем напруги 10 кВ (рис. 7).

1. Модельні експерименти з впровадженням джерела активної потужності:

- встановити у вузлі системного живлення модуль напруги, визначений згідно принципу рівності напруг і кут напруги рівний нулю ($U_2=10,5$ кВ, $\theta_2=0$);
- визначитися з вузлом щодо найбільшої величини вузлових питомих транспортних витрат по активній потужності (вузол 10, $\partial\pi/\partial P_{10}=0,00657$);
- передбачити, що у визначеному вузлі буде впроваджено джерело активної потужності;
- побудувати графік залежності величини втрат активної потужності в системі ΔP від зміни величини генерації P_g активної потужності джерела P_d у вузлі 10, рис. 6 (а);
- згідно рис. 6 (а) точці перетину побудованих графіків відповідають нульовий кут напруги $\theta_{10}=0$ та обґрунтована величина генерації P_g активної потужності джерела P_d (підтвердження принципу рівності кутів вузлових напруг).

2. Модельні експерименти з впровадженням джерела реактивної потужності:

- встановити у вузлі системного живлення модуль напруги, визначений згідно принципу рівності напруг і кут напруги рівний нулю ($U_2=10,5$ кВ, $\theta_2=0$);
- визначитися з вузлом щодо найбільшої величини вузлових питомих транспортних витрат по реактивній потужності (вузол 17, $\partial\pi/\partial Q_{17}=0,01787$);
- передбачити, що у визначеному вузлі буде впроваджено джерело реактивної потужності;
- побудувати графік залежності величини втрат активної потужності в системі ΔP від зміни величини генерації Q_g реактивної потужності джерела Q_d у вузлі 17, рис. 6 (б);
- згідно рис. 6 (б) точці перетину побудованих графіків відповідають модуль напруги рівний модулю напруги заданого у вузлі системного живлення $|U_{17}|=|U_2|$ та обґрунтована величина генерації Q_g реактивної потужності джерела Q_d (підтвердження принципу рівності вузлових напруг).

Проведені модельні експерименти підтверджують, що функціональні залежності щодо рівності величин кутів і модулів вузлових напруг для вузла системного живлення і вузлів, в яких рекомендується впровадження джерел активної і (або) реактивної потужностей є критерієм мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в радіальних розподільних системах електропостачання різного рівня напруги. При цьому, згідно рис. 6, критерієм виступає мінімізація співвідношення між втратами активної потужності

в системі електропостачання і величинами генерації джерел активної і (або) реактивної потужностей.

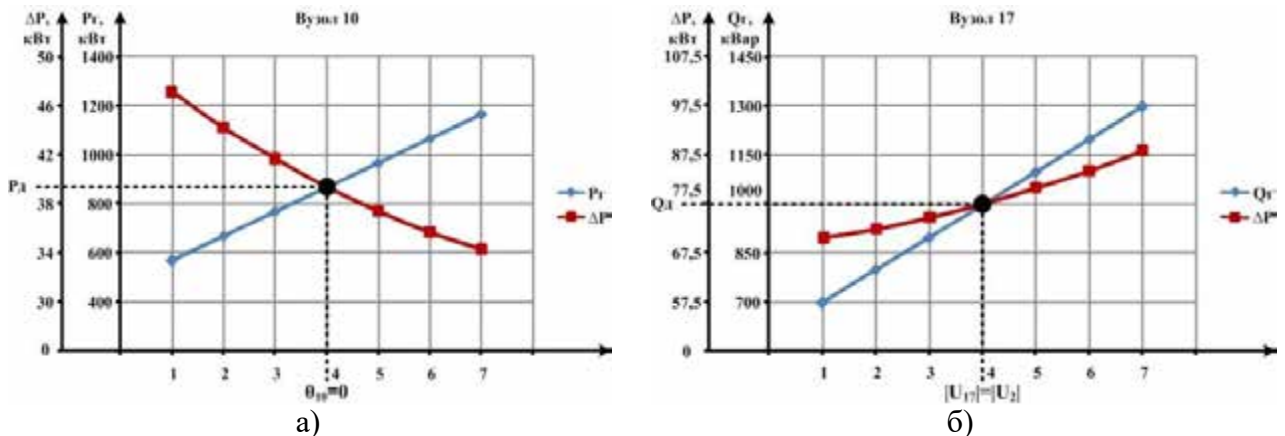


Рис. 6. Графіки залежності величини втрат активної потужності в системі електропостачання від зміни величини генерації: (а) активної потужності і (б) реактивної; 1, 2, 3, ... – порядковий номер зміни потужностей; г – генерація; д – джерело

У четвертому розділі «**Модельні дослідження з визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії та величин їх потужностей**» проведено модельні дослідження щодо підтвердження ефективності визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації за максимальними значеннями вузлових питомих транспортних витрат та обґрунтованих величин потужностей впроваджуваних в економічно доцільних місцях джерел генерації, отриманих згідно математичної моделі режиму електропостачання з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик (моделювання різних типів джерел).

Модельні дослідження виконувалися з використанням базового варіанту (рис. 7) та фрагментів реальних схем (рис. 9 і 10) радіальних розподільних систем електропостачання з урахуванням принципу рівності для всіх впроваджуваних джерел (включаючи вузол системного живлення) кутів вузлових напруг і (або) модулів вузлових напруг як критерію мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в системах електропостачання.

При цьому дослідження поділялися на три види відповідно різних типів джерел: 1) впровадження джерел одночасного виробництва активної і реактивної потужності; 2) впровадження джерел активної і реактивної потужності, як окремо взятих установок; 3) впровадження джерел тільки активної потужності.

Для підтвердження ефективності модельних досліджень щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації, як приклад, використано фрагмент схеми радіальної розподільної системи електропостачання напругою 10 кВ (рис. 7).

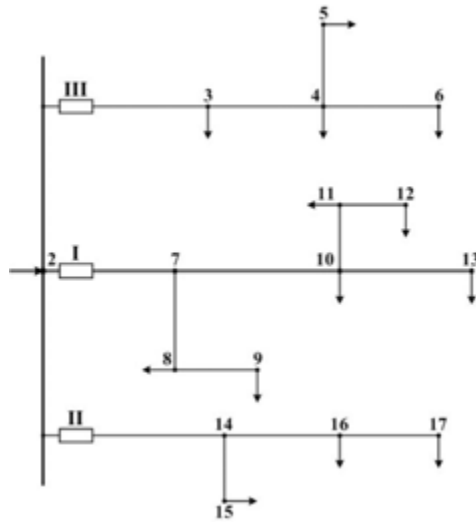
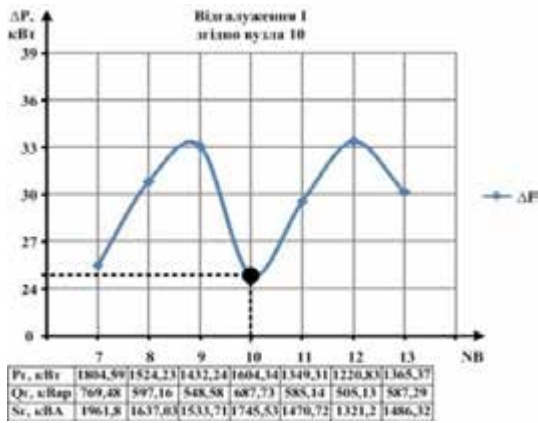


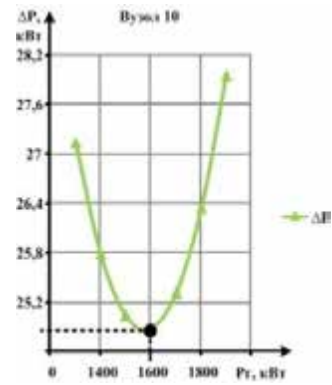
Рис. 7. Фрагмент схеми радіальної розподільної системи електропостачання напругою 10 кВ

Підтвердженням ефективного визначення за максимальними значеннями вузлових питомих транспортних витрат місць розташування джерел генерації у відгалуженні I (вузол 10) та їх величин потужностей є збільшення втрат активної потужності в системі електропостачання при зміні місць розташування джерел генерації рис. 8 (а і є) та при збільшенні або зменшенні величини його активної потужності рис. 8 (б) відносно визначеного. Ефективність розташування джерел активної потужності у вузлі 6 і реактивної у вузлі 5 відгалуження III підтверджується збільшенням втрат активної потужності в системі при меншій потужності джерела генерації або зменшенням але при більшій потужності джерела генерації при зміні відповідно місць розташування джерела генерації (видача тільки активної потужності) відносно вузла 6 рис. 8 (в) та джерела генерації (видача тільки реактивної потужності) відносно вузла 5 рис. 8 (д). Ефективність визначених (обґрунтованих) величин видачі у вузлах 6, 10 і 5 відповідно активних і реактивної потужностей в системі електропостачання підтверджується графіками функціональних залежностей рис. 8 (г, ж і є) щодо вузлів 6, 10 і 5, побудованих по аналогії з функціональними залежностями рис. 6 (а і б), що відповідає мінімізації співвідношення між видачею в систему активної (вузол 6) та реактивної (вузол 5) потужностей впроваджуваних джерел генерації і відповідною величиною втрат активної потужності, якій відповідають мінімальні значення сумарних питомих транспортних витрат в елементах системи електропостачання.

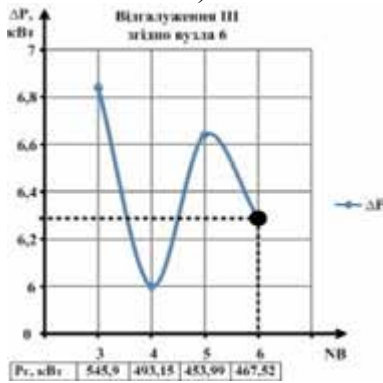
Аналогічні дослідження було проведено як для реальної схеми радіальної розподільної системи електропостачання напругою 10 кВ (рис. 9), так і для фрагменту реальної схеми радіальної розподільної системи електропостачання напругою 35 кВ (рис. 10), які підтвердили ефективність використання даного підходу щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації.



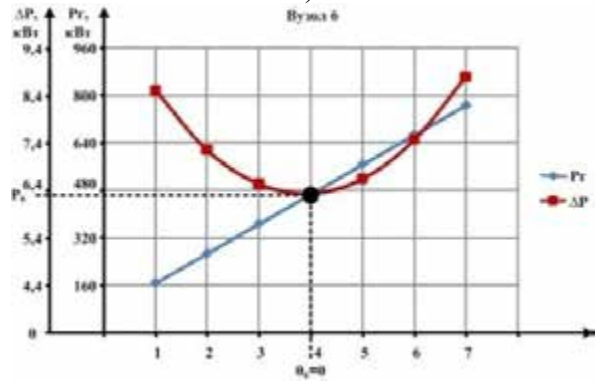
а)



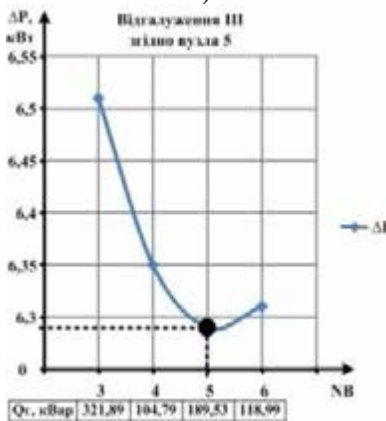
б)



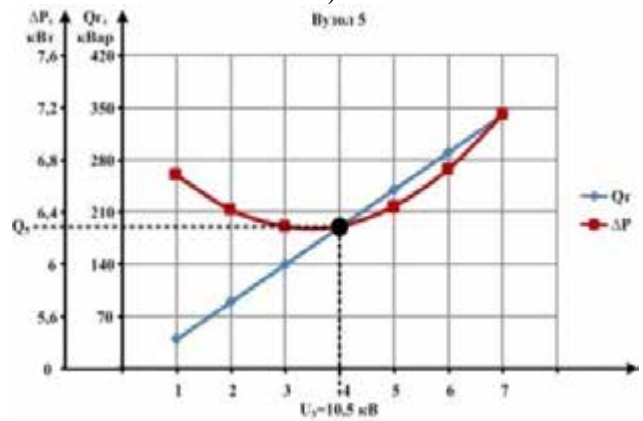
в)



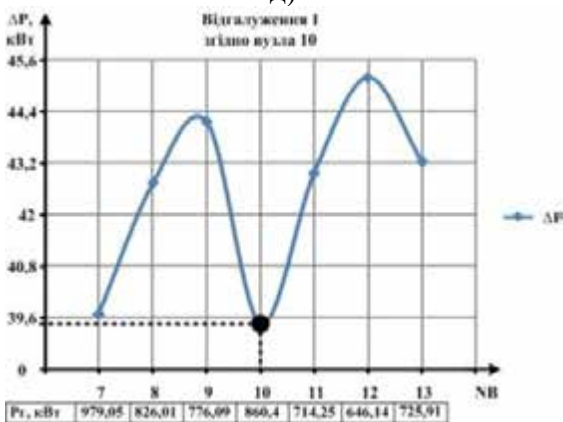
г)



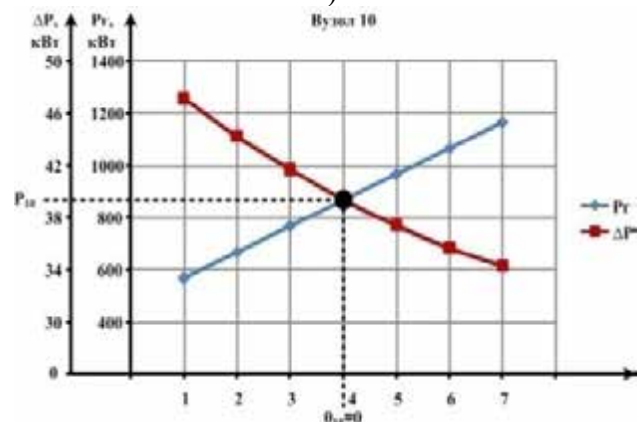
д)



е)



є)



ж)

Рис. 8. Графіки підтвердження щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації та обґрунтованих величин їх активних і реактивних потужностей згідно схеми рис. 7

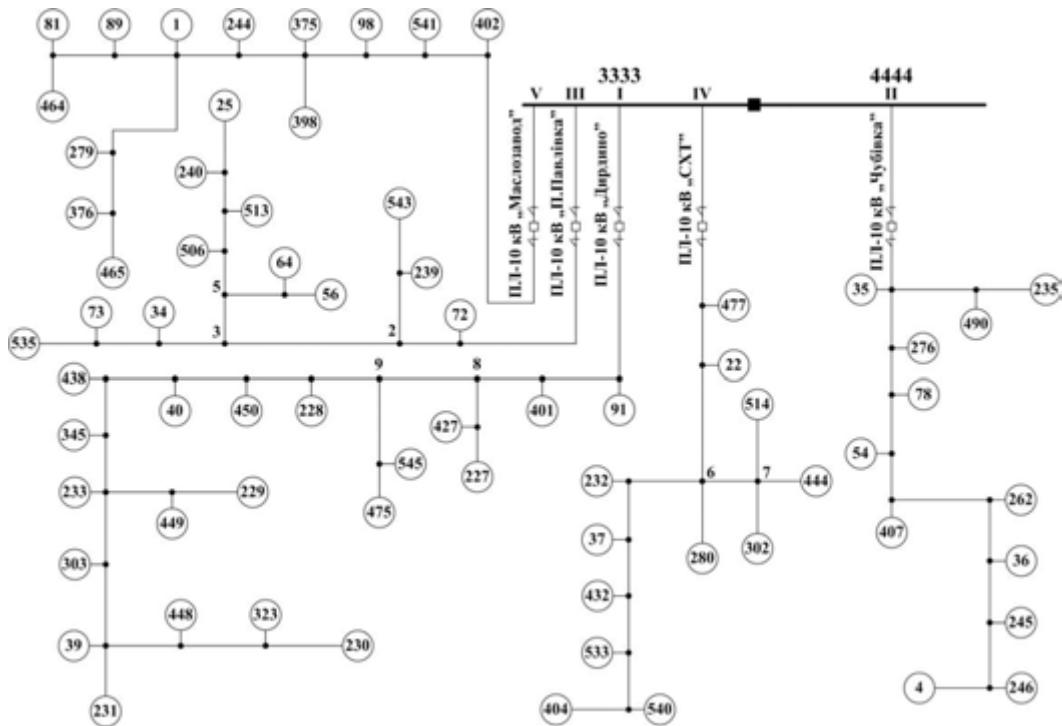


Рис. 9. Реальна схема радіальної розподільної системи електропостачання напругою 10 кВ

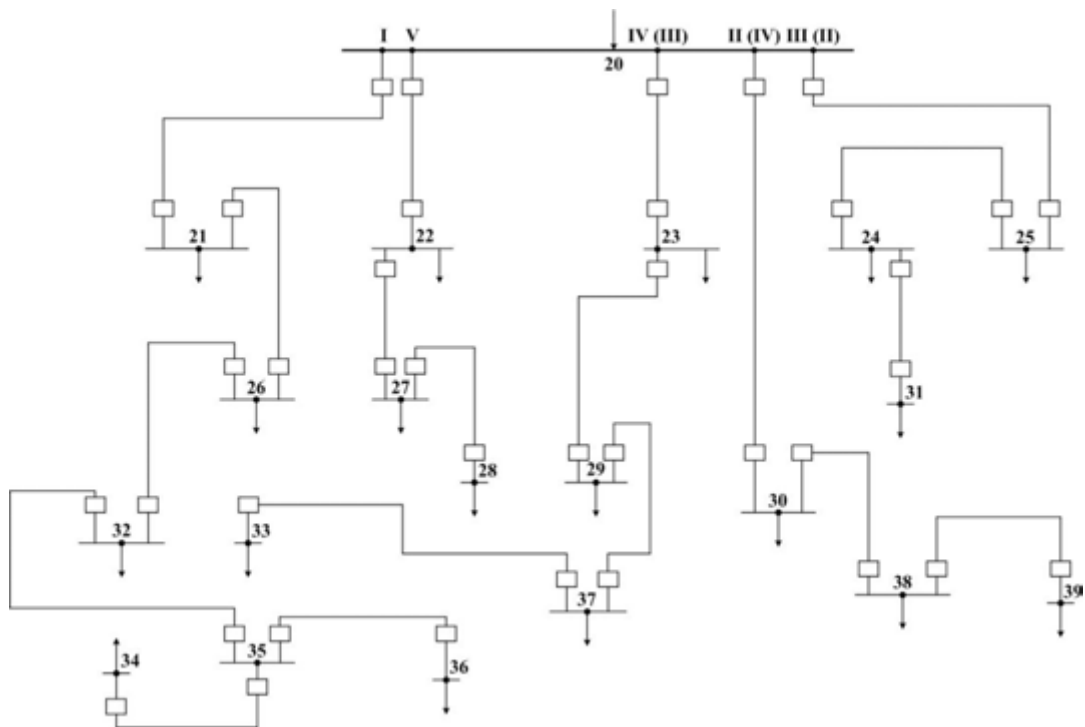


Рис. 10. Фрагмент реальної схеми радіальної розподільної системи електропостачання напругою 35 кВ

Згідно модельних досліджень найбільш ефективним є впровадження джерел генерації, коли вони розташовуються у місцях співпадіння найбільших значень вузлових питомих транспортних витрат по активній і реактивній потужностях і видають в систему електропостачання як активну, так і реактивну потужності, при дотриманні умов принципу рівності.

Вибрані місця розташування джерел генерації за максимальними значеннями вузлових питомих транспортних витрат, визначені величини активних і реактивних потужностей у місцях розташування джерел генерації згідно їх типів та зниження сумарних втрат активної потужності в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження є математично урівноваженими відносно мінімального значення сумарних питомих транспортних витрат в елементах системи. При цьому сумарні втрати активної потужності та сумарна величина питомих транспортних витрат знаходяться в прямій залежності між собою – збільшення або зменшення однієї з цих величин відповідає збільшенню або зменшенню іншої.

Крім того надана ілюстрація імовірності використання запропонованого підходу визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації щодо впровадження їх в замкнених системах електропостачання.

Проведення модельних досліджень виконувалося з використанням розробленого спеціалізованого комплексу технічно-програмного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання, що полягає у розробленні методів визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії для підвищення ефективності функціонування системного живлення територіально розподіленого навантаження.

1. Проведений аналіз щодо підходів та методів моделювання (розрахунку) усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження показав, що одним із проблемних питань є питання визначення місць економічного розташування та обґрунтованих величин активних і реактивних потужностей джерел генерації електричної енергії, а моделі їх вузлових характеристик не забезпечують моделювання різних типів джерел генерації щодо визначення відповідних величин їх потужностей. При цьому характеристики усталених режимів схем електропостачання є основою для визначення як економічно доцільних місць розташування, так і обґрунтованих величин потужностей впроваджуваних джерел генерації електричної енергії.

2. Обґрунтовано використання математичної моделі модифікації методу Ньютона щодо розрахунку усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик, як основи з реалізації принципів пошуку економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії та визначення обґрунтованих величин їх потужностей для умов максимального або максимального перспективного споживання електроенергії в напрямі модифікації з розширенням матриці частинних похідних похідними від небалансів активних і реактивних вузлових потужностей по значеннях величин цих потужностей та доповненням вектора поправок поправками до пошукових потужностей, що дало змогу розширити функціональні

можливості моделювання усталених режимів електропостачання територіально розподіленого навантаження і визначення обґрунтованих величин потужностей різних типів джерел генерації: джерела, які в місцях розташування видають в систему електропостачання одночасно активну і реактивну потужності, тільки активну або тільки реактивну потужності.

3. Удосконалено математичну модель систем електропостачання територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії в напрямі врахування різнохарактерного їх типу для визначення витрат активної потужності на передачу (транспорт) одиниці активної або реактивної потужності до місця їх споживання, що дало змогу обґрунтувати економічно доцільні місця розташування джерел генерації в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження. Основою для формування транспонованої матриці в системі лінійних рівнянь, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати, є матриця частинних похідних, отримана на останній (кінцевій) ітерації моделювання (згідно модифікованого методу Ньютона) усталеного режиму відповідної системи електропостачання. Аналіз виведеного математичного виразу щодо визначення сумарних втрат активної потужності в елементах системи електропостачання показує, що рівність кутів δ_i (або) модулів вузлових напруг у місцях розташування впроваджуваних джерел генерації та вузлі системного живлення (як принцип їх рівності) є критерієм мінімізації втрат активної потужності і стабілізації рівнів напруги в системах електропостачання, в тому числі і в радіальних розподільних.

4. Обґрунтовано використання методу питомих транспортних витрат для визначення місць розташування і величин потужностей джерел генерації електричної енергії в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження, який за рахунок математичного урівноваження між вибраними місцями розташування джерел генерації за максимальними значеннями вузлових питомих транспортних витрат, визначеними потужностями джерел генерації відповідно їх типів та величиною зниження втрат активної потужності в системі електропостачання територіально розподіленого навантаження забезпечує мінімальне значення втрат в порівнянні з втратами у вихідному режимі, а відповідно і мінімальне значення сумарних питомих транспортних витрат в елементах системи, що дало змогу підвищити ефективність електропостачання територіально розподіленого навантаження.

5. Розроблено алгоритми згідно математичних моделей усталеного режиму з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик і градієнтного методу, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати та виконано їх програмну реалізацію у вигляді програмного забезпечення, які дали змогу проводити відповідні модельні дослідження. Крім цього приведено результати усталеного режиму, отримані згідно модифікованого методу Ньютона з використанням IEEE тестових замкнених схем повністю відповідають тестовим результатам.

6. Перевірено на достовірність та адекватність розроблені математичні моделі територіально розподіленого навантаження з джерелами генерації електричної енергії на прикладі базової та реальної схем електропостачання

споживачів, що дало змогу доказати (з урахуванням принципу рівності) ефективність використання запропонованих математичних моделей щодо пошуку місць розташування та визначення величин потужностей різних типів джерел генерації.

7. Основні результати дисертації у вигляді програмного забезпечення на алгоритмічній мові C++ для визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в залежності від їх типу впроваджено у Шепетівському РЕМ Акціонерного товариства «Хмельницькобленерго» (Шепетівський РЕМ АТ «Хмельницькобленерго», м. Шепетівка). Використання цього програмного продукту дало можливість обґрунтувати місця розташування джерел генерації електричної енергії за критерієм максимуму значень вузлових питомих транспортних витрат і мінімізації втрат активної потужності та стабілізації рівнів напруги в системі електропостачання територіального розподіленого навантаження при рівності модулів та (або) кутів напруги у вузлах генеруючих об'єктів, включаючи вузол системного живлення. Використання результатів на фрагментах реальних схем електропостачання показали, що при впровадженні джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання напругою 10 та 35 кВ, найбільш доцільним є рівність напруги величиною близькою 10,5 і 36,5 кВ відповідно в місцях приєднання виробників електроенергії, включаючи місце системного живлення Шепетівського РЕМ АТ «Хмельницькобленерго».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Козирський В. В., Петренко А. В., Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** та ін. Структурно-параметричний синтез гібридних систем електроживлення та їх інтеграція до розподільних електричних мереж в сільських регіонах: монографія. Київ, 2017. 360 с. *(Здобувачем запропоновано простий і достатньо ефективний підхід щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в радіальних розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 кВ, які живляться від системного живлення).*

Статті у наукових фахових виданнях України,

у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

2. Скрипник А. М., Петренко А. В., **Кожан Д. П.** Врахування коефіцієнтів трансформації в елементах матриці провідностей при моделюванні режимів електричних мереж енергосистеми. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194. Ч. 3. С. 238–242. *(Здобувачем запропоновано математичне вирішення включення коефіцієнтів трансформації трансформаторів в елементи матриці провідностей в процесі*

її формування для спрощення розрахунків ітераційного процесу при моделюванні режимів електропостачання).

3. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Моделювання оптимальних місць розташування та величини потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації. Енергетика і автоматика. 2016. № 4 (30). С. 185–193. *(Здобувачем розроблено методику пошуку оптимальних місць розташування та величини потужності джерел генерації електричної енергії в розподільних системах електропостачання напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації).*

4. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах, які живляться від системного електропостачання. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 186. С. 114–118. *(Здобувачем запропоновано простий і достатньо ефективний підхід щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії на прикладі використання реальної схеми радіальної розподільної системи електропостачання територіально розподіленого навантаження, яка живиться від системного живлення).*

5. Скрипник А. М., Голуб Б. Л., **Кожан Д. П.** Моделювання усталених і експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж напругою 10–110 кВ. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2018. № 7. С. 134–145. *(Здобувачем проведено моделювання усталених та експлуатаційних режимів радіальних розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження, визначено економічно доцільні місця розташування та обґрунтовані величини потужностей джерел генерації електричної енергії на прикладі використання базової схеми електропостачання).*

6. Кожан Д. П. Пропозиції щодо визначення місць розташування джерел розподіленої генерації та величин їх потужності в радіальних електричних мережах напругою 35 кВ. Техніка та енергетика. 2019. Вип. 10. № 2. С. 127–133.

Стаття у науковому виданні іншої держави

7. Skrypnuk A., **Kozhan D.** Using nodal specific transportation costs to determine economically beneficial distributed generation source location areas in radial electrical power distribution systems. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97. No. 3. P. 101–105. *(Здобувачем надано пропозицію щодо використання величин вузлових питомих транспортних витрат для визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії з орієнтацією на радіальні розподільні системи електропостачання територіально розподіленого навантаження, що живляться від системного живлення).*

Стаття в іншому науковому виданні

8. Скрипник А. М., Голуб Б. Л., **Кожан Д. П.** Програмна реалізація моделювання усталених і експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж напругою 10–110 кВ. Інформаційні технології в економіці і природокористуванні. 2017. № 2. С. 76–85. *(Здобувачем розроблено комплекс програмного забезпечення, який, крім моделювання усталених та експлуатаційних режимів електропостачання, включає визначення економічно доцільних місць розташування та величин потужностей джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10(6) і 35 кВ).*

Авторські свідоцтва

9. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Авторське свідоцтво № 63037. Врахування коефіцієнтів трансформації в елементах матриці провідностей при моделюванні режимів електричних мереж енергосистеми; № 63430; заявлено 22.10.2015; зареєстровано 21.12.2015. *(Здобувачем розроблено методику щодо включення коефіцієнтів трансформації трансформаторів в елементи матриці провідностей в процесі її формування для спрощення розрахунків ітераційного процесу при моделюванні режимів електропостачання енергосистем).*

10. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Авторське свідоцтво № 67505. Модифікація методу Ньютона та її використання при розрахунках режимів розподільних електричних мереж напругою 110 кВ і нижче; № 68006; заявлено 02.07.2016; зареєстровано 31.08.2016. *(Здобувачем розроблено модифікацію методу Ньютона для моделювання експлуатаційних режимів замкнутих або частково замкнутих розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження при наявності в них джерел генерації електричної енергії).*

11. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Авторське свідоцтво № 75982. Пошук економічно доцільних місць розташування та величин потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах, які живляться від системного електропостачання; № 76751; заявлено 20.11.2017; зареєстровано 16.01.2018. *(Здобувачем розроблено підхід щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії та обґрунтованих величин їх потужностей в радіальних розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження, які живляться від системного живлення).*

Тези наукових доповідей

12. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.**, Ковальова В. В. Модифікація методу Ньютона та її використання при розрахунках режимів розподільних електричних мереж (110 кВ і нижче). Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 28–31 жовтня 2015 року: тези доповіді. Київ, 2015. С. 248–250. *(Здобувачем запропоновано модифікацію методу Ньютона для моделювання режимів радіальних розподільних систем електропостачання)*

територіально розподіленого навантаження при впровадженні в них джерел генерації електричної енергії).

13. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.**, Ковальова В. В. Моделювання режимів розподільних електричних мереж за наявністю в мережах 6–10 кВ джерел розподіленої генерації. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 14–18 грудня 2015 року: тези доповіді. Київ, 2015. С. 63–65. *(Здобувачем запропоновано модифікацію методу Ньютона для моделювання експлуатаційних режимів розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 кВ при наявності в них джерел генерації електричної енергії).*

14. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.**, Ковальова В. В. Врахування коефіцієнтів трансформації в елементах матриці провідностей при моделюванні режимів електричних мереж енергосистеми. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 17–18 грудня 2015 року: тези доповіді. Київ, 2015. С. 10–11. *(Здобувачем запропоновано математичне вирішення включення коефіцієнтів трансформації трансформаторів в елементи матриці провідностей в процесі її формування для спрощення розрахунків ітераційного процесу при моделюванні режимів електропостачання енергосистем).*

15. Скрипник А. Н., **Кожан Д. П.**, Ковалева В. В. Модифікація методу Ньютона и ее использование при расчетах режимов распределительных электрических сетей напряжением до 110 кВ. Инновации в сельском хозяйстве: VI Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, г. Москва, Российская Федерация, 15–16 декабря 2015 года: тезисы доклада. Москва, 2015. Вып. 4 (14). С. 14–20. *(Здобувачем запропоновано модифікацію методу Ньютона для моделювання експлуатаційних режимів розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження при наявності в них джерел генерації електричної енергії).*

16. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Реалізація модифікованого методу Ньютона розрахунку експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж для використання студентами в курсовому та дипломному проектуванні. Підсумки науково-дослідних робіт 2015 року: науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–21 квітня 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 57. *(Здобувачем реалізовано модифікацію методу Ньютона для розрахунку експлуатаційних режимів розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження при впровадженні в них джерел генерації електричної енергії).*

17. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.**, Барабаш О. О., Ковальова В. В. Розробка методики моделювання оптимального розташування ДРГ в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ. Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи

в АПК: 70-а науково-практична конференція студентів, м. Київ, 20–21 квітня 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 58. *(Здобувачем розроблено методику моделювання оптимального розташування джерел генерації електричної енергії та величини їх потужності в розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 кВ).*

18. Кожан Д. П. Пропозиції щодо методики оптимального розміщення джерел розподіленої генерації та його потужності в розподільній електричній мережі. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природо-користування (теорія, практика, історія, освіта): Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 14–18 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 51–53.

19. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.** Моделювання оптимального місця розташування джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21–22 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 133–134. *(Здобувачем запропоновано пропозиції щодо розроблення математичної моделі пошуку оптимальних місць розташування та величини потужності джерел генерації електричної енергії в розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 кВ, що перебувають в умовах експлуатації).*

20. Скрипник А. М., **Кожан Д. П.**, Віхоть Б. М. Визначення оптимального місця розташування джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 20–21 листопада 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 20–21. *(Здобувачем запропоновано пропозиції щодо розроблення методики пошуку оптимальних місць розташування джерел генерації електричної енергії та величини їх активної і реактивної потужностей в розподільних системах електропостачання територіально розподіленого навантаження напругою 10 кВ, що знаходяться в експлуатації).*

21. Скрипник А. М., Голуб Б. Л., **Кожан Д. П.** Моделювання усталених і експлуатаційних режимів розподільних електричних мереж напругою 10–110 кВ. Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві: XXVI Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха, 4–5 липня 2018 року: тези доповіді. Глеваха, 2018. С. 76–78. *(Здобувачем на основі розробленого комплексу програмного забезпечення проведено моделювання усталених та експлуатаційних режимів радіальних розподільних систем електропостачання територіально розподіленого навантаження, визначено економічно доцільні місця розташування та обґрунтовані величини потужностей джерел генерації електричної енергії на прикладі використання базової схеми електропостачання).*

22. Кожан Д. П. Пропозиції щодо визначення місць розташування джерел розподіленої генерації та величин їх потужності в радіальних електричних мережах напругою 35 кВ. Проблеми та перспективи розвитку енергетики,

електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 57–60.

АНОТАЦІЯ

Кожан Д. П. Обґрунтування місць розташування та величин потужностей джерел генерації електричної енергії при територіально розподіленому навантаженні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

У дисертації для вирішення питання щодо визначення економічно доцільних місць розташування та обґрунтованих величин потужностей різних типів впроваджуваних джерел генерації електричної енергії на прикладі радіальних розподільних систем електропостачання напругою 10–35 кВ в складі територіально розподіленого навантаження, пропонується простий і достатньо ефективний підхід в два етапи: вибір економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії; визначення обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в економічно доцільних місцях їх розташування.

При цьому, для визначення обґрунтованих величин потужностей джерел генерації електричної енергії в економічно доцільних місцях їх розташування згідно математичної моделі усталених режимів електропостачання, пропонується до використання модифіковану математичну модель методу Ньютона з вибором складу відомих та пошукових вузлових характеристик, яка ґрунтується на доповненні матриці частинних похідних похідними по пошукових активних і реактивних потужностях: $\partial \varepsilon_i^P / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^P / \partial Q_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial Q_i$. Розроблені алгоритм і програмна реалізація модифікованого методу Ньютона надають можливість на основі моделювання показати ефективність використання відповідної математичної моделі при визначенні величин активних і реактивних потужностей впроваджуваних джерел генерації електричної енергії в системі електропостачання різного рівня напруги.

Для визначення економічно доцільних місць розташування джерел генерації електричної енергії в радіальних розподільних системах електропостачання запропоновано використання градієнтних методів, найбільш ефективним з яких виявився градієнтний метод, що реалізує вузлові питомі транспортні витрати, тобто витрати активної потужності на передачу (транспорт) одиниці активної або реактивної потужності до місця їх споживання. Найбільші значення вузлових питомих транспортних витрат вказують на економічно доцільні місця розташування відповідних типів джерел генерації електричної енергії. Розроблено алгоритм розрахунку елементів вектор-градієнта і елементів вектора вузлових питомих транспортних витрат та виконано його програмну реалізацію для проведення модельних експериментів з метою підтвердження ефективності використання питомих транспортних витрат щодо визначення економічно доцільних місць розташування джерел

генерації електричної енергії в системах електропостачання. Згідно модельних досліджень найбільш ефективним є впровадження джерел генерації електричної енергії, коли вони розташовуються у місцях співпадіння найбільших значень вузлових питомих транспортних витрат по активній і реактивній потужностях і видають в систему електропостачання як активну, так і реактивну потужності, при дотриманні умов принципу рівності.

Проведення модельних досліджень виконувалося з використанням розробленого спеціалізованого комплексу технічно-програмного забезпечення.

Ключові слова: радіальна розподільна система електропостачання, територіально розподілене навантаження, системне живлення, джерела генерації електричної енергії, відновлювані джерела енергії, градієнтний метод, вектор-градієнт, питомі транспортні витрати, втрати активної потужності.

АННОТАЦИЯ

Кожан Д. П. Обоснование мест расположения и величин мощностей источников генерации электрической энергии при территориально распределенной нагрузке. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи, заключающейся в определении экономически целесообразных мест расположения и обоснованных величин мощностей внедряемых источников генерации электрической энергии.

Для решения в данной работе вопроса относительно определения экономически целесообразных мест расположения и обоснованных величин мощностей различных типов внедряемых источников генерации электрической энергии на примере радиальных распределительных систем электроснабжения напряжением 10–35 кВ в составе территориально распределенной нагрузки, предлагается простой и достаточно эффективный подход в два этапа: выбор экономически целесообразных мест расположения источников генерации электрической энергии; определение обоснованных величин мощностей источников генерации электрической энергии в экономически целесообразных местах их расположения.

При этом для определения обоснованных величин мощностей источников генерации электрической энергии в экономически целесообразных местах их расположения согласно математической модели установившихся режимов электроснабжения предлагается к использованию модифицированную математическую модель метода Ньютона с выбором состава известных и поисковых узловых характеристик, которая основывается на дополнении матрицы частных производных производными по поисковым активным и реактивным мощностям: $\partial \varepsilon_i^P / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^P / \partial Q_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial Q_i$. Разработанные алгоритм и программная реализация модифицированного метода Ньютона

предоставляют возможность на основе моделирования показать эффективность использования соответствующей математической модели при определении величин активных и реактивных мощностей внедряемых источников генерации электрической энергии в системе электроснабжения различного уровня напряжения.

Для определения экономически целесообразных мест расположения источников генерации электрической энергии в радиальных распределительных системах электроснабжения предложено использование градиентных методов, наиболее эффективным из которых оказался градиентный метод, что реализует узловые удельные транспортные расходы, то есть расходы активной мощности на передачу (транспорт) единицы активной или реактивной мощности к месту их потребления. Наибольшие значения узловых удельных транспортных расходов указывают на экономически целесообразные места расположения соответствующих типов источников генерации электрической энергии. Разработанный алгоритм расчета элементов вектор-градиента и элементов вектора узловых удельных транспортных расходов и выполнена его программная реализация для проведения модельных экспериментов с целью подтверждения эффективности использования удельных транспортных расходов относительно определения экономически целесообразных мест расположения источников генерации электрической энергии в системах электроснабжения.

Проведенные модельные эксперименты подтверждают, что функциональные зависимости относительно равенства величин углов и модулей узловых напряжений для узла системного питания и узлов в которых рекомендуется внедрение источников активной и (или) реактивной мощностей, является критерием минимизации потерь активной мощности и стабилизации уровней напряжения в радиальных распределительных системах электроснабжения различного уровня напряжения. При этом критерием выступает минимизация соотношения между потерями активной мощности в системе электроснабжения и величинами генерации источников активной и (или) реактивной мощностей.

Также проведены модельные исследования относительно подтверждения эффективности определения экономически целесообразных мест расположения источников генерации электрической энергии за максимальными значениями узловых удельных транспортных расходов и обоснованных величин мощностей внедряемых в экономически целесообразных местах источников генерации электрической энергии полученных согласно математической модели режима электроснабжения с выбором состава известных и поисковых узловых характеристик (моделирование различных типов источников).

Эффективность (экономическая целесообразность) определенных по максимальным значениям узловых удельных транспортных расходов мест расположения источников генерации электрической энергии согласно соответствующего ответвления в радиальных распределительных системах электроснабжения подтверждается изменением мест расположения источников относительно определенных согласно соотношений – с одной стороны

увеличение потерь активной мощности в системе электроснабжения соответствует меньшей мощности источника, а с другой – уменьшение потерь соответствует большей мощности источника. Эффективность (обоснованность) определенных величин мощностей источников генерации электрической энергии внедряемых в экономически целесообразных местах ответвлений системы электроснабжения подтверждается согласно алгоритму по минимизации соотношения между мощностями источников и величиной потерь активной мощности, которой соответствуют минимальные значения суммарных удельных транспортных расходов в элементах системы электроснабжения.

Согласно модельным исследованиям наиболее эффективным является внедрение источников генерации электрической энергии, когда они располагаются в местах совпадения наибольших значений узловых удельных транспортных расходов по активной и реактивной мощностям и выдают в систему электроснабжения как активную, так и реактивную мощности, при соблюдении условий принципа равенства.

Проведение модельных исследований выполнялось с использованием разработанного специализированного комплекса технико-программного обеспечения.

Ключевые слова: радиальная распределительная система электроснабжения, территориально распределенная нагрузка, системное питание, источники генерации электрической энергии, возобновляемые источники энергии, градиентный метод, вектор-градиент, удельные транспортные расходы, потери активной мощности.

ANNOTATION

Kozhan D. P. Substantiation of Locations and Values of Capacities of Sources of Generation of Electric Energy at Territorially Distributed Loading. – The Manuscript.

Thesis for scientific degree of Candidate in Technical sciences, specialty 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

In the dissertation work to solve the problem of determining economically feasible locations and reasonable values of different types of implemented sources of electricity generation on the example of radial distribution systems of 10–35 kV as part of a territorially distributed load, a simple and efficient approach is proposed in two stages: selection of economically feasible locations of sources of electricity generation; determination of reasonable values of capacities of sources of generation of electric energy in economically expedient places of their location.

In this case, to determine the reasonable values of power generation in economically feasible locations according to the mathematical model of steady-state power supply modes, a modified mathematical model of Newton's method with the choice of known and exploratory nodal characteristics based on supplementing the matrix of partial derivatives is proposed active and reactive powers: $\partial \varepsilon_i^P / \partial P_i$,

$\partial \varepsilon_i^P / \partial Q_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial P_i$, $\partial \varepsilon_i^Q / \partial Q_i$. The developed algorithm and software implementation of the modified Newton's method provide an opportunity based on modeling to show the efficiency of using the appropriate mathematical model in determining the values of active and reactive power of the implemented power generation sources in the power supply system of different voltage levels.

To determine the economically feasible locations of power generation sources in radial power distribution systems, the use of gradient methods is proposed, the most effective of which was the gradient method, which implements nodal specific transport costs, ie the cost of active power to transmit (transport) units of active or reactive power their consumption. The highest values of nodal specific transport costs indicate economically feasible locations of the respective types of sources of electricity generation. An algorithm for calculating vector-gradient elements and vector elements of nodal specific transport costs has been developed and its software implementation for model experiments to confirm the efficiency of using specific transport costs to determine economically feasible locations of electricity generation sources in power supply systems. According to model studies, the most effective is the introduction of sources of electricity generation, when they are located at the coincidence of the largest values of nodal specific transport costs for active and reactive power and give into the power supply system both active and reactive power, subject to equality.

Carrying out of model researches was carried out with use of the developed specialized complex of the technical software.

Key words: radial distribution system of power supply, territorially distributed load, system power supply, sources of electrical energy generation, renewable energy sources, gradient method, vector-gradient, specific transportation costs, active power losses.

Підписано до друку 10.08.21
Ум. друк. арк. 2,0
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Зам. № 210578

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55