

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

В.А.Баженов

МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМ

**Методи оптимізації розвитку електричних мереж
енергосистем**

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступенів бакалавра та магістра за
спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент

Чумак Вадим Володимирович, канд. техн. наук

Відповідальний
редактор

Кацадзе Т. Л., канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 26. 05.2022р.)*

*за поданням Вченої ради факультету електроенергетичної та автоматики
(протокол № 8 від 29 березня.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методи оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем

Навчальний посібник

Моделі оптимального розвитку енергосистем: Методи оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем. Навчальний посібник. [Електронний ресурс] для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. А. Баженов. – Електронні текстові дані (1 файл: 462 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 38 с.

Посібник містить теоретичні відомості з дисципліни «Моделі оптимального розвитку енергосистем», завдання та приклади до застосування моделей та методів оптимізації розвитку для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Розглянутий зміст навчального матеріалу, постановка задачі, моделі та методи оптимізації розвитку електричних мереж

© В. А. Баженов, 2022

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

Зміст

ВСТУП.....	4
1.ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ДИСЦИПЛІНИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ПО ЇЇ ВИВЧЕННЮ.....	5
1.1 Загальні положення.....	5
1.2. Зміст навчального матеріалу.....	6
1.2.1. Постановка задачі оптимізації розвитку електричних мереж.....	10
1.2.2. Функції оптимальних витрат для ліній електропередачі та трансформаторів.....	12
1.2.3. Метод впорядкованого виключення гілок.....	17
1.2.4. Метод поконтурної оптимізації.....	22
1.2.5. Застосування методу динамічного програмування для оптимізації розвитку мереж енергосистем.....	27
1.2.6. Метод гілок і границь.....	30
2. ТЕМАТИКА ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....	35
3. ІНДИВІДУАЛЬНІ СЕМЕСТРОВІ ЗАВДАННЯ.....	35
4. НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	36

ВСТУП

Підвищення ефективності виробництва і якості продукції здійснюється на основі удосконалювання структури паливно-енергетичного балансу, впровадження нових генеруючих потужностей, комплексного рішення питань енергопостачання споживачів, зниження питомої витрати палива, зменшення втрат електричної енергії й ефективного регулювання режимів роботи електричних систем.

Для рішення цих задач важливе значення набувають питання оптимізації проектних і експлуатаційних рішень в енергетиці на основі застосування персональних обчислювальних машин. Дисципліна "Моделі оптимального розвитку енергосистем" відноситься до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки.

Вивчення дисципліни базується на знаннях, отриманих студентами при вивченні таких дисциплін, як "Математичний аналіз", "Теоретичні основи електротехніки", "Математичні задачі енергетики", "Електричні системи і мережі" та ін.

Метою дисципліни "Моделі оптимального розвитку енергосистем" є придбання знань в області теорії великих систем, системного аналізу, економіко-математичних моделей і ознайомлення з основами застосування математичних методів для рішення задач оптимізації розвитку електроенергетичних систем. Основна увага присвячена питанням оптимізації структури генеруючих потужностей, оптимізації розвитку електростанцій і оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем.

У задачі дисципліни входить вивчення і придбання навичок практичного використання методів техніко-економічних розрахунків в енергетиці, системного підходу до рішення задач розвитку енергосистем, методів оптимізації.

Після вивчення дисципліни студент повинний уміти:

Сформулювати задачу, поняття і визначення оптимального планування розвитку енергосистем. Записати загальний критерій оптимальності розвитку економіки держави. На основі даних про розвиток енергетики, прогнозу умов розвитку визначити основні критерії оптимізації, сформулювати задачу і методи многокритеріальної оптимізації розвитку енергосистем.

На основі статистичних даних виділити етапи рішення і вирішити задачу прогнозування навантажень і електроспоживання в цілому по мережі, а також по окремим вузлам системи.

На основі статистичних даних виділити етапи рішення і вирішити задачу прогнозування навантажень і електроспоживання в цілому по мережі, а також по окремим вузлам системи.

На основі даних про економічні і технічні характеристики можливих типів електростанцій, що споруджуються, існуючої схеми енергосистеми, інформації про характеристики ліній електропередачі, характеристики, можливих до використання, енергоресурсів виконати оптимізацію структури генеруючих потужностей Єдиної енергосистеми: сформулювати цільову

функцію й обмеження лінійної моделі оптимізації, вирішити задачу за допомогою симплекс-методу.

На основі даних про економічні і технічні характеристики можливих типів електростанцій, що споруджуються, існуючої схеми енергосистеми, інформації про характеристики ліній електропередачі, характеристиках можливих до використання енергоресурсів вирішити задачу оптимізації розміщення і вибору потужності теплових електростанцій. При цьому задача вирішується в статичній і динамічній постановці, для рішення використовуються методи лінійного і динамічного програмування.

На основі даних про рівні навантажень електричної мережі на різних етапах її розвитку; розрахунковій схемі електричної мережі, технічних і економічних характеристиках вирішити задачу оптимізації розвитку електричної мережі. Визначити економічні інтервали, побудувати й апроксимувати функції оптимальних витрат для ліній електропередачі і трансформаторів. Записати цільову функцію й обмеження моделі мережі. Для рішення застосувати математичні методи лінійного, нелінійного і математичного програмування.

1.ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ДИСЦИПЛІНИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ПО ЇЇ ВИВЧЕННЮ

1.1. Загальні положення

Метою дисципліни "Моделі оптимального розвитку енергосистем" є придбання знань в області теорії великих систем, системного аналізу, економіко-математичних моделей і ознайомлення з основами застосування математичних методів для рішення задач оптимізації розвитку електроенергетичних систем. Основна увага присвячена питанням оптимізації структури генерувальних потужностей, оптимізації розвитку електростанцій і оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем.

У задачі дисципліни входить вивчення і придбання навичок практичного використання методів техніко-економічних розрахунків в енергетиці, системного підходу до рішення задач розвитку енергосистем, методів оптимізації.

Після вивчення дисципліни студент повинний уміти:

Сформулювати задачу, поняття й визначення оптимального планування розвитку енергосистем. Записати загальний критерій оптимальності розвитку економіки держави. На основі даних про розвиток енергетики, прогнозу умов розвитку, визначити основні критерії оптимізації, сформулювати задачу й методи многокритеріальної оптимізації розвитку енергосистем.

На основі статистичних даних виділити етапи рішення і вирішити задачу прогнозування навантажень і електроспоживання в цілому по мережі, а також по окремим вузлам системи.

На основі даних про економічні й технічні характеристики можливих типів електростанцій, що споруджуються, існуючої схеми енергосистеми

інформації про характеристики ліній електропередачі, характеристики, можливих до використання, енергоресурсів виконати оптимізацію структури генерувальних потужностей Єдиної енергосистеми: сформулювати цільову функцію й обмеження лінійної моделі оптимізації, вирішити задачу за допомогою симплекс-методу.

На основі даних про економічні і технічні характеристики можливих типів електростанцій, що споруджуються, існуючої схеми енергосистеми, характеристики можливих до використання енергоресурсів вирішити задачу оптимізації розміщення й вибору потужності теплових електростанцій. При цьому задача вирішується в статичній і динамічній постановці, для рішення використовуються методи лінійного й динамічного програмування.

На основі даних про рівні навантажень електричної мережі на різних етапах її розвитку; розрахункову схему електричної мережі, технічні і економічні характеристики обладнання вирішити задачу оптимізації розвитку електричної мережі. Визначити економічні інтервали, побудувати функції оптимальних витрат для ліній електропередачі й трансформаторів. Записати цільову функцію й обмеження моделі мережі енергосистеми. Для рішення застосувати математичні методи лінійного, нелінійного і динамічного програмування.

1.2. Зміст навчального матеріалу

Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМ.

Тема 1.1. Електроенергетичні системи України. Розвиток і функціонування.

Роль методів оптимального планування і проектування в задачах розвитку економіки країни. Електроенергетичні системи (ЕЕС). Особливості енергосистем. Розвиток енергетики країн колишнього СРСР. Електроенергетика України. Структура енергосистем. Основні відомості про виробництво, розподіл і споживання електроенергії в енергосистемах України. Характеристика паливно-енергетичного комплексу країни. Принципи формування єдиної енергетичної системи України. Ієрархічна структура електроенергетики країни. Характеристика задач оптимізації розвитку ЕЕС.

Тенденції розвитку енергетики. Організація керування розвитком електроенергетичних систем України. Особливості розвитку енергосистем: прогнозування навантажень і електроспоживання ЕЕС і енерговузлів, оптимізації розміщення і вибору потужностей електростанцій і оптимізації схем розвитку електричних мереж.

Методичні вказівки

При вивченні даного матеріалу варто звернути увагу на сутність методів оптимального планування, складові частини рішення, математичні методи вирішення задач функціонування й розвитку економіки держави, основні групи задач оптимізації розвитку.

Тема 1.2. Системний підхід.

Загальні поняття про системний підхід і великі системи. Загальний критерій оптимальності розвитку економіки держави. Основні принципи системного підходу. Велика система і її найбільш істотні сторони і властивості.

Ієрархія і відносна відособленість систем. Передумови використання ієрархічної побудови систем. Великі розміри системи, Різномасштабність параметрів і похибок інформації. Принцип рівноточності. Територіальна і функціональна ієрархія систем. "Горизонтальні" і "вертикальні", прямі і зворотні зв'язки. Формальні умови допустимості відособленої оптимізації системи.

Методичні вказівки

При вивченні розглянутої теми варто звернути увагу на визначення найбільш важливих понять проблеми оптимізації розвитку енергосистем, основні властивості й необхідність ієрархічної побудови великих систем.

Тема 1.3. Критерій оптимальності розвитку електроенергетичних систем.

Критерій економічності. Постановка задачі порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень. Урахування обмеженості капіталовкладень. Прогнози умов тотожності ефекту і вибір розрахункових термінів. Узгодженість умов функцій локальної системи й економіки країни. Урахування чинника часу. Економічний критерій статичної системи. Об'єктивно обумовлені оцінки. Економічний критерій для динамічної системи на основі нормативних коефіцієнтів. Урахування чинника часу за допомогою нормативу E_n . Урахування чинника часу за допомогою нормативного коефіцієнта приведення E_{np} . Економічний критерій на основі двохресурсної функції національного доходу. Формули приведених витрат для статичної і динамічної системи.

Урахування багатокритеріальності розвитку системи. Приватні критерії як виразники окремих властивостей загального критерію оптимальності.

Оптимальні плани для сукупності приватних критеріїв. Засоби рішення задачі оптимізації при наявності множини суперечливих приватних критеріїв.

Критерій надійності. Особлива роль критеріїв усталеності, режимної керованості і живучості при проектуванні складних енергосистем. Якісні і кількісні характеристики критеріїв надійності. Нормування надійності. Критерії якості електроенергії й охорони навколишнього середовища. Урахування критерію якості електроенергії при проектуванні енергосистем.

Методичні вказівки

При вивченні даної теми варто звернути увагу на особливості розрахунку економічних критеріїв оптимізації розвитку для статичних і динамічних систем; питання обліку критеріїв надійності, якості електроенергії й охорони навколишнього середовища.

Тема 1.4. Математичні моделі для оптимізації розвитку електроенергетичних систем.

Математична модель системи. Оптимізаційні, оцінні й оптимізаційно-оцінні моделі. Властивості моделей різноманітних типів. Припустимі й оптимальні плани

Тема 1.5. Моделі прогнозування навантажень і електроспоживання.

Прогнозування вихідної інформації в задачах оптимального розвитку електроенергетичних систем. Методи прогнозування: екстраполяційні, експертні і економетричні. Їхня характеристика, застосовуваний математичний апарат. Прогнозування електричних навантажень, електроспоживання в енергосистемах. Прогнозування в системах з ієрархічною структурою. Визначення довірчих інтервалів прогнозних показників. Розрахункові терміни оптимізації. Моделі довгострокового, середньострокового і короткострокового планування (прогнозування). Адаптивний підхід.

Методичні вказівки

При вивченні даного матеріалу варто звернути увагу на характеристики й застосовуваний математичний апарат методів прогнозування, основні етапи рішення завдання прогнозування навантажень і електроспоживання.

Розділ 2. МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ І ВИБОРУ ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕНЕРГОСИСТЕМ.

Тема 2.1. Оптимізація генеруючих потужностей електроенергетичних систем.

Характеристика задач оптимізації структури енергосистеми. Паливно-енергетичний баланс економічного району. Розміщення виробництва. Принципи формування єдиної електроенергетичної системи країни. Оптимізація структури енергосистем. Співвідношення між потужностями КЕС, ГЕС, ТЕЦ і АЕС в енергосистемах. Доцільні встановлені потужності

електростанцій і одиничні потужності блоків. Задача оптимізації розміщення і вибору потужності електростанцій в енергосистемі. Її місце в проблемі оптимізації структури енергосистем. Ієрархія задач визначення структури. Вимоги до моделей оптимізації потужностей, що генерують. Стисла характеристика існуючих моделей і методів.

Тема 2.2. Лінійні моделі оптимізації структури генеруючих потужностей

Лінійні моделі оптимізації структури генеруючих потужностей. Запис функції приведених витрат, формування цільової функції й обмежень лінійної моделі. Особливості оптимізації виробітки електроенергії електростанцій системи при упорядкуванні моделі. Основні поняття і визначення лінійного програмування. Геометрична інтерпретація задачі лінійного програмування. Характеристика симплекс-методу рішення задачі лінійного програмування. Основні етапи рішення - видшукування опорного й оптимального планів. Гідності і хибності лінійної моделі оптимізації структури потужностей, що генерують. Особливості упорядкування лінійної моделі оптимізації структури потужностей, що генерують, при динамічній постановці задачі.

Методичні вказівки

При вивченні даного матеріалу варто звернути увагу на особливості математичної моделі оптимізації структури генерувальних потужностей, питання застосування симплекс-методу.

Перш ніж почати відпрацювання матеріалу, необхідно повторити розділи дисципліни "Електричні системи та мережі", у яких розглядаються питання визначення витрат електроенергії в елементах мережі, їхня вартість.

У процесі вивчення даної теми необхідно розглянути:

- 1) постановку задачі оптимізації структури генерувальних потужностей і етапи рішення задач;
- 2) лінійну модель оптимізації структури генерувальних потужностей і формування цільової функції;
- 3) обмеження лінійної моделі оптимізації структури генерувальних потужностей;
- 4) особливості вибору кількості годин використання встановленої потужності;
- 5) основні поняття й визначення лінійного програмування;
- 6) геометричну інтерпретацію задачі лінійного програмування;
- 7) симплекс-метод: знаходження опорного плану;
- 8) симплекс-метод: знаходження оптимального плану.

Тема 2.3. Застосування методу динамічного програмування для оптимізації структури генеруючих потужностей.

Застосування динамічного програмування для оптимізації структури генеруючих потужностей. Поняття про метод динамічного програмування.

Принцип оптимальності Беллмана і рекуррентні формули. Формування моделі оптимізації структури генеруючих потужностей. Запис обмежень. Блок-схема рішення задачі. Гідності і хиби застосування методу динамічного програмування для оптимізації структури генеруючих потужностей.

Тема 2.4. Оптимізація розміщення і вибору параметрів генеруючих потужностей.

Оптимізація розміщення і вибору генеруючих потужностей. Місце задачі оптимізації розміщення і проблема розвитку паливно-енергетичного комплексу(ПЕК). Вимоги до моделей оптимізації генеруючих потужностей.

Застосування динамічного програмування для оптимізації розміщення вибору генеруючих потужностей теплових і атомних електростанцій. Рекуррентні формули. Формування моделі оптимізації генеруючих потужностей. Запис обмежень. Блок-схема рішення задачі. Гідності і хиби методу динамічного програмування для оптимізації розміщення і вибору потужностей станцій системи.

Методичні вказівки

При відпрацюванні даного матеріалу необхідно вивчити особливості задачі оптимізації розміщення й вибору генерувальних потужностей, питання застосування методу динамічного програмування для рішення цієї задачі.

При відпрацюванні матеріалу студент повинен засвоїти:

- 1) постановку задачі оптимізації розміщення й вибору генерувальних потужностей;
- 2) застосування методу динамічного програмування для рішення задачі оптимізації розміщення й вибору генерувальних потужностей;
- 3) переваги й недоліки методу динамічного програмування для оптимізації розміщення й вибору потужностей станцій системи.

Тема 2.5. Використання градієнтних методів для оптимізації розвитку енергосистем.

Математична постановка задачі оптимізації режиму енергосистеми. Підхід до задачі оптимізації з позицій методів нелінійного програмування. Математичні методи рішення задачі оптимізації розвитку енергосистем. Градієнтні методи. Застосування градієнтних методів при оптимізації. Вибір вектора регульованих параметрів. Розрахунок чергового наближення вектора регульованих параметрів. Урахування режимних обмежень. Метод стримуючих обмежень. Комбінований метод зовнішніх і внутрішніх штрафних функцій. Розрахунок коефіцієнтів штрафу. Алгоритм рішення задачі оптимізації при урахуванні режимних обмежень.

Розділ 3. МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Тема 3.1. Постановка та основні особливості задачі оптимізації розвитку електрических мереж.

Місце задачі планування оптимального розвитку електричних мереж в загальній задачі оптимізації ЕЕС. Щаблі напруги і параметри ліній. Метод підоптимізації і поетапний метод. Загальна характеристика методів оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем. Урахування динаміки розвитку електричних мереж при оптимізації. Основні етапи проектування електричних мереж. Урахування надійності мережі при економічній оптимізації.

Методичні вказівки

При вивченні матеріалу теми 3.1 варто звернути увагу на постановку задачі оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем. У процесі вивчення матеріалу необхідно звернути увагу на наступні питання.

1.2.1. Постановка задачі оптимізації розвитку електричних мереж

При оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем вибираються напруга й конфігурація мереж, встановлюється черговість спорудження об'єктів електромереж.

Критерій оптимальності при оптимізації - це сума динамічних зведених витрат по всіх елементах мереж. При рішенні повинні бути враховані динаміка розвитку мереж енергосистем, вимоги до надійності і якості енергопостачання, обмеження по пропускній здатності ліній електропередачі й трансформаторних підстанцій.

Розглянута задача вирішується при заданому плані вводу генеруючих потужностей. Основні дані при оптимізації - рівні навантажень електричної мережі на різних етапах її розвитку; розрахункова схема електричної мережі, що включає в себе існуючі й намічувані до спорудження лінії електропередачі й підстанції; технічні характеристики й вартісні показники елементів мережі.

Рішення такої складної задачі як оптимізація розвитку електричних мереж енергосистем можливе тільки на основі розчленування загальної задачі на окремі складові, які вирішують незалежно з наступним узгодженням одержаних результатів. Прикладом такої розбивки може бути поділ задач проектування енергосистем по територіальній ознаці, що засновано на розподілі єдиної енергетичної системи на об'єднані й районні енергосистеми.

Розглянуті методи оптимізації конфігурації й напруги електричної мережі можуть бути розділені на дві групи.

До першої групи належать методи, у яких оптимальну електричну мережу визначають на основі розрахунку поточкорозподілу, що забезпечує мінімум зведених витрат. Сутність методів цієї групи полягає в наступному. Складається вихідна розрахункова схема мережі, до складу якої входять як

існуючі, так і намічувані до спорудження елементи. Якщо на основі попереднього інженерного аналізу вибір шабля напруги якого-небудь зв'язку між вузлами мережі ускладнений, то у вихідну розрахункову схему включаються до спорудження лінії різних шаблів напруги. Далі вирішується задача визначення мінімуму зведених витрат на спорудження й експлуатацію мережі при наявності рівнянь зв'язку й обмежень. Оптимальну мережу визначають у результаті аналізу поточкорозподілу, що забезпечує мінімум зведених витрат. При аналізі зі схеми виключають гілки, потужність яких або дорівнює нулю, або досить мала. Елементи, що залишилися, утворюють оптимальну мережу [3].

До другої групи належать методи, при використанні яких оптимальну електричну мережу визначають у результаті послідовного порівняння зведених витрат обмеженої кількості варіантів розвитку мережі.

Електричні мережі енергосистем належать до класу динамічних систем, тому що є під впливом навантажень, що змінюються в часі й просторі. Тому при проектуванні необхідно враховувати динаміку розвитку електричних мереж. Точний облік динаміки, що полягає в оптимальному розподілі заходів щодо розвитку мережі по роках розрахункового періоду, можливий тільки при використанні методу динамічного програмування. При застосуванні інших оптимізаційних методів динаміка розвитку системи враховується приблизно. Тоді весь період оптимізації розбивається, як правило, на три етапи. Для першого етапу (перші 3-5 років) обґрунтовуються конкретні рішення по розвитку мережі, параметри й строки спорудження об'єктів електромережі. На більш віддалену перспективу (7-12 років) розробляється сукупність варіантів розвитку мереж, які можуть виявитися оптимальними при різних сполученнях вихідних умов. Для третього етапу розвитку (15-20 років) визначаються тільки структура й основні принципи побудови єдиної енергосистеми.

У методах і алгоритмах оптимізації розвитку електричних мереж надійність енергопостачання вузлів навантаження враховують, як правило, у результаті введення додаткових вимог до конфігурації мережі. Для обліку надійності енергопостачання певних вузлів оптимальну мережу будують так, щоб кількість ліній, що живлять кожен із розглянутих вузлів, було не менше заданого. Крім того, надійність може бути врахована в результаті включення до складу цільової функції збитку від недостатньої надійності енергопостачання або в результаті розрахунку й порівняння показників надійності з нормованими величинами. Однак, тому що в цей час немає досить простих способів визначення збитку в складних енергосистемах і відсутні затверджені нормативи надійності, такі підходи до обліку надійності не одержали достатнього поширення.

Тема 3.2. Економічні інтервали і функції оптимальних витрат для елементів мережі.

Економічні інтервали і функції оптимальних витрат для елементів мережі. Скорочення розмірності задачі і зменшення різноманітності перемінних. Економічні інтервали потужності й оптимальні приведені

витрати ліній електропередачі і трансформаторів. Побудова функцій оптимальних витрат для трьохобмоткових трансформаторів і автотрансформаторів. Засоби апроксимації функції приведених витрат. Упорядкування перехідної розрахункової схеми електричної мережі.

Методичні вказівки

При вивченні матеріалу теми 3.2 варто звернути увагу на питання побудови функцій оптимальних витрат для елементів мережі; необхідно повторити розділи дисципліни "Електричні системи й мережі", де розглядаються питання визначення витрат потужності й енергії у лініях електропередачі й трансформаторах. У процесі вивчення матеріалу необхідно звернути увагу на вивчення наступних питань.

1.2.2. Функції оптимальних витрат для ліній електропередачі й трансформаторів

Як критерій оптимальності при рішенні задачі оптимізації розвитку електричної мережі використовують суму динамічних зведених витрат по всіх елементах (гілкам) мережі:

$$Z^c = \sum_{i \in M} Z_i$$

де i - поточний індекс гілок мережі; M - множина допустимих гілок.

У складі елементів мережі розрізняють лінії електропередачі й трансформатори. Кожний елемент характеризується рядом параметрів, серед яких можуть бути, наприклад, напруга, перетин і число ланцюгів лінії, потужність трансформатора й т.п. Зазначені параметри дискретні, що викликає істотні ускладнення при вирішенні задачі оптимізації. Так як ці параметри можна представити функціями потоку потужності по лінії електропередачі або трансформатору, при оптимізації, для скорочення розмірності розв'язуваної задачі, доцільно виключити їх із числа незалежних змінних. Для цього можна застосувати метод економічних інтервалів, при використанні якого наведені витрати i -ої галузі електричної мережі при будь-якому значенні потоку потужності по елементу P_i - повинні задовольняти умові

$$Z_i(P_i) = \min\{ Z_{i1}(P_i), Z_{i2}(P_i), \dots, Z_{iv}(P_i) \}, \quad (1.1)$$

де V - загальна кількість варіантів технічного виконання i -ої гілки.

Витрати в лінію електропередачі можна представити у вигляді

$$Z_v = Z_{vo} \cdot l,$$

(1.2)

де Z_{vo} - зведені витрати на спорудження й експлуатацію одиниці довжини лінії заданого типу й напруги з перетином S_v ; l - довжина лінії.

Витрати для ліній, що споруджуються знову

$$Z_{vo} = (E_n + P_a) \cdot K_{ov} + \frac{P^2}{U_{cp}^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot r_{ov} \cdot Z_{\varepsilon} \cdot \tau, \quad (1.3)$$

де K_{ov} - капіталовкладення на одиницю довжини лінії перетином S_v ; U_{cp} - середня експлуатаційна напруга; $\cos \varphi$ - середнє значення коефіцієнта потужності для даного класу напруги; r_{ov} - погонний опір лінії перетином S_v ; Z_{ε} - питома вартість втрат електроенергії; τ - кількість годин максимальних втрат. Якщо $P = 0$, то витрати в лінію також приймаються рівними нулю.

Функція (4) може бути представлена у вигляді

$$Z_{vo} = a_{ov} + b_{ov} \cdot P^2, \quad (1.4)$$

де a_{ov} , b_{ov} - коефіцієнти параболи.

Аналогічні функції можуть бути записані для всіх $v = 1, 2, \dots, V$ допустимих перетинів ліній заданого типу й напруги. Тоді, відповідно до (2), функція оптимальних витрат у лінію від потужності є нижньою згинаючою сімейства парабол, кожна з яких побудована для одного із допустимих перетинів. На рис.1.1 показана функція оптимальних витрат для лінії, що споруджується знову, напругою 110 кВ. Пунктиром відзначені границі економічних інтервалів доцільного застосування відповідних перетинів. При побудові функції оптимальних витрат відпали ті з допустимих перетинів, які не задовольняли умові (2).

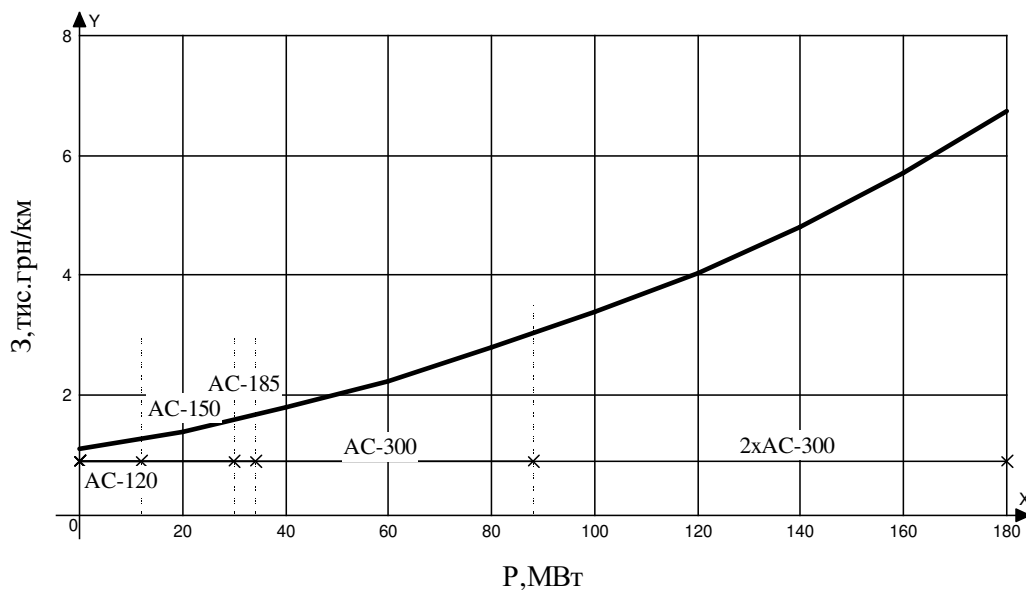


Рис. 1.1. Функції питомих зведених витрат на спорудження й експлуатацію лінії напругою 110кВ

Для існуючих ліній електропередачі постійна частина витрат у процесі оптимізації не змінюється й тому може бути виключена з цільової функції. В цьому випадку функція витрат у лінію проходить через початок координат.

Потужність лінії - аргумент функції оптимальних наведених витрат. Тому використання даної функції при оптимізації розвитку мережі дозволяє виключити перетин лінії з числа незалежних змінних. Тоді перетин можна знайти по заданій потужності за допомогою економічних інтервалів. Аналогічно виключається зі сполуки незалежних змінних число паралельних ланцюгів лінії електропередачі. Безпосереднє використання функції оптимальних зведених витрат виду $Z_i = f(P_i)$ ускладнено, тому що на границях економічних інтервалів має місце розрив перших похідних. Тому кусково-параболічну функцію зведених витрат заміняють більш простими апроксимуючими функціями. Залежно від умов завдання використовують різні види апроксимації. Найбільше часто застосовують функцію

$$Z(P) = \begin{cases} a+b|P|, & \text{якщо } P \neq 0 \\ 0, & \text{якщо } P = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

і використовують апроксимацію виду

$$Z(P) = c \cdot \sqrt{P^2 + \varepsilon}. \quad (1.6)$$

Крім того, апроксимація може бути виконана за допомогою кусково-лінійних функцій.

При рішенні задачі оптимізації розвитку електричної мережі вирішуються питання доцільності спорудження трансформаторних підстанцій, вибору типу, числа, і потужності трансформаторів. Наведені витрати на спорудження й експлуатацію підстанцій дорівнюють сумі наведених капіталовкладень, відрахувань від них і щорічних витрат, обумовлених втратами електроенергії у трансформаторах. Капіталовкладення включають вартість розподільних пристроїв, силових трансформаторів, компенсуючих пристроїв, реакторів і постійну частину витрат. Зі зміною потужності підстанції змінюється тільки та частина капіталовкладень, що пов'язана з номінальною потужністю й числом трансформаторів.

Розглянемо підстанцію з одним двообмотковим трансформатором. У цьому випадку зведені витрати на її спорудження й експлуатацію можна визначити з виразу виду

$$Z_v = a_v + b_v \cdot P^2. \quad (1.7)$$

Так само як і для ліній, аналогічні формули можуть бути записані для всіх $v = 1, 2, \dots, V$ номінальних потужностей трансформаторів розглянутого типу й напруги. Тому що втрати енергії в трансформаторах порівняно невеликі, зведені витрати в основному визначаються капіталовкладеннями. Найбільш типова залежність витрат від потужності підстанції показана на рис. 2.

Якщо розглядається питання про доцільність спорудження підстанції з трьохобмотковими трансформаторами або автотрансформаторами, то необхідно зробити еквівалентну заміну трьохобмоткового трансформатора одним

або двома двообмотковими. При цьому припускають, що проектувана мережа перебуває з боку двох обмоток трансформатора, а потужність третьої обмотки задана й незмінна. При заміні розрізняють два випадки.

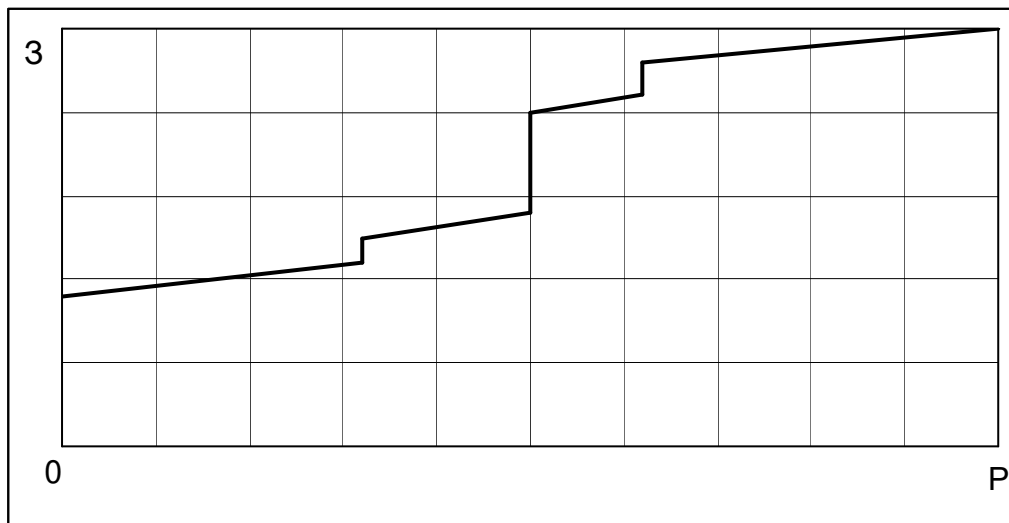


Рис. 1.2. Залежність наведених витрат на спорудження й експлуатацію підстанції від потужності

У першому випадку вважається, що потужності, що протікають по обмотках, підключеним до проектуваної мережі, різні по напрямку. Одна обмотка живильна, друга - навантажувальна. При цьому втрати потужності в трьохобмотковому трансформаторі можна записати у вигляді

$$\Delta P_v = a_v^P + b_v^P \cdot P_n + c_v^P \cdot P_n^2, \quad (1.8)$$

де P_n - потужність живильної обмотки.

Тоді розглянутий триобмотковий трансформатор може бути замінений одним двообмотковим, вартість якого визначають у відповідності з вартістю триобмоткового трансформатора, а втрати електроенергії - по формулі (1.8). Схема заміщення еквівалентного трансформатора показана на рис. 1.3, де

P_n - потужність навантажувальної обмотки; P_c - фіксована потужність обмотки, підключеної до існуючої частини мережі.

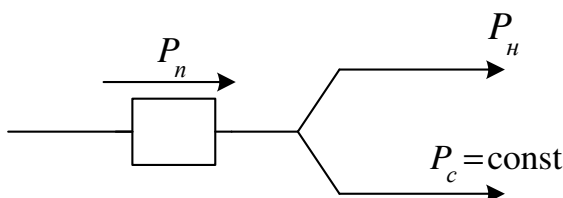


Рис. 1.3. Схема заміщення еквівалентного двообмоткового трансформатора

У другому випадку припускають, що потужності, що протікають по обмотках, підключеним до проектуваної мережі, однакові за напрямком. У цьому випадку трьохобмотковий транс-

форматор заміняють двома двообмотковими, які з'єднують проектовані й існуючі частини мережі.

У загальному випадку, з огляду на еквівалентну заміну трьохобмоткових трансформаторів, зведені витрати на спорудження й експлуатацію трансформаторної підстанції можна записати у вигляді

$$\Delta P_v = a_v + b_v \cdot P + c_v \cdot P^2, \quad (1.9)$$

де $v = 1, 2, \dots, V$.

Оскільки вираз (10) аналогічний виразу (5), для виключення потужності й числа трансформаторів із складу незалежних змінних також можна використовувати метод економічних інтервалів. Зовсім аналогічно будують функцію оптимальних витрат, для апроксимації якої також можна використовувати залежності виду (6) і (7).

Таким чином, при рішенні завдання оптимізації розвитку електричної мережі можна використовувати функції оптимальних витрат однакового виду для ліній і трансформаторів, що дозволяє не враховувати при оптимізації відмінність даних елементів.

Тема 3.3. Методи оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем.

Метод упорядкованого винятку гілок. Алгоритм методу. Основні модифікації методу упорядкованого винятку гілок.

Математичний метод покоординатної оптимізації. Його модифікації, особливості. Метод поконтурної оптимізації. Упорядкування моделі електричної мережі. Алгоритм методу. Критерій закінчення процесу оптимізації. Поконтурна оптимізація динамічного графа.

Основи застосування динамічного програмування для оптимізації розвитку мереж енергосистем. Запис цільової функції. Рекуррентні співвідношення для пошуку оптимізаційного рішення. Блок-схема алгоритму методу.

Комбінаторний метод гілок і меж. Внутрішні і зовнішні оцінки. Застосування методу для рішення задачі оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем. Алгоритм методу.

Основні гідності і хиби різноманітних методів пошуку оптимальної конфігурації мережі.

Методичні вказівки

При вивченні даного матеріалу варто звернути увагу на особливості застосування математичних методів для рішення задач оптимізації розвитку електричних мереж, основні переваги й недоліки застосовуваних методів.

Перш ніж почати відпрацьовувати матеріал, необхідно повторити розділи дисципліни, де розглядаються математичні основи методу динамічного програмування.

У процесі вивчення необхідно звернути увагу на вивчення наступних питань.

1.2.3. Метод впорядкованого виключення гілок

При використанні даного методу в результаті попереднього інженерного аналізу визначається вихідна розрахункова схема електричної мережі, що містить надлишкові лінії. Для вихідної мережі розраховують зведені витрати Z_o ; потім шляхом послідовного відключення всіх припустимих ліній мережі визначають гілку, відключення якої не порушує зв'язності схеми й приводить до найбільшого зменшення зведених витрат на спорудження й експлуатацію електричної мережі. Отриману гілку виключають із схеми мережі. Далі знову вибирають лінію, відключення якої приводить до найбільшого зменшення зведених витрат, знову виключають отриману лінію й т.д. Процес триває доти, доки не залишиться електрична мережа, відключення кожної з ліній якої приводить або до збільшення зведених витрат, або до втрати зв'язності схеми.

Алгоритм методу впорядкованого виключення гілок можна записати наступним чином.

1. Визначаємо вихідну надлишкову схему електричної мережі, розраховуємо зведені витрати на спорудження й експлуатацію даної мережі Z_o . В якості множини D приймаємо порожню множину $D = \emptyset$.

2. Переглядаючи всі гілки електричної мережі, з умови

$$Z_o - Z(\bar{i}) = \max \{ Z_o - Z(\bar{m}) \mid m \notin D \}, \quad (1.10)$$

знаходимо лінію i , відключення якої приводить до найбільшого зменшення зведених витрат. В умові (11) $m \in M$ показує, що лінія m належить множині гілок електричної мережі M , а $m \notin D$ - що лінія m не належить множині D ; $Z(\bar{m})$ - витрати на спорудження й експлуатацію мережі, яка виходить із вихідної в результаті відключення лінії m .

3. Якщо виконується умова

$$Z_o - Z(\bar{i}) > 0,$$

то переходимо до п.4 алгоритму, якщо ні, - то до п.7.

4. Чи порушує зв'язність схеми відключення лінії i ? Якщо так, то включаємо лінію i у множину D :

$$D = D + i,$$

виключаємо з множини M :

$$M = M - i$$

і переходимо до п.6 алгоритму. Якщо ні, то переходимо до п.5.

5. Виключаємо лінію i зі схеми мережі, виключаємо з множини M і приймаємо витрати $Z(\bar{i})$ в якості Z_o .

6. Множина M - порожня множина:

$$M = \emptyset$$

Якщо так, то переходимо до п.7 алгоритму, якщо ні, - то до п.2.

7. Кінець.

Процедура розрахунку зведених витрат на спорудження й експлуатацію електричної мережі містить у собі визначення поточкорозподілу, що розраховується по заданих довжинах ділянок, розрахунок і підсумовування зведених витрат на спорудження й експлуатацію кожної гілки розглянутої мережі.

Перевагою методу є те, що при визначенні зведених витрат може бути безпосередньо використана крива економічних потенціалів. До недоліків необхідно віднести великий об'єм обчислень на кожному кроці оптимізації. Крім того, використання даного методу не завжди забезпечує одержання найкращого рішення.

Для оптимізації розвитку електричних мереж можна застосувати ще одну модифікацію методу впорядкованого виключення гілок, відповідно до якої на кожному кроці оптимізації здійснюється перехід не до схеми мережі, що забезпечує найменші витрати, а до першої ж схеми, що характеризується меншими зведеними витратами. При використанні цієї модифікації зміна порядку розгляду гілок приводить до одержання нового рішення. Зіставляючи ці рішення між собою, можна одержати глобальний мінімум функції зведених витрат. Однак, тому що кількість гілок мереж сучасних енергосистем досить велика, ймовірність визначення глобального мінімуму вкрай низька.

Приклад. Нехай необхідно визначити оптимальну конфігурацію електричної мережі, надлишкова розрахункова схема якої показана на рис.1.4, де навантаження вузлів наведені у мегаватах, а довжини ділянок у кілометрах.

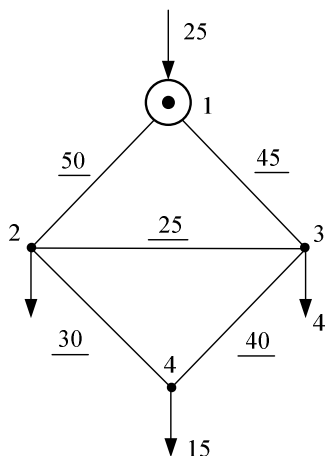


Рис. 1.4. Розрахункова схема електричної мережі

Наведені розрахункові витрати на спорудження та експлуатацію електричної мережі визначаються за допомогою виразу

$$Z_c = \sum_{i \in M} (a_i + b_i \cdot |P_i|)$$

Далі наведені значення коефіцієнтів a_i і

b_i .

Гілка	1-2	1-3	2-3	2-4	3-4
a_i	6	5	4	5	4
b_i	1	0,8	0,5	0,6	0,6

Розрахунок починають із визначення приведених витрат для вихідної схеми мережі, для чого розраховують поточкорозподіл (по довжинах), результати розрахунку наносять на схему мережі (рис. 1.5, а). Знаючи поточкорозподіл, визначають витрати на спорудження та експлуатацію електричної мережі

$$C_{\bar{n}} = C_{12} + C_{13} + C_{23} + C_{24} + C_{34} = 6 + 1 \cdot 12,29 + 5 + 0,8 \cdot 12,71 + 4 + 0,5 \cdot 1,68 + 5 + 0,6 \cdot 7,97 + 4 + 0,6 \cdot 7,03 = 56,71 \text{ МВт.}$$

Далі виконують послідовні кроки оптимізації.

Перший крок. Послідовно відключають кожну з ліній вихідної мережі. Для кожного варіанта схеми розраховують поточкорозподіл, знаходять наведені витрати на спорудження та експлуатацію мережі. Отримані результати наведені далі; крім того, результати розрахунку поточкорозподілу наносять на розрахункові схеми варіантів розвитку мережі

Гілка, що відключається	1–2	1–3	2–3	2–4	3–4
$3(\bar{i})$	54,21	54,22	51,60	52,42	55,39
$3_0 - 3(\bar{i})$	2,50	2,49	5,11	4,29	1,32

Так як найбільше зменшення приведених витрат викликає відключення лінії 2–3 (рис. 1.5, г), на наступному кроці оптимізації у якості вихідної розглядають схему, у якій відсутня дана лінія.

Другий крок. Приймають в якості C_0 витрати варіанта схеми, отриманого на першому кроці: $3_0 = 3(\bar{2-3}) = 51,60$. Знову послідовно відключають кожну з ліній мережі, розраховують поточкорозподіл та знаходять наведені витрати кожного варіанта. Результати розрахунку наведені далі.

Гілка, що відключається	1–2	1–3	2–4	3–4
$3(\bar{i})$	50,2	51,64	45,2	49,2
$3_0 - 3(\bar{i})$	1,4	-0,04	6,4	2,4

Найбільше зменшення витрат викликає відключення лінії 2–4. Так як подальше відключення гілок призводить до втрати зв'язності схеми, результатом оптимізації буде схема, показана на рис. 1.6.

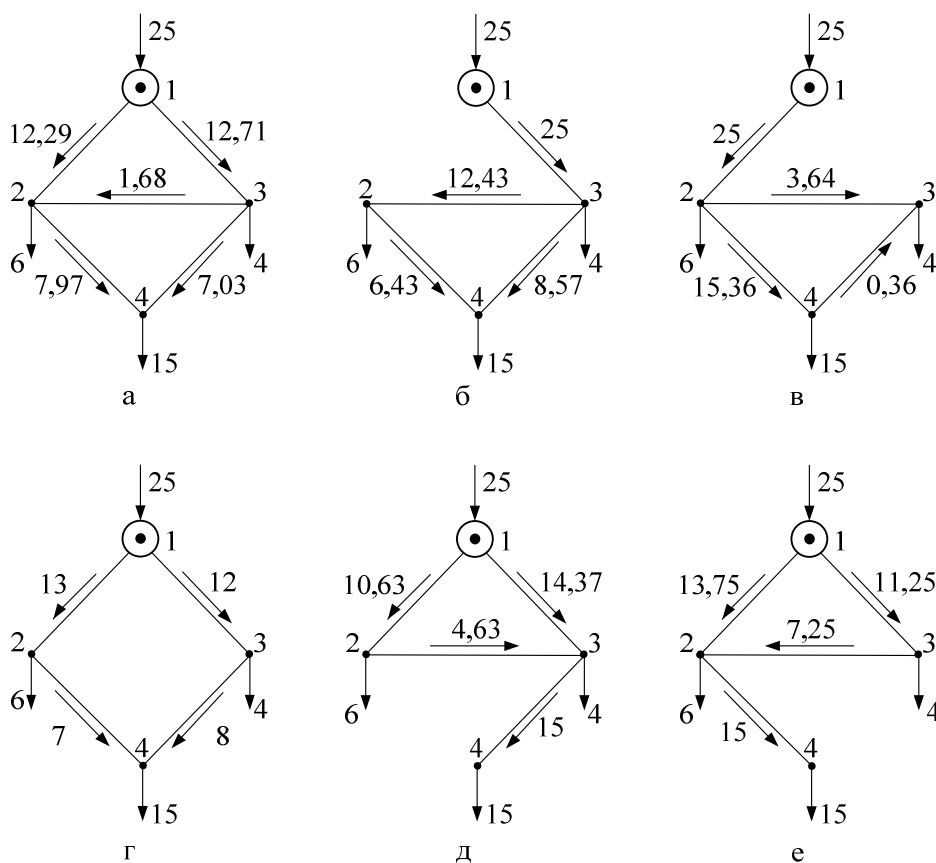


Рис.1.5. Варіанти розрахункових схем, розглянутих на першому кроці оптимізації методу упорядкованого відключення гілок:

а - вихідна схема; схема, отримана при відключенні лінії: б - 1-2; в - 1-3; г - 2-3; д - 2-4; е - 3-4

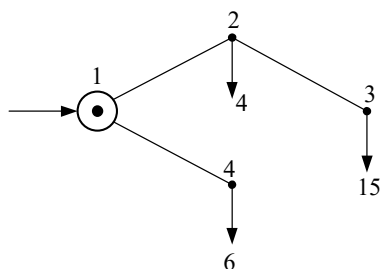


Рис.1.6. Оптимальна схема електричної мережі

1.2.4. Метод поконтурної оптимізації

Метод поконтурної оптимізації можна використовувати для розв'язання задачі визначення оптимальної конфігурації проектованої мережі як у статичній, так і в динамічній постановці [2, 10]. Модифікацію методу, призначену для розв'язання динамічної задачі оптимізації розвитку електричної мережі, реалізовано в комплексі програм для ЕОМ другого покоління, розробленому в Інституті фізико-технічних проблем енергетики АН колишньої Литовської РСР.

Розглянутий метод належить до групи методів покоординатної оптимізації, сутність яких полягає в такому. Нехай визначено n одиничних векторів напрямів координат $e_1, e_2, \dots, e_n$. Метод циклічного покоординатного спуску працює по черзі в кожному координатному напрямі. Якщо дано точку $X^{(0)}$, то точка $X^{(1)}$ утворюється з $X^{(0)}$ мінімізацією цільової функції в напрямку e_1 , точка $X^{(2)}$ з $X^{(1)}$ мінімізацією в напрямку e_2 і т. д. Нарешті точку $X^{(n)}$ знаходять мінімізацією в напрямку e_n . Потім усі операції повторюють, починаючи з точки $X^{(n)}$ і т. д. Якщо після циклу оптимізації по усіх координатах виконується умова

$$|\Phi(X^{(n)}) - \Phi(X^{(0)})| < \varepsilon, \quad (1.11)$$

то процес пошуку вважають закінченим. В умові (4.1) $\Phi(X^{(0)})$ і $\Phi(X^{(n)})$ – значення цільової функції в початковій $X^{(0)}$ і кінцевій $X^{(n)}$ точках циклу оптимізації; ε – точність розрахунку.

Мінімізацію в напрямі по одній координатній осі зазвичай виконують або методом прямого пошуку, у якому варіюється координата точки X , яка послідовно набуває можливих дискретних значень, або одним з методів одновимірного пошуку.

Якщо змінювання змінних обмежене системою рівнянь, то частина змінних, кількість яких дорівнює кількості рівнянь зв'язку, виявляються залежними. Інші змінні є незалежними. У цьому випадку покоординатний спуск виконують тільки за незалежними змінними. У процесі пошуку оптимального розв'язку деякі з незалежних змінних можна зводити до залежних, а таку саму кількість залежних – до незалежних.

При використанні метода поконтурної оптимізації, задачу вибору оптимальної конфігурації електричної мережі в статичній постановці формують як задачу визначення мінімуму функції витрат вигляду

$$V^* = \sum_{i \in M} V_i(P_i) \quad (1.12)$$

за умови, що

$$\sum_{i \in M_j} P_i - P_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J - 1, \quad (1.13)$$

де i – поточний індекс гілок електричної мережі; M – множина допустимих гілок мережі; $V_i(P_i)$ – відома кусково-лінійна функція витрат на i -у лінію, яку можна одержати в результаті апроксимації кривої економічних

інтервалів; M_j – множина гілок, з'єднаних з вузлом j ; P_i – потужність, що перетікає по лінії i ; P_j – навантаження j -го вузла; J – кількість вузлів у мережі [19]. При цьому потужність балансувального вузла визначають із виразу

$$P_J = - \sum_{i \in M_J} P_i.$$

Для спрощення обчислень на кожному кроці оптимізації доцільно апроксимувати функцію витрат на кожному гілку мережі прямою лінією [2, 19]. Тоді функцію $V_i(P_i)$ записують у вигляді

$$V_i(P_i) = \begin{cases} a_i + b_i |P_i|, & \text{якщо } P_i \neq 0; \\ 0, & \text{якщо } P_i = 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

для кожної нової гілки;

$$V_i(P_i) = b_i |P_i| \quad (1.15)$$

для кожної існуючої гілки мережі.

Використовуючи метод поконтурної оптимізації, в розрахунковій схемі виділяють зв'язну розімкнуту мережу, яку називають деревом мережі. Усі гілки мережі називають дугами. Дуги, що утворюють дерево, позначають індексами $l = 1, 2, \dots, L$. Дуги, що не входять у дерево, і вмикання яких забезпечує перехід до вихідної замкнутої мережі, називають хордами. Хорди позначають індексами $k = 1, 2, \dots, K$. У результаті додавання будь-якої з хорд до дерева мережі утвориться контур. Як незалежні змінні використовують навантаження хорд мережі, а як залежні – навантаження дуг, що утворюють дерево мережі. Кількість незалежних змінних, що дорівнює кількості незалежних контурів, можна визначити за допомогою виразу $K = I - J + 1$, де I – кількість гілок мережі. Кількість залежних змінних дорівнює кількості рівнянь зв'язку $j - 1$.

Нехай навантаження всіх хорд дорівнюють нулю, тоді, змінюючи потужність, наприклад k -ї хорди, можна визначити мінімум функції витрат на спорудження й експлуатацію гілок даного контуру:

$$V_k^*(P_k) = V_k(P_k) + \sum_{l \in M_k} V_l(P_l), \quad (1.16)$$

де P_k , V_k – відповідно навантаження і витрати k -ї хорди; M_k – множина дуг контуру, що виникає у разі замикання k -ї хорди; P_l – навантаження l -ї дуги, яке, у свою чергу, залежить від потужності хорди $P_l = f_l(P_k)$.

Відомо, що для оптимізації у загальному випадку кусково-лінійної функції достатньо розглянути її критичні точки, тобто точки, в околі яких функція не спадає. Оскільки в цьому випадку функції витрат у лінії, подані у вигляді (1.14) і (1.15), критичні точки відповідають нульовому навантаженню хорди або дуги контуру. У цьому разі для оптимізації контуру достатньо порівняти зведені витрати для тих його режимів, у яких навантаження хорди або однієї з дуг дорівнює нулю [2, 19].

Якби контури мережі не були взаємозалежні, оптимізація була б закінчена за k кроків. Проте існують дуги, що одночасно входять у декілька контурів. Тому в результаті оптимізації одного контуру змінюються умови оптимізації інших контурів, що потребує їхнього повторного розгляду. Взаємовплив контурів потребує організації ітераційного процесу пошуку екстремуму. У процесі виділяють цикли оптимізації, послідовне виконання яких забезпечує розв'язання задачі. На кожному циклі здійснюють оптимізацію всіх контурів мережі.

Якщо результат оптимізації k -го контуру – нульове навантаження не хорди, а l -ї дуги, доцільно змінити систему незалежних змінних. При цьому k -у хорду потрібно включити в дерево мережі, а l -у дугу – до складу хорд. У протилежному випадку цю дугу при оптимізації одного контуру можна вважати замкнутою, а при оптимізації іншого – розімкнутою.

Алгоритм методу поконтурної оптимізації можна записати таким чином.

1. Виділяють дерево мережі. При цьому дуги, що утворюють дерево, позначають індексами $l = 1, 2, \dots, L$, а хорди – індексами $k = 1, 2, \dots, K$. Навантаження всіх хорд дорівнюють до нуля: $P_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, K$. Задають $k = 1$.

2. Виконують оптимізацію k -го контуру. При цьому знаходять

$$V_k^*(P_{l'} = 0) = \min \{ V_k^*(P_l = 0) \mid l \in M_k \}.$$

Якщо $V_k^*(P_{l'} = 0) < V_k^*(P_k = 0)$, то для наступного кроку оптимізації дугу l' беруть як хорду, а k -у хорду включають у дерево мережі. У протилежному випадку система незалежних змінних залишається без зміни. Задають $P_k = 0$.

3. Якщо всі контури мережі $k = K$, то переходять до п. 4 алгоритму, якщо ні, то змінюють поточний індекс контуру $k = k + 1$ і переходять до п. 2.

4. Якщо в циклі процесу змінювали дерева і хорди мережі, то беруть $k = 1$ і переходять до п. 2 алгоритму, якщо ні – до п. 5.

5. Кінець.

У цьому алгоритмі критерій закінчення процесу оптимізації – сталість хорд і дерева мережі після виконання циклу оптимізації. Крім того, в загальному випадку ітераційний процес можна закінчувати, якщо виконується умова

$$|V^{*(V-1)} - V^{*(V)}| \leq \varepsilon,$$

де V – номер циклу оптимізації.

Приклад: Нехай необхідно визначити оптимальну конфігурацію електричної мережі, надлишкову розрахункову схему якої зображено на рис. 4.1. На рисунку показано навантаження вузлів (у мегаватах) і довжини ліній (у кілометрах) мережі.

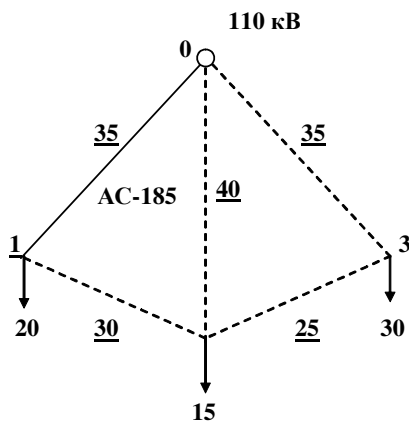


Рис. 1.7. Розрахункова схема електричної мережі

Існуючу електропередачу 0–1 позначено суцільною лінією, а можливі траси нових електропередач – пунктиром. Питомі зведені витрати на 1 км нових ліній визначають за виразом

$$Z_0 = 1,53 + 0,05P ,$$

який отримано в результаті апроксимації функції витрат. Для існуючих ліній у розрахунку враховують тільки вартість втрат електроенергії. У цьому випадку питомі витрати

$$Z_0 = 0,064P .$$

Організуємо багатокроковий процес оптимізації.

Перший крок. Як хорди вихідної схеми візьмемо лінії 0–2 і 0–3. Тоді перший контур утворять дуги 0–1, 1–2 і хорда 0–2, а другий – дуги 0–1, 1–2, 2–3 і хорда 0–3. Припускаємо навантаження хорд такими, що дорівнюють нулю.

Виконуємо оптимізацію першого контуру. З цією метою послідовно дорівнюємо до нуля навантаження кожної лінії. Для кожного з варіантів схеми знаходимо розподіл потужностей і зведені витрати на спорудження мережі. Нехай, наприклад, навантаження лінії $P_{0-1} = 0$. Тоді $P_{1-2} = 20$, $P_{0-2} = 35$.

Витрати

$$Z_1(0-1) = (1,53 + 0,05 \cdot 20)30 + (1,53 + 0,05 \cdot 35)40 = 207,1 \text{ тис. грн/км.}$$

Результати оптимізації першого контуру наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Результати оптимізації першого контуру

Лінії	Потужність ліній, МВт		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
0–1	0	20	35
1–2	20	0	15
0–2	35	15	0
Витрати тис. грн	207,1	136,0	158,4

Оскільки найменші витрати забезпечує відключення лінії 1–2, дану лінію зараховуємо до хорд, а хорду 0–2 – до дуг. Тоді перший контур утворюють дуги 0–1, 0–2 і хорда 1–2, а другий – 0–2, 2–3 і хорда 0–3.

Виконуємо оптимізацію другого контуру. Знову по черзі відключаємо кожну лінію і для кожного варіанта схеми розраховуємо зведені витрати. Результати оптимізації наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Результати оптимізації другого контуру

Лінії	Потужність ліній, МВт		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
0–2	0	15	45
2–3	15	0	30
0–3	45	30	0
Витрати тис. грн	189,3	197,25	242,1

Найменші витрати забезпечує відключення лінії 0–2. Тому лінію 0–2 включаємо в кількість хорд, а хорду 0–3 відносимо до дуг. Тоді перший контур утворюють дуги 0–1, 0–3, 2–3 і хорда 1–2, а другий – дуги 0–3, 2–3 і хорда 0–2.

Оскільки на кроці оптимізації положення хорд контурів змінилося, переходимо до другого кроку оптимізації.

Другий крок. Виконуємо оптимізацію першого контуру. Отримані результати записуємо в табл. 1.3.

Вилучення хорди 1–2 забезпечує найменші витрати, і тому система контурів не змінюється.

Умови оптимізації другого контуру не змінилися. Отже, результатом його оптимізації так само, як і на першому кроці, буде відключення лінії 0–2.

Таблиця 1.3. Результати оптимізації

Лінії	Потужність ліній, МВт			
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
0–1	0	20	35	65
1–2	20	0	15	45
2–3	35	15	0	30
0–3	65	45	30	0
Витрати тис. грн	325,2	234,1	252,8	334,75

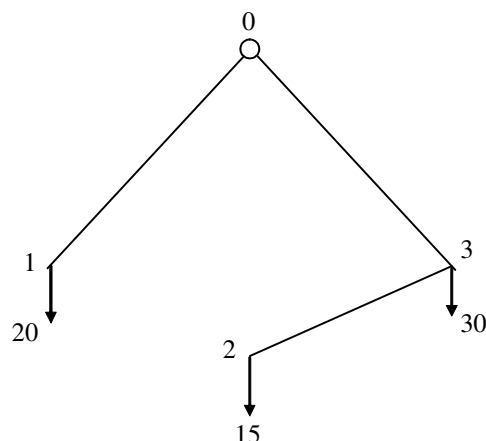


Рис. 1.8. Оптимальна конфігурація електричної мережі

Оскільки на другому кроці оптимізації хорди незалежних контурів не змінили свого положення, отримано розв'язок задачі оптимізації розвитку мережі. Оптимальну конфігурацію мережі показано на рис. 1.8.

1.2.5. Застосування методу динамічного програмування для оптимізації розвитку мереж енергосистем

Електричні мережі енергосистем належать до класу динамічних систем, що безупинно розвиваються. Безперервний ріст електроспоживання викликає необхідність введення нових генеруючих потужностей, спорудження та реконструкції ліній електропередачі та підстанцій. Тому при розгляді завдань оптимізації розвитку електричних мереж необхідно враховувати динаміку розвитку системи. Відмова від обліку динаміки призводить до істотних погіршень.

Точний облік динаміки можливий тільки при застосуванні методу динамічного програмування, що дозволяє при обґрунтуванні рішень по розвитку мережі враховувати весь процес її розвитку, а не обмежуватися тільки розглядом рівнів навантажень споживачів для одного або декількох етапів проектування.

Метод динамічного програмування широко використовують при проектуванні електричних мереж різних класів напруги. На основі алгоритму реалізації даного методу у Фізико-енергетичному інституті АН Латвії розроблені комплекси програм для ЕВМ другого та третього поколінь, які застосовують при проектуванні мереж сучасних енергосистем. У даному розділі основні питання застосування методу динамічного програмування для рішення завдань оптимізації електричних мереж енергосистем викладені відповідно до робіт зазначеного інституту.

Облік динаміки розвитку системи при оптимізації полягає в оптимальному розподілі заходів щодо розвитку мережі по роках розрахункового періоду T . При рішенні в якості вихідних даних використовують вихідну розрахункову схему мережі, навантаження пунктів мережі для кожного року періоду оптимізації, а також безліч можливих заходів щодо розвитку мережі X . У складі X введенні такі заходи, як введення нових генеруючих потужностей, спорудження нових або реконструкція існуючих ліній електропередачі, введення нових або розширення існуючих підстанцій.

При оптимізації як критерій оптимальності використовуються динамічні витрати, які стосовно до рішення розглянутого завдання записуються у вигляді

$$Z_T = \sum_{i=1}^T (E_H K_i + I_i) (1 + E_{H,П})^{-i}, \quad (1.17)$$

де K_i - капіталовкладення сукупності заходів щодо розвитку мережі, які були виконані в період від 0 до i включно; I_i - щорічні постійні витрати i -го року.

Витрати Z_T приведені до початку розрахункового періоду.

Капіталовкладення K_i повністю визначаються станом мережі в розглянутий момент часу e_i , що являє собою сукупність заходів щодо розвитку мережі, реалізованих у період від 0 до i ;

$$K_i = \sum_{X_s \in e_i} K(x_s), \quad (1.18)$$

де x_s - s -й захід щодо розвитку мережі; $\sum_{X_s \in e_i}$ означає, що сума здійснюється по заходах, що визначають стан e_i .

Щорічні витрати

$$I_i = p_a K_i + I_i(p_i) \quad (1.19)$$

визначаються станом мережі e_i , так як капіталовкладення K_i , розрахункова схема та параметри елементів мережі повністю відповідають реалізованій сукупності заходів щодо розвитку мережі. У вираженні (21) p_a - постійні відрахування на амортизацію, ремонт і обслуговування; $I_i(p_i)$ щорічні витрати, обумовлені потоками потужності в елементах електричної мережі.

Введемо позначення

$$Z_i(e_i) = E_H K_i + I_i; \quad (1.20)$$

$$S_i = (1 + E_{H,n})^{-i}. \quad (1.21)$$

Приймаючи до уваги вирази (1.20) та (1.21), витрати на виконання заходів, реалізованих у період від 0 до t , можна записати у вигляді, необхідному для застосування методу динамічного програмування:

$$\Phi(X_t) = S_t Z_t(e_t) + \sum_{i=1}^{t-1} S_i Z_i(e_i), \quad (1.22)$$

де X_t - множина заходів щодо розвитку мережі, реалізованих до моменту часу t ; $Z_t(e_t)$ - витрати t -го періоду року; повністю визначаються станом мережі e_t і не залежать від попередніх станів.

Звідси випливає, що завдання оптимізації розвитку мережі можна сформулювати як завдання визначення оптимальної послідовності стану мережі в момент часу 1, 2, ..., T . При цьому в якості цільової функції використовують функцію виду

$$\Phi = \sum_{t=1}^T q_t(e_t), \quad (1.23)$$

де $q_t(e_t)$ - складова цільової функції на t -му кроці розрахункового періоду; $q_t(e_t) = S_t Z_t(e_t)$.

Рішення задачі оптимізації розвитку мережі розбивається на два етапи. На першому етапі визначають оптимальну послідовність заходів щодо розвитку мережі від початкового e_0 до кінцевого e_T стану, тобто оптимізується процес розвитку мережі. На другому етапі визначають найбільш вигідний кінцевий стан мережі. Таким чином, завдання оптимізації розвитку мережі можна сформулювати як завдання визначення:

$$\min \Phi = \min_e \min_{P_e^T} \Phi(P_e^T), \quad (1.24)$$

де P_e^T - процес розвитку мережі за період T від стану e_0 до стану e ; $\min_{P_e^T}$ показує, що в процесі оптимізації вибирається такий процес розвитку P_e^T , що забезпечує мінімум цільової функції виду $\Phi(P_e^T)$; $\min_e$ показує, що з множини можливих у момент часу T станів e вибирається стан, що забезпечує мінімум функції $\min_{P_e^T} \Phi(P_e^T)$.

Рекурентний вираз, за допомогою якого оптимізується процес розвитку мережі за час t від стану e_0 до стану e , можна записати в такий спосіб:

$$f(t, e) = \min_{P_e^t} [q_0(e_0) + q_1(e_1) + \dots + q_t(e_t)]. \quad (1.25)$$

Для того щоб можна було використовувати результати попереднього кроку, функцію (1.25) варто привести до виду

$$f(t, e) = \min_{e_{t-1}^e} \left\{ q_t(e) + \min_{P_{e_{t-1}}^{t-1}} [q_0(e_0) + q_1(e_1) + \dots + q_{t-1}(e_{t-1})] \right\}, \quad (1.26)$$

де e_{t-1}^e - стан e_{t-1} , з якого можливий перехід у стан e ; $\min_{e_{t-1}^e}$ показує, що оптимізація виконується для станів e_{t-1} з яких можливий перехід у стан e . Для кроку $t-1$ функція виду (28) визначається за допомогою виразу

$$f(t-1, e_{t-1}) = \min_{P_{e_{t-1}}^{t-1}} [q_0(e_0) + q_1(e_1) + \dots + q_{t-1}(e_{t-1})]. \quad (1.27)$$

Після підстановки (1.27) в (1.26) одержуємо

$$f(t, e) = \min_{e_{t-1}^e} [q_t(e) + f(t-1, e_{t-1})]. \quad (1.28)$$

Так як складова цільової функції $q_t(e)$ не залежить від стану e_{t-1} , функцію (1.28) можна записати у вигляді

$$f(t, e) = q_t(e) + \min_{e_{t-1}^e} f(t-1, e_{t-1}). \quad (1.29)$$

Вираз (1.29) являє собою рекурентне співвідношення методу динамічного програмування, яке використовується на кожному кроці розвитку мережі.

При застосуванні методу динамічного програмування для оптимізації розвитку мережі організовується багатокроковий обчислювальний процес, на кожному кроці якого вирішується деяка множина завдань оптимізації функцій однієї змінної виду (1.29). Процес починається з першого кроку при $t=1$ та закінчується останнім при $t=T$.

Так як складова цільової функції на нульовому кроці розвитку мережі $q_0(e_0)$ вважається постійною, на першому кроці процесу оптимізації можна прийняти

$$f(t=1, e) = q_1(e). \quad (1.30)$$

На першому кроці оптимізації ще немає. Отримані для кожного можливого стану e значення функції $f(t=1, e)$ запам'ятовуються.

На кожному наступному t -у кроці визначається множина станів e_t , для кожного з яких визначається множина станів e_{t-1} (з них можливий перехід у стан e_t) і виконується розрахунок функції виду (1.29). Функція $f(t, e_t)$ відповідає мінімальному значенню цільової функції при розвитку мережі від e_0 до e_t . Отримані результати запам'ятовуються.

1.2.6. Метод гілок і границь

Метод гілок і границь відноситься до групи так званих комбінаторних методів, при використанні яких здійснюється спрямований частковий перебір припустимих рішень. На відміну від методів лінійного програмування метод гілок і границь дозволяє апроксимувати витрати на спорудження та експлуатацію лінії електропередачі виразом виду (1.14), що істотно підвищує точність апроксимації.

Сутність методу полягає в розбивці безлічі множини варіантів розвитку мережі на непересічні підмножини та послідовному відсіканні підмножин неперспективних рішень. При цьому кожній підмножині ставляться у відповідність так звані зовнішні й внутрішні оцінки.

Зовнішня оцінка y_k^e являє собою число, що завжди менше нижньої границі зміни функції приведених витрат для підмножини варіантів розвитку мережі e , що було отримано в результаті дроблення множини k

$$y_k^e \leq Z_k^e, \quad (1.31)$$

де Z_k^e - нижня границя зміни функції приведених витрат.

Внутрішня оцінка X_k^e являє собою величину приведених витрат для одного з можливих варіантів розвитку мережі підмножини e , що досить близька до нижньої границі зміни функції приведених витрат Z_k^e .

Нехай існує множина варіантів розвитку розглянутої електричної мережі γ_k . Розіб'ємо цю множину на дві не пересічні підмножини γ_k^m , γ_k^e і для кожного з них визначимо внутрішні та зовнішні оцінки - x_k^m , x_k^e , y_k^m і y_k^e . Якщо справедлива умова

$$x_k^m < y_k^e, \quad (1.32)$$

то підмножина варіантів розвитку мережі γ_k^e явно неперспективна, тому що приведені витрати на спорудження та експлуатацію одного з варіантів розвитку мережі підмножини γ_k^m виявилися менше нижньої границі функції приведених витрат для підмножини γ_k^e . Далі знову виконується дроблення підмножини

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k^e, \quad (1.33)$$

знову визначаються внутрішні та зовнішні оцінки підмножин, підмножина безперспективних варіантів і т.д.

Так як кількість можливих варіантів розвитку електричної мережі є кінцеве число, після виконання певної кількості кроків дроблення множини γ_k сукупність варіантів, що залишилися, розвитку виявиться настільки малою, що може бути визначена точна нижня границя зміни функції приведених витрат кожної з підмножин, що залишилися Z_k^i . Той варіант розвитку мережі, що відповідає меншій з нижніх границь, і є оптимальним.

Сутність методу гілок і границь ілюструє рис. 1.9.

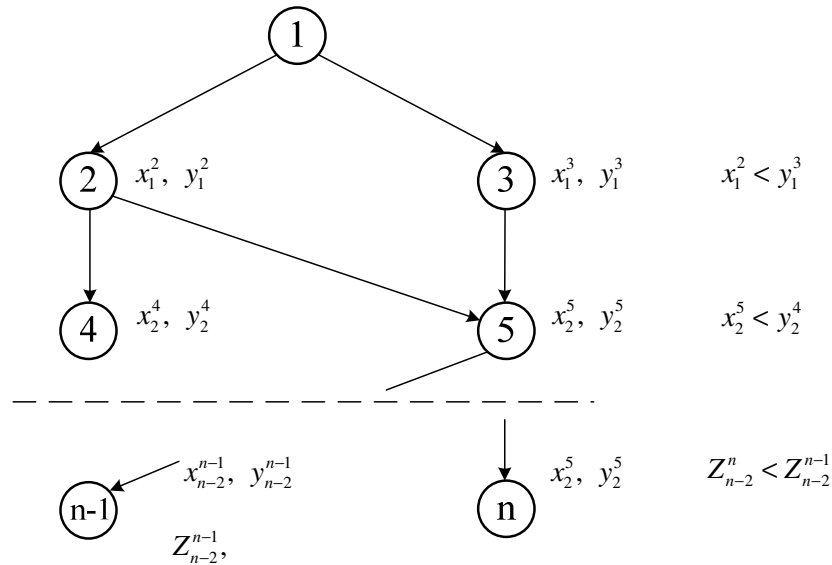


Рис. 1.9. Приклад дроблення підмножин для методу гілок та границь

Витрати на спорудження й експлуатацію електричної мережі можна визначити по формулі

$$Z = \sum_{i \in M} (a_i \delta_i + b_i |P_i|) \quad (1.34)$$

де M - множина можливих гілок мережі; $\delta_i = 0$, якщо $P_i = 0$; $\delta_i = 1$, якщо $P_i \neq 0$.

Завдання вирішується при наявності обмежень

$$\sum_{i \in M_j} P_i - P_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J-1,$$

де J - кількість пунктів мережі.

Точну нижню границю підмножини варіантів розвитку мережі можна визначити по формулі

$$Z_k^e = \min Z = \min \left[\sum_{i \in \alpha} (a_i \delta_i + b_i |P_i|) \right],$$

де α - множина елементів електричної мережі варіантів підмножини γ_k^e .

Уведемо позначення: $y_1 = \min \sum_{i \in \alpha} a_i$; $y_2 = \min \sum_{i \in \alpha} b_i |P_i|$, тоді в якості зовнішньої оцінки можна вибрати величину

$$y = y_1 + y_2 \leq Z_i^k$$

Слід зазначити, що перша складова відповідає найкоротшій електричній мережі, а друга являє собою мережу, отриману в результаті рішення в межах розглянутої підмножини транспортного завдання із проміжними перевезеннями.

Найкоротша електрична мережа, тобто мережа, для якої значення величини $\sum_{i \in \alpha} a_i$ мінімальне, може бути отримана з мережі, що містить всі можливі лінії, у результаті послідовного викреслювання ліній з найбільшим значенням величин a_i . При цьому не повинна бути порушена зв'язність схеми. Процес викреслювання триває доти, поки не буде отримана розімкнута мережа, що з'єднує всі пункти схеми.

В якості внутрішньої оцінки підмножини можна вибрати величину приведених витрат варіанта розвитку електричної мережі, що відповідає або найкоротшій електричній мережі, або мережі, отриманої у результаті рішення транспортного завдання. Крім того, величину x_i^k можна визначити з умови

$$x_i^k = \min\{3(y_1), 3(y_2)\}$$

При рішенні завдання вибору оптимального варіанта розвитку мережі дроблення підмножин здійснюється по ознаці наявності або відсутності в розглянутій підмножині тієї або іншої гілки. При цьому підмножина варіантів, що містять гілки i , позначається $\gamma(i)$, а підмножина варіантів без гілки $i - \gamma(\bar{i})$.

При рішенні розглянутого завдання кількість аналізованих варіантів розвитку мережі може виявитися настільки великою, що одержання точного рішення буде ускладнено навіть при використанні сучасних ЕВ. Тому доцільно ввести критерій примусового закінчення оптимізації. Природно, що в цьому випадку буде отримано вже не точне, а наближене рішення. В якості такого критерію можна використовувати величину

$$\delta = x_{k \min} - y_{k \min},$$

де $x_{k \min}$ - мінімальна внутрішня оцінка підмножин, отриманих у результаті дроблення множини k ; $y_{k \min}$ - мінімальна зовнішня оцінка. Процес оптимізації вважається закінченим, якщо буде справедлива нерівність $\delta \leq \varepsilon$.

Підбиваючи підсумок сказаному, сформулюємо алгоритм оптимізації розвитку електричної мережі методом гілок і границь [3; 7].

1. Розглядаючи множину всіх можливих варіантів розвитку електричної мережі γ , визначаємо найкоротшу електричну мережу, для якої значення величини $\sum_{i \in \alpha} a_i$ - мінімальне. Визначаємо величину

$$y_1 = \sum_{i \in \alpha} a_i$$

для цієї мережі і витрати на її спорудження та експлуатацію x_1 .

2. Вирішуємо транспортне завдання із проміжним перевезеннями для мережі, що містить всі припустимі лінії зв'язку. Для оптимальної електричної мережі знаходимо величину

$$y_2 = \sum_{i \in \alpha} b_i |P_i|$$

і приведені витрати на її спорудження та експлуатацію x_2 .

3. Знаходимо внутрішню та зовнішню оцінки розглянутої множини варіантів розвитку електричної мережі:

$$y_0 = y_1 + y_2; \quad x_0 = \min\{x_1, x_2\}$$

і приймаємо множину γ_0 як вихідну множину аналізованих варіантів γ_k .

4. Вибираємо чергову лінію i , наявність або відсутність якої - ознака дроблення множини варіантів розвитку мережі γ_k . Розбиваємо множину γ_k на дві підмножини:

$$\gamma_k = \gamma_k(i) + \gamma_k(\bar{i}).$$

5. Визначаємо зовнішні та внутрішні оцінки для підмножини варіантів розвитку мережі $\gamma_k(i)$, в якій є лінія i , і підмножини $\gamma_k(\bar{i})$, в якій дана лінія відсутня, $-y_k(i)$, $x_k(i)$, $y_k(\bar{i})$, $x_k(\bar{i})$.

6. Якщо справедлива нерівність

$$x_k(i) < y_k(\bar{i})$$

то відкидається підмножина варіантів розвитку, в якій відсутня гілка i :

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k(\bar{i});$$

якщо справедлива нерівність

$$x_k(\bar{i}) < y_k(i),$$

то відкидається підмножина γ_{k+1} :

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k(i).$$

7. Чи можна в отриманій підмножині γ_{k+1} визначити точну нижню границю зміни приведених витрат Z_{k+1} ?

Якщо так, то приймаємо варіант розвитку електричної мережі, що відповідає Z_{k+1} , у якості оптимального та переходимо до п.8 алгоритму. Якщо ні, то змінюємо номер кроку оптимізації $k = k + 1$ та переходимо до п.4 алгоритму.

8. Кінець.

Для визначення зовнішніх і внутрішніх оцінок на кожному кроці оптимізації у п.5 алгоритму повинні бути знайдені найкоротші електричні мережі та вирішені транспортні завдання із проміжними перевезеннями для підмножин варіантів розвитку електричної мережі $\gamma_e(i)$ й $\gamma_e(\bar{i})$.

Необхідно відзначити, що так як кількість дроблень підмножин залежить від порядку розгляду припустимих гілок електричної мережі, ефективність використання методу гілок і границь в істотній мірі залежить від ефективності алгоритму вибору гілки i на кожному кроці оптимізації.

У зв'язку з тим, що при використанні методу гілок і границь на кожному кроці оптимізації необхідно визначати найкоротшу електричну мережу і вирішувати транспортне завдання із проміжними перевезеннями, із збільшенням обсягу електричної мережі різко зростає кількість необхідних обчислень і аналізованих схем, а це ускладнює широке поширення методу.

Тема 3.4. Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем.

Загальна характеристика застосовуваних методів лінійного програмування. Приведення задачі оптимізації розвитку електричних мереж до задачі лінійного програмування. Метод найменших квадратів. Область застосування аналізованої групи методів.

Застосування методу для визначення оптимальної конфігурації електричних мереж. Транспортна задача. Упорядкування транспортної матриці. Алгоритм рішення транспортної задачі. Транспортна задача з проміжними перевезеннями. Метод економічних потенціалів. Алгоритм методу.

Методичні вказівки

Перш ніж почати вивчення даної теми, необхідно повторити основні поняття та визначення лінійного програмування, основи симплекс-методу. Варто звернути увагу на прийняті допущення, що спрощують, алгоритмічну реалізацію, переваги та недоліки досліджуваних методів.

У процесі розробки матеріалу теми необхідно вивчити:

- 1) загальну характеристику застосовуваних методів лінійного програмування;
- 2) метод найменших квадратів;
- 3) застосування симплекс-методу для оптимізації розвитку електричних мереж;
- 4) транспортне завдання, загальні положення;
- 5) складання транспортної матриці;
- 6) розрахунок симплекс-множників;
- 7) алгоритм рішення транспортного завдання;
- 8) транспортне завдання при наявності резерву потужності в енергосистемі;
- 9) транспортне завдання із проміжними перевезеннями;
- 10) метод економічних потенціалів.

Тема 3.4. Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем.

Загальна характеристика застосовуваних методів лінійного програмування. Приведення задачі оптимізації розвитку електричних мереж до задачі лінійного програмування. Метод найменших квадратів. Область застосування аналізованої групи методів.

Застосування методу для визначення оптимальної конфігурації

електричних мереж. Транспортна задача. Упорядкування транспортної матриці. Алгоритм рішення транспортної задачі. Транспортна задача з проміжними перевезеннями. Метод економічних потенціалів. Алгоритм методу.

Методичні вказівки

При вивченні даного матеріалу варто звернути увагу на особливості застосування математичних методів для рішення задач оптимізації розвитку електричних мереж, основні переваги й недоліки застосовуваних методів.

Перш ніж почати відпрацьовувати матеріал, необхідно повторити розділи дисципліни, де розглядаються математичні основи методу динамічного програмування.

У процесі вивчення необхідно звернути увагу на вивчення наступних питань.

2. ТЕМАТИКА ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практичні заняття дозволяють більш заглиблено проробити теоретичний матеріал, викладений на лекціях, придбати навички практичного використання досліджуваних методів і алгоритмів.

Практичні заняття охоплюють основні розділи лекційного курсу та містять наступні теми:

1. Лінійна модель оптимізації структури генеруючих потужностей (4 години).
2. Симплекс-метод (4 години)..
4. Приклад оптимізації структури генерувальних потужностей за допомогою симплекс-методу (4 години)..
5. Приклад оптимізації генеруючих потужностей за допомогою динамічного програмування (4 години)..
6. Застосування градієнтних методів для оптимізації розвитку генеруючих потужностей (2 години)..

3. ІНДИВІДУАЛЬНІ СЕМЕСТРОВІ ЗАВДАННЯ

Навчальний план спеціальності студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» передбачає виконання розрахунково-графічної та курсової роботи. Для студентів освітніх програм «Електричні станції» та «Управління, захист та автоматизація енергосистем» планується виконання розрахунково-графічної роботи

Метою виконання курсової роботи є практичне закріплення студентами основ теоретичного матеріалу, викладеного в дисципліні "Моделі оптимального розвитку енергосистем". У курсовій роботі вирішуються задачі визначення оптимальної структури потужностей по видах енергоресурсів і типам електростанцій, оптимізації розвитку електростанцій в енергосистемах

і проектування електричної мережі енергосистеми. При рішенні першої задачі знаходяться найбільше вигідні пропорції розвитку груп електростанцій різноманітного типу, що відрізняються видом використання енергоресурсу, розходженням у засобах виробництва електроенергії й типом основного устаткування. У рамках другої і третьої задач приймаються рішення по вибору місць розміщення й потужностей конкретних електростанцій, проектуванню електричної мережі.

Вихідною інформацією для рішення задач оптимізації розвитку потужностей енергосистем є техніко-економічні характеристики можливих типів електростанцій і ліній електропередачі, якісні й кількісні характеристики можливих до використання енергоресурсів, потреба узагальнених енерговузлів енергосистем у потужності й енергії, район спорудження, обсяг капіталовкладень і т.п.

Курсова робота містить у собі такі розділи: розробка лінійної моделі оптимізації структури потужностей енергосистеми, рішення задачі оптимізації структури за допомогою симплекс-методу, побудова спрощеної моделі оптимізації розвитку групи електростанцій одного з узагальнених енерговузлів, рішення задачі оптимізації розвитку електростанцій методами динамічного програмування й оптимізація розвитку електричної мережі методом поконтурної оптимізації.

Розрахунки по окремих розділах курсової роботи з необхідним ступенем точності можуть виконуватися як при використанні звичайних обчислювальних засобів, так і комп'ютерів.

У розрахунково-графічній роботі вирішуються задачі визначення оптимальної структури потужностей. При рішенні знаходять найбільш вигідні пропорції розвитку групи електростанцій різноманітного типу, що відрізняються видом використовуваного енергоресурсу, розходженням у засобах виробництва електроенергії й типом основного устаткування.

4. НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Основні інформаційні ресурси:

1. Моделі оптимального розвитку енергосистем. Методичні вказівки до вивчення дисципліни / В.А. Баженов. – К.: НТУУ «КПІ». – 2008. 40 с.
2. Методи оптимізації режимів енергосистем. Методичні вказівки до виконання курсової роботи./ В.А. Баженов. - К: НТУУ «КПІ», 2013, – 28 с.
3. Баженов В.А., Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И. Оптимизация режимов электрических сетей. – Киев: Наукова думка, 1992. – 216 с.
4. Модели оптимального развития энергосистем /В.А.Баженов. Учеб. Пособие. – Киев: КПИ, 1984. – 100 с.

Додаткові

5. Модели оптимизации развития энергосистем: Учебн. для электроэнергет. спец. вузов/ Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мизин /Под ред. Д. А. Арзамасцева. – М.: Высш. школа, 1987. –272 с.

6. Веников В.А., Идельчик В.И. Электрические станции, сети и системы. т.7. Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики (оптимизация развития функционирования). Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1974. – 250 с.

7. Дале В.А., Кришан З.П., Паэгла О.Г. Динамическое программирование в расчетах развития сетей энергосистем. – Рига: Зинатне, 1979. – 260 с.

8. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: Учебн. пособие для вузов / Щербачев О.В., Зейлигер А.Н., Кадомская К.П. и др. – Л.: Энергия, 1980. – 240 с.

9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

10. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей /специальные вопросы/. – М.: Высш. школа, 1975. –280 с.