

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

НЕТРЕБСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.311.161

**ОПТИМІЗАЦІЯ НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ЗАСАДАХ
ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Лежнюк Петро Дем'янович,

Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій і систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Сивокобиленко Віталій Федорович,

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
завідувач кафедри електричних станцій.

доктор технічних наук, професор

Бурбело Михайло Йосипович,

Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та
енергетичного менеджменту.

Захист відбудеться « 4 » травня 2012 р. о 9.30 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою:
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного
університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий « 3 » квітня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час в енергетиці України продовжують вдосконалюватися ринкові форми, очікується зростання електричного навантаження, інтелектуалізуються електричні мережі енергосистем. З впровадженням балансуєчого ринку електроенергії та двосторонніх договорів електропостачання, з розвитком сучасних інформаційних технологій ряд задач в електроенергетичних системах (ЕЕС) і методи їх розв'язання необхідно вдосконалювати. Зокрема до таких задач відноситься задача оптимізації нормальних режимів ЕЕС.

Нормальні стани ЕЕС відрізняються між собою параметрами режиму і кількістю електроенергії, що витрачається на її передачу від джерел до споживачів (втрати електроенергії). При зміні будь-якого з параметрів в ЕЕС встановлюється новий режим, що характеризується певними значеннями втрат електроенергії. Не завжди наявність існуючого механізму зворотних зв'язків, завдяки якому здійснюється саморегулювання системи, може забезпечити режим, найвигідніший з погляду мінімуму втрат електроенергії і її якості. Таким чином, цю властивість ЕЕС як штучної системи кібернетичного типу необхідно розвивати. Для цього з різною ефективністю використовуються числові методи лінійного і нелінійного програмування. Загальним їх недоліком є те, що вони дають часткові розв'язки. У даній роботі досліджується можливість формування умов самооптимізації нормальних режимів ЕЕС на основі принципу найменшої дії (ПНД). Застосування ПНД розглядається щодо функціонування ЕЕС з метою забезпечення умов для їх самоорганізації або самооптимізації у відповідності з заданим критерієм оптимальності – втратами потужності (електроенергії).

Перенесення закономірностей довільних систем на електроенергетичну систему дозволяє стверджувати, що у будь-який момент часу функціонування для поточної сукупності параметрів системи та незалежних параметрів режиму ЕЕС знаходиться в оптимальному стані з точки зору втрат електроенергії, але глибина даного оптимуму зумовлена мірою ідеальності (економічності) самої системи. Сприяння природному розвитку ЕЕС, тобто підвищенню міри її ідеальності, дозволяє завдяки механізмам самооптимізації забезпечувати зниження втрат електроенергії незалежно від її навантаження. Саме це є суттєвою перевагою даного підходу порівняно з класичною оптимізацією. Підвищення міри ідеальності ЕЕС забезпечується розвитком її у двох напрямках: шляхом оптимізації параметрів системи та за рахунок насичення системи від'ємними зворотними зв'язками. Обидва напрямки є взаємопов'язаними і для забезпечення максимального системного ефекту мають розглядатися в комплексі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами «Самооптимізація електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії» (№ держреєстрації 0104U000742) та «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є зменшення витрат під час виробництва та транспортування електроенергії шляхом використання математичних моделей і методів оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі основні завдання:

- аналіз методів математичного моделювання в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС;
- дослідження як проявляється ПНД в електротехніці;
- узагальнення можливостей і шляхів використання ПНД для моделювання оптимальних станів ЕЕС;

- розроблення методів, математичних моделей та алгоритмів оптимізації нормальних станів ЕЕС за активною потужністю, за реактивною потужністю та напругою, а також комплексної оптимізації на основі ПНД;

- використання ПНД для вдосконалення і автоматизації оптимального керування режимом ЕЕС, в тому числі найвигіднішого розподілу навантаження між електростанціями;

- встановлення ефективності розроблених методів, математичних моделей та алгоритмів на тестових і реальних електричних системах.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими електроенергетичних систем.

Предметом дослідження є методи комплексної оптимізації нормальних режимів ЕЕС по активній і реактивній потужностях та способи оптимального керування потоками потужності у замкнених електричних мережах.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані математичний апарат варіаційного числення, узагальнювальні методи теорії подібності і моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими моделюються та аналізуються на базі методів контурних струмів та вузлових напруг із застосуванням методів Гаусса та Ньютона. Для формування законів оптимального керування використовувалися матрична алгебра, теорія графів та ПНД. Для розробки систем автоматичного керування використано положення теорії автоматичного керування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що показана доцільність і ефективність застосування принципу найменшої дії для моделювання оптимальних режимів електроенергетичних систем, що дозволяє використати здатність їх до самооптимізації під час розрахунків і практичної реалізації керуючих впливів. Зокрема:

- вперше запропонована математична модель умов оптимальності нормальних режимів ЕЕС на основі принципу Гамільтона-Остроградського, що дозволило побудувати процес оптимального керування режимами ЕЕС від ідеального (економічного) режиму до оптимального з врахуванням активних обмежень;

- розвинуто метод оптимізації режимів електроенергетичної системи по активній і реактивній потужностях з використанням принципу найменшої дії, який зводиться до розрахунків режимів ЕЕС за її заступною R -схемою, де джерела електроенергії представлені характеристиками економічних опорів, що дає змогу формувати умови ефективнішого використання джерел активної та реактивної потужностей зі зменшенням втрат електроенергії в електричних мережах під час її транспортування;

- вдосконалено адаптивну систему керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму, а електростанції представлені їх характеристиками економічних опорів, що дає змогу модернізувати систему автоматичного керування режимами ЕЕС, в тому числі розподілом навантаження між електростанціями, і, таким чином, підвищити ефективність виробництва і транспортування електроенергії.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено алгоритм та програму визначення економічного режиму ЕЕС, який характеризується мінімально можливими за даних експлуатаційних умов втратами, а також запропоновано алгоритм та програму коригування законів оптимального керування та керуючих впливів локальної адаптивної системи автоматичного керування (САК) у відповідності до змін розрахункових умов в ЕЕС і параметрів економічного режиму. Це дає можливість вдосконалити процес оптимізації режимів електричних мереж енергосистеми.

Як частина АСДК ЕЕС розроблено розподілений обчислювальний комплекс для оптимізації роботи електростанцій в енергосистемі в темпі процесу. Він реалізований в обчислювальному середовищі *TRACE MODE*, в ньому використовується база даних ОІК, а електростанції моделюються їх характеристиками економічних опорів.

Результати дослідження, які отримані в дисертації, передано для дослідної експлуатації в Південно-Західній електроенергетичній системі. Очікується, що доповнення

програмних комплексів аналізу чутливості та оптимізації втрат потужності (АЧП) та “Втрати–110” програмою формування законів оптимального керування втратами потужності з врахуванням стійких закономірностей між параметрами режиму ЕЕС дозволить підвищити ефективність використання трансформаторів з РПН та джерел електроенергії і додатково знизити втрати електроенергії в мережах енергосистеми на 0,5–0,7 %. Що підтверджено відповідною довідкою про впровадження від 22.09.2010 р.

Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі «Електричні станції та системи» для підготовки фахівців за спеціальностями 7.05070101 «Електричні станції» та 7.05070102 «Електричні системи та мережі», довідка про впровадження від 16.03.2010 р.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

В роботах, опублікованих у співавторстві автору належать: [1] – на підставі принципу найменшої дії показані шляхи використання математичної моделі для оптимізації розподілу навантаження між електростанціями, [2] – обґрунтована можливість побудови на основі принципу найменшої дії математичних моделей для визначення оптимальних станів складних систем, [3] – на основі принципу найменшої дії систематизовані, відомі раніше як формальні, аналогії між електричними та механічними явищами, [4] – на підставі принципу найменшої дії показані шляхи використання математичної моделі для оптимізації керування режимами ЕЕС, [5] – досліджено проблеми створення умов самооптимізації електричних систем, [6] – визначено можливість розрахунку оптимального струморозподілу, коли електричні станції представлені в заступній схемі активними опорами, [7] – розроблені модель і метод комплексної оптимізації режимів ЕЕС, [8] – розраховані економічні опори електричних станцій (ЕС), [9] – розроблено алгоритм розрахунку оптимального навантаження ЕС.

Результати досліджень отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях: на II міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи» (м. Тернопіль, 2005); на V міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (м. Львів, 2007); на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: "Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов" (г. Благовещенск, 2008); на IX міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008)» (м. Вінниця, 2008); на 2nd *International conference on Inductive Modelling (ICIM'2008)* (Kyiv, 2008); на 6-ій міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (м. Львів, 2009); на Міжнародній науковій конференції «Моделювання–2010» («*Simulation-2010*») (м. Київ, 2010); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем» (м. Донецьк, 2011); на I Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 7 статей у фахових наукових виданнях, а також 2 статті у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Структура й обсяг роботи Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (100 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 115 сторінках друкованого тексту, містить 28 рисунків, 8 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 154 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому** розділі проаналізовано стан та проблеми оптимального керування нормальними режимами електроенергетичних систем з урахуванням сучасних особливостей в електроенергетиці. Проведено аналіз особливостей загальноприйнятих методів розрахунків оптимальних режимів ЕЕС, зокрема модифікації градієнтного методу, та обґрунтовано можливість використання ПНД як метода оптимізації в електротехніці та оптимальному керуванні режимами ЕЕС.

Суть градієнтних методів полягає в тому (рис. 1,а), що вибирається початкове наближення $x^{(0)}[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$ в області допустимих розв'язків **D** і далі, за тією чи іншою обчислювальною схемою, здійснюється спуск в область оптимальності. За ПНД застосовується інший алгоритм (рис. 1,б): знаходиться ідеальний з мінімально можливими в заданих умовах втратами потужності стан системи $x_e[x_{1e}, x_{2e}]$, який, як правило, знаходиться поза допустимою областю **D**; далі здійснюється введення режиму в допустиму область з точки $x_e[x_{1e}, x_{2e}]$ в точку $x_o[x_{1o}, x_{2o}]$, в якій виконуються всі обмеження, але втрати є більшими. Зауважимо, що при використанні градієнтних методів обчислювальний процес будуватиметься навпаки – здійснюється не підйом, а спуск з рівня більших втрат (точка початкового наближення $x^{(0)}[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$) на рівень з меншими втратами.

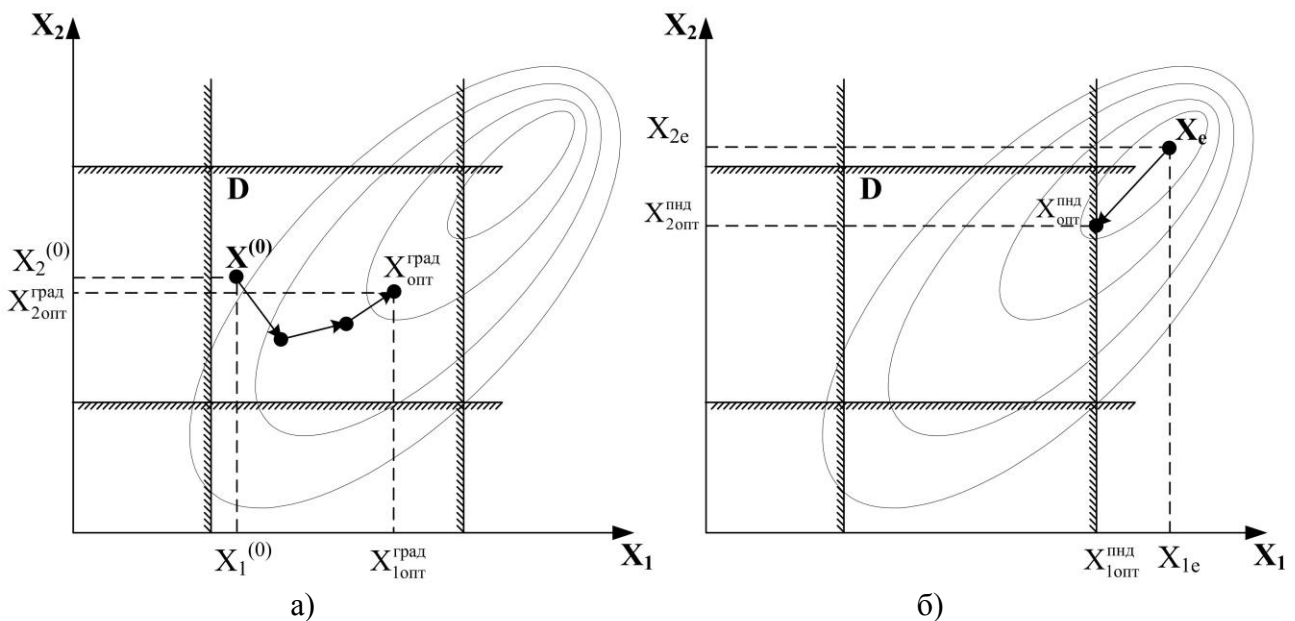


Рисунок 1 – Рівні втрат потужності в системі за різних значень параметрів режиму

а) за градієнтним методом, б) за принципом найменшої дії

Для реалізації загальносистемного ефекту, тобто зменшення втрат електроенергії не тільки у виокремлених елементах і частинах ЕЕС, і досягнення компромісних рішень між учасниками виробництва, транспортування і розподілу електроенергії доцільним є застосувати здатність ЕЕС до самооптимізації їх режимів. В задачі оптимального керування можуть виникати дві підзадачі – оперативне визначення чисельного значення критерію оптимальності для його структурування й аналізу та формування законів керування (умов оптимальності) для автоматизації процесу оптимального керування. Методом, в рамках

якого можуть ефективно розв'язуватися обидві підзадачі, є принцип найменшої дії, відомий також як варіаційний принцип Гамільтона-Остроградського.

Огляд методів та засобів оптимального керування нормальними режимами електроенергетичних систем дозволяє зробити такі висновки:

1. Економічність процесу транспортування та розподілу електричної енергії в ЕЕС в великій мірі визначається мірою оптимальності поточних режимів системи. На сьогодні розроблено низку режимних заходів, спрямованих на оптимізацію нормальних режимів ЕЕС, але вони є не достатньо дієвими в умовах підвищених вимог до ефективності оперативного керування режимами.

2. Враховуючи характерні особливості ЕЕС як об'єкта керування, а також необхідність реалізації керування технологічними процесами в умовах неповноти та недостовірності поточної інформації про стан об'єкту та зовнішні впливи, доцільним є перехід до часткової децентралізації керування з використанням адаптивних систем автоматичного керування. Разом з тим застосування саморегульованих систем керування, побудованих на засадах ПНД, дозволяє не втратити системного ефекту щодо мінімізації сумарних втрат потужності в електричних мережах.

У **другому розділі** розроблені математичні моделі умов самооптимізації нормальних режимів ЕЕС, запропонована математична модель умов оптимальності нормальних режимів ЕЕС на основі принципу Гамільтона-Остроградського, розвинуто метод роздільної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужностях з використанням ПНД, що зводиться до розрахунків режимів за заступною R-схемою, в якій джерела електроенергії представлені характеристиками економічних опорів, обґрунтована можливість застосування такого підходу для комплексної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужностях.

Відомо, що струморозподіл в реальній ЕЕС через її неоднорідність не є оптимальним і супроводжується втратами електроенергії. Показано, що найменші втрати електроенергії, які можливі в ЕЕС за заданих навантажень у вузлах, відповідають струморозподілу, розрахованому за її заступною R-схемою. Цей висновок щодо економічного струморозподілу в ЕЕС ґрунтується на проявленні в електроенергетиці принципу найменшої дії.

В роботі показано, що математичне моделювання з використанням ПНД може бути поширений на процес оптимального розподілу навантаження між електростанціями в енергосистемі. При цьому станція в заступній схемі представляється активним опором, вартість втрат електроенергії в якому дорівнює витратам на виробництво такої ж кількості електроенергії на станції. Значення таких активних опорів, вартість втрат електроенергії на яких еквівалентна затратам на виробництво електроенергії на кожній із станцій, визначаються як

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2\psi_i}{P_i^2 \cdot c}, \quad (1)$$

де $B_i(P_i)$ – витратна характеристика і-ої електростанції; P_i – потужність генерування і-ої електростанції; U_i – напруга на шинах і-ої електростанції; ψ_i – ціна тони умовного палива на і-й станції; c – вартість 1 кВт·год втрат електроенергії.

Представлені в такому вигляді економічні характеристики станцій відповідають моделі оптимізації режиму ЕЕС з використанням ПНД. Опори R_{ei} є нелінійними функціями витратних характеристик та навантаження станції P_i . На рис. 2 показано приклад залежностей $R_{ei} = f(P_i)$ для трьох станцій, витратні характеристики яких апроксимовано квадратичними поліномами.

Розмістивши джерела електричної енергії за розрахованими таким чином опорами (рис. 3), можна замінити визначення сумарних витрат на виробництво електроенергії розрахунком поточкорозподілу в заступній схемі, складеній тільки із активних опорів елементів мережі та економічних опорів електричних станцій. Розрахунок такого

потокорозподілу не викликає складнощів і може бути виконаний будь-яким відомим методом.

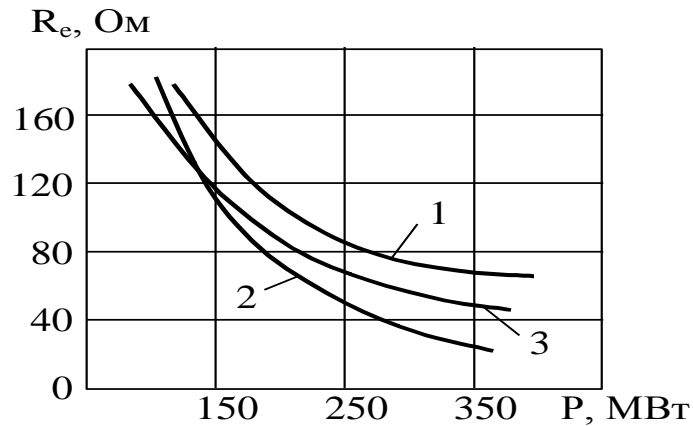


Рисунок 2 – Приклад характеристик економічних опорів (ХЕО) ЕС

Тобто визначення оптимального навантаження станцій зводиться до розрахунку усталеного режиму ЕЕС за її заступною R-схемою. Для підтвердження даного висновку, сформулюємо задачу оптимізації розподілу навантаження між електростанціями так:

$$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^s 3R_{ei} I_i^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

за умов балансу потужності в ЕЕС

$$P_1 + P_2 + \dots + P_s - P_{nc} - V_c = 0 \quad (3)$$

$$i \quad P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, \quad i = \overline{1, s},$$

де P_{nc} – сумарне навантаження ЕЕС; V_c – сумарні втрати активної потужності в системі.

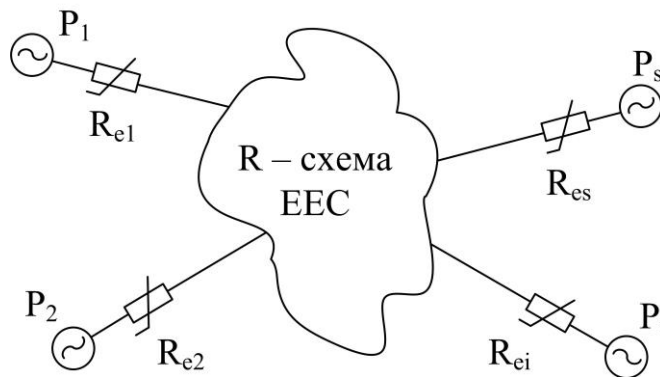


Рисунок 3 – Електрична схема ЕЕС з економічними опорами

Запишемо функцію Лагранжа :

$$L = \sum_{i=1}^s 3R_{ei} I_i^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^s P_i - P_{nc} - V_c \right). \quad (4)$$

Після підстановки значень економічних опорів (1)

$$L = \sum_{i=1}^s B_i(P_i) \frac{u_i}{c} + \lambda \left(\sum_{i=1}^s P_i - P_{nc} - V_c \right). \quad (5)$$

З умов $\partial L / \partial P_i = 0$, $i = \overline{1, s}$ отримаємо критерій найвигіднішого розподілу навантаження між електричними станціями:

$$\frac{y_i b_i}{1 - \sigma_i} = idem, \quad i = \overline{1, s}, \quad (6)$$

де $b_i = \partial B_i / \partial P_i$ – відносні прирости витрат палива на станціях; $\sigma_i = \partial V_c / \partial P_i$ – відносні прирости втрат активної потужності в ЕЕС.

Тобто, приходимо до відомих умов оптимального розподілу навантаження ЕЕС між станціями. Розрахунок усталеного режиму ЕЕС, де станції представлені економічними опорами R_{ei} , приводить до того ж результату, що й мінімізація методом Лагранжа або, наприклад, градієнтним методом.

Задача оптимального розподілу навантаження між джерелами реактивної потужності по аналогії може бути зведена до розрахунку усталеного режиму ЕЕС з заступною R -схемою, в якій ДРП представляються нелінійними економічними опорами. Значення їх залежить від того, як компенсуються на електростанціях втрати електроенергії в ЕЕС від потоків реактивної потужності. Критерій оптимальності ЕЕС по реактивній потужності міняється в залежності від того як представлені в розрахунковій моделі електростанції – витратними характеристиками чи вартістю відпущеної з шин електроенергії. Наприклад, якщо станція в ЕЕС задається не витратною характеристикою $B_j(P_j)$, а відпускнуою ціною електроенергії з її шин β , в припущенні, що втрати від перетоків реактивної потужності i -го вузла V_{Qi} покриваються j -ою станцією P_j , то відповідно економічний опір визначається як

$$R_{ei} = \frac{\sum_{j=1}^s (P_j \beta_j) k_i U_i^2}{c Q_i^2}, \quad (7)$$

де P_j – потужність, що відпускається з шин станції на покриття втрат в електричній мережі від потоків реактивної потужності; β_j – вартість 1 кВт · год електроенергії, відпущеної з шин j -ої станції; k_i – частка втрат i -го вузла у загальних втратах від перетоків реактивної потужності.

Якщо джерела реактивної потужності умовно розмістити за розрахованими таким чином опорами, то можна замінити визначення сумарних витрат на покриття втрат електроенергії від перетоків реактивної потужності розрахунком поточкорозподілу в заступній схемі ЕЕС, складеній тільки з активних опорів її елементів. Розрахований поточкорозподіл буде відповідати критерію оптимальності мінімуму витрат на генерування і транспортування реактивної потужності в ЕЕС, тобто

$$\frac{\partial V_Q / \partial Q_i}{1 - \partial \Delta Q / \partial Q_i} \cdot \frac{\beta}{c} = idem. \quad (8)$$

Критерій оптимальності навантаження ДРП отриманий за умови, що питома вартість виробленої на станціях електроенергії, яка йде на покриття втрат в ЕЕС β , і питома вартість втрат електроенергії в системі c є постійними на інтервалі часу T , тобто, $\beta/c = const$.

Метод роздільної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужності з використанням ПНД, що зводиться до розрахунків режимів за заступною R -схемою, може бути поширений і на комплексну оптимізацію ЕЕС по активній і реактивній потужностях. В цьому випадку в економічних опорах станцій враховуються втрати активної потужності в ЕЕС від потоків реактивної потужності, яка генерується як електростанціями, так джерелами реактивної потужності (рис. 4).

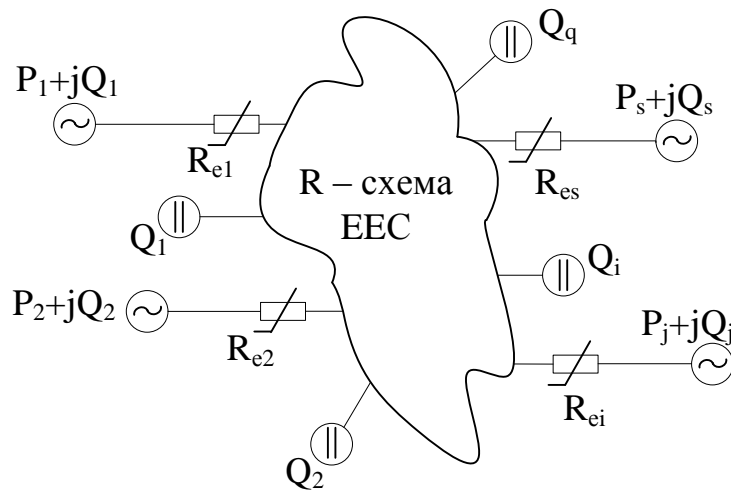


Рисунок 4 – Заступна схема ЕЕС з економічними опорами для комплексної оптимізації її нормальних режимів

Задачі оптимізації нормальних режимів ЕЕС за напругою і реактивною потужністю та комплексної оптимізації розглянуті як без врахування вартості генерування реактивної потужності на станціях та джерелами реактивної потужності, так і з врахуванням цієї вартості. В експлуатаційних задачах ця вартість визначається активною потужністю на станціях і в ДРП, яка витрачається на генерування реактивної потужності.

Для врахування втрат, пов'язаних з генеруванням реактивної потужності R_e станції збільшується на відповідну величину. Ці втрати визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{Q}{Q_{ном}} D_1 + \frac{Q^2}{Q_{ном}^2} D_2, \quad (9)$$

де D_1 і D_2 – постійні коефіцієнти, які залежать від типу і потужності генератора. Отримані ΔP_{Γ} додаються до потужності станції і, відповідно, збільшується її економічний опір на $R_{e\text{ дод}}$, тобто

$$R'_{ei} = R_{ei} + R_{e\text{ дод}}. \quad (10)$$

Якщо оптимізація режиму ЕЕС здійснюється з врахуванням втрат активної потужності в ДРП, то ці втрати розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{дрп} = p_{num} Q, \quad (11)$$

де p_{num} – питомі втрати активної потужності в ДРП.

Для врахування цих втрат при оптимізації режиму ЕЕС ДРП розміщається за економічним опором, значення якого визначається за формулою:

$$R_{e\text{ дрп } i} = \frac{p_{num} U_i^2}{Q_i}. \quad (12)$$

Таким чином при оптимізації нормальних режимів ЕЕС враховуються втрати активної потужності на генерування реактивної потужності. Щодо решти обмежень, то балансні обмеження і обмеження на значення P і Q станцій і ДРП враховуються в процесі розрахунку усталеного режиму.

В **третьому розділі** розроблені алгоритми, структура адаптивних систем керування та функціональні схеми використання ПНД для вдосконалення керування нормальними режимами ЕЕС. На основі розроблених алгоритмів модифіковано програмні комплекси «АЧП» та «ВТРАТИ-110» з метою розширення їх можливостей для задач комплексної оптимізації режимів ЕЕС.

З використанням закономірностей, які отримані на підставі ПНД, є можливість визначення і реалізації оптимальних режимів ЕЕС в темпі процесу, а також пристосування засобів оптимізації до умов, що постійно змінюються. Розглянуто два варіанти реалізації такого підходу: під час оперативного керування режимом ЕЕС і шляхом автоматизації оптимального керування. В першому випадку для прийняття рішень розроблені алгоритми і програми для ЕОМ. Це алгоритми оптимізації режимів ЕЕС за активною та реактивною потужністю, напругою та коефіцієнтами трансформації. У випадку застосування систем автоматичного керування (САК) – адаптивна система керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель економічного режиму ЕЕС, та апаратно-програмний обчислювальний комплекс оптимізації роботи джерел електроенергії в енергосистемі в середовищі *TRACE MODE*.

Відповідно до запропонованого методу оптимізації нормальних режимів ЕЕС розроблено алгоритм його практичної реалізації. На рис. 5 наведено структурну схему програмного комплексу, який складається з таких блоків: оптимізація режиму ЕЕС по активній потужності; оптимізація режиму ЕЕС по реактивній потужності, напрузі і коефіцієнтах трансформації; комплексна оптимізація по активній і реактивній потужностях та напрузі.

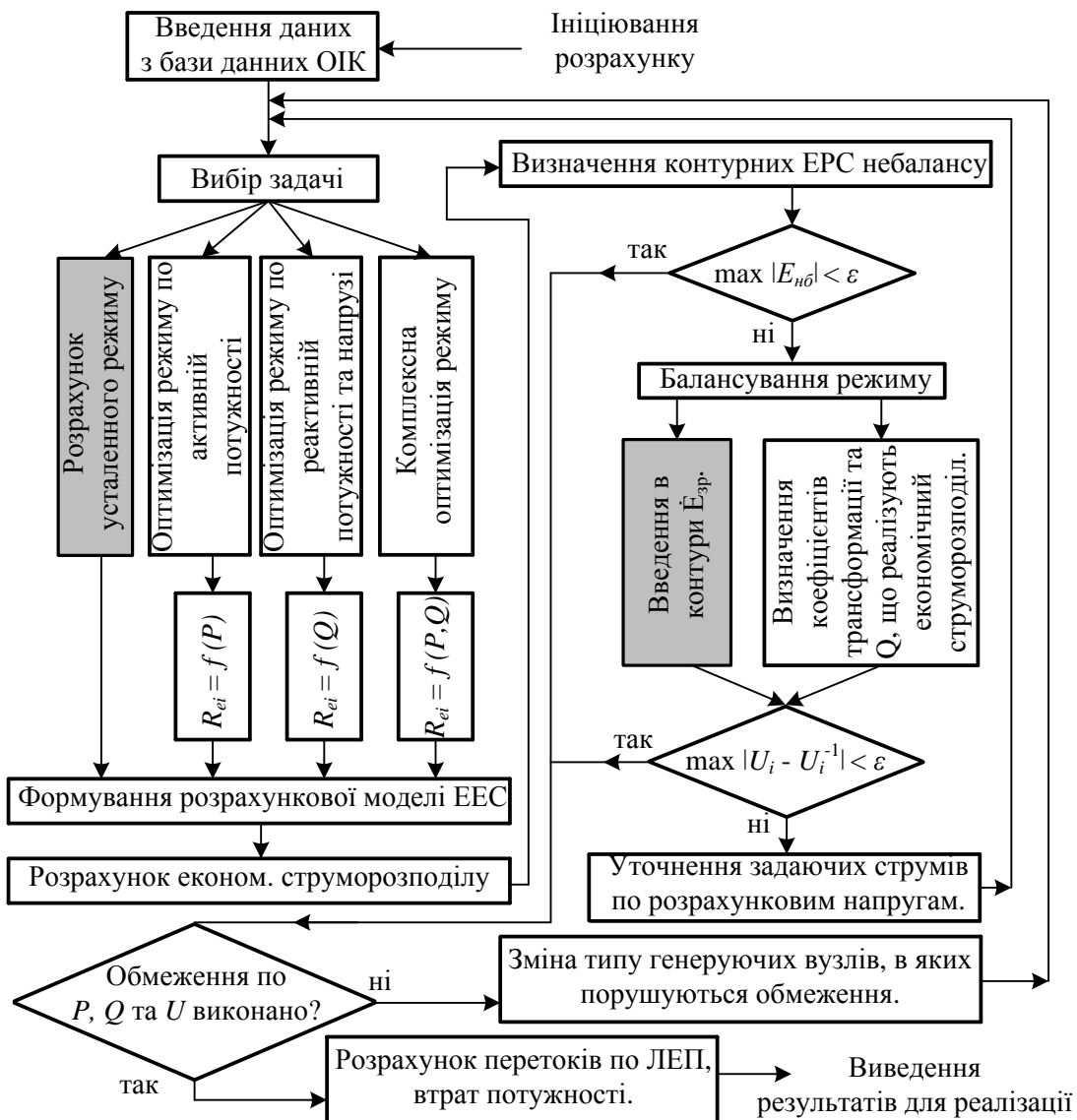


Рисунок 5 – Структурна схема ПК оптимізації режимів ЕЕС

Характерною його особливістю є адаптованість до зміни критерію оптимальності режимів ЕЕС у відповідності до зміни форм господарювання. При зміні суб'єктів господарювання (власників електроенергетичних установок) класична постановка задачі оптимізації режимів ЕЕС і методи її розв'язування вимагають вдосконалення. В алгоритмі розрахунку, оснований на ПНД, адаптація до нових експлуатаційних умов здійснюється зміною математичної моделі джерел енергії, тобто виразу для визначення їх економічного опору R_{ei} .

За «ручного» керування режимом ЕЕС результати видаються у вигляді рекомендацій для оперативного персоналу. Якщо оптимальне керування режимом здійснюється за допомогою систем автоматичного керування, то відповідно змінюються уставки локальних САК джерелами потужності, трансформаторами і автотрансформаторами.

Для реалізації на практиці схеми наближення поточного режиму ЕЕС до економічного розроблена адаптивна система керування режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму, що дозволяє реалізувати поставлену задачу. Як джерело вихідної інформації використовується база даних ОІК, що забезпечує адекватність результатів оптимізації. В оптимальну область режим вводиться відповідною корекцією коефіцієнтів трансформації трансформаторів, автотрансформаторів, лінійних регуляторів, джерел енергії.

Для найвигіднішого розподілу активного і реактивного навантаження між електростанціями запропонована схема розподіленого обчислювального комплексу оптимізації їх роботи в енергосистемі в темпі процесу, який реалізований в обчислювальному середовищі *TRACE MODE*. Обчислювальна система найвигіднішого розподілу навантаження між електростанціями є частиною АСДК ЕЕС. Вона під'єднана до бази даних ОІК, звідки в модель ЕЕС поступає інформація про навантаження вузлів системи. Електростанції в обчислювальному комплексі моделюються їх характеристиками економічних опорів.

У **четвертому** розділі подано результати практичних досліджень, метою яких є підтвердження працездатності та ефективності розроблених методів та алгоритмів на прикладі тестової 14 вузлової схеми *IEEE* та фрагменту схеми Південно-Західної ЕЕС.

Обчислювальні експерименти виконувалися за допомогою модулю комплексної оптимізації нормальних режимів ЕЕС програмного комплексу «ВТРАТИ-110», розробленого за результатами дисертаційного дослідження. Для підвищення обчислювальної ефективності модулю у розв'язанні поданого вище переліку оптимізаційних задач, у ньому поєднано моделювання нормальних режимів ЕЕС на підставі методу вузлових напруг у декартових та у полярних координатах, оскільки кожен з підходів має переваги на окремих етапах вирішення задачі.

Використовуючи розроблені програмні засоби, реальну схему та параметри ЕЕС 110-750 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи, виконано обчислювальний експеримент. В результаті показано, що запропоновані в роботі методи та алгоритми оптимізації нормальних режимів ЕЕС за критерієм втрат потужності в електричних мережах можуть бути ефективно використані для оптимізації нормальних режимів як окремо – для розв'язання часткових оптимізаційних задач, так і для комплексної оптимізації режимів ЕЕС. Для прикладу, на рис. 6 подано результати оптимізації добового графіка видачі потужності Ладжинською ТЕС за критерієм мінімальних витрат на виробництво та транспортування електроенергії станції.

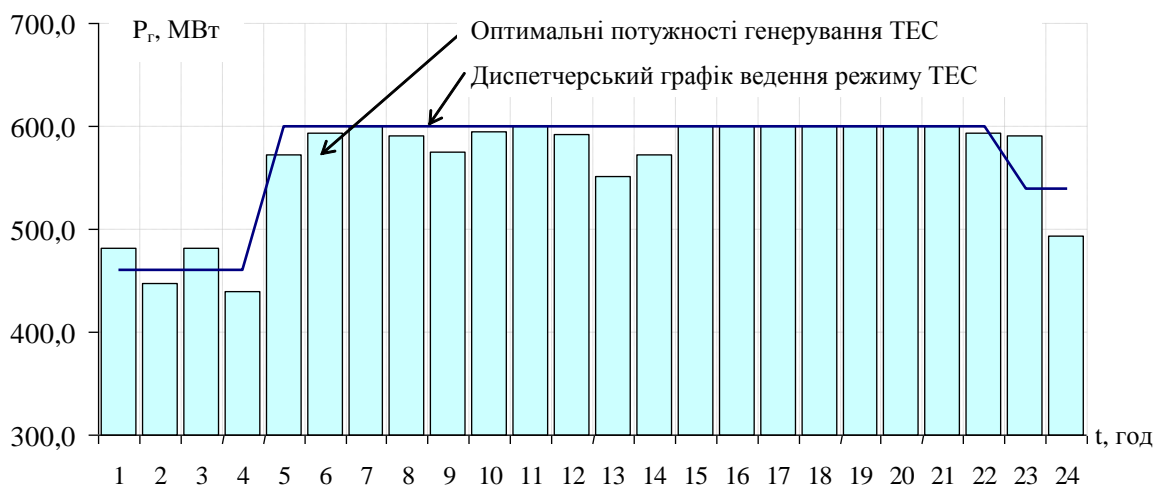


Рисунок 6 – Добовий графік оптимального генерування Ладижинської ТЕС (за критерієм мінімальних витрат)

Показано, що за рахунок комплексної оптимізації режиму електричних мереж 110-750 кВ ПЗЕС можна досягти зменшення втрат потужності у характерному режимі з 38,62 МВт до 31,91 МВт, тобто на 6,71 МВт або 17,37%. Встановлено, що на сукупний ефект окремі незалежні змінні мають різний вплив (рис. 7). Критерій оптимальності – сумарні втрати потужності – є більш чутливим до зміни генерування активної потужності (61,3% від сукупного ефекту) і менш чутливим до коригування перетоків потужності в електричних мережах за рахунок коефіцієнтів трансформації (38,7% від сукупного ефекту).

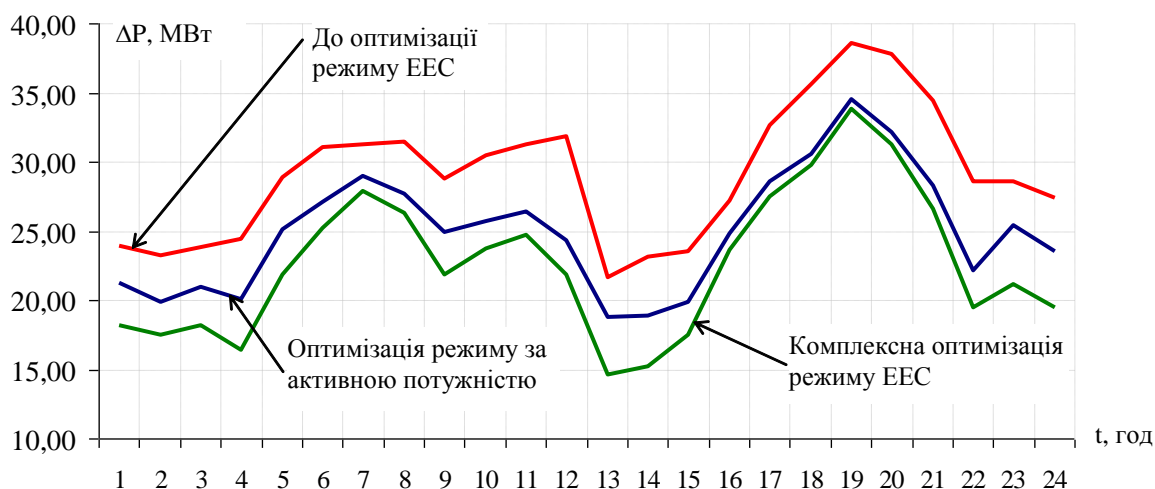


Рисунок 7 – Добовий графік втрат активної потужності в мережах 110–750 кВ ПЗЕС за результатами оптимізаційних розрахунків

Побудовані добові графіки зміни втрат активної потужності в ЕЕС (див. рис. 7) вказують на доцільність впровадження в енергосистемі автоматизованої системи найвигіднішого розподілу навантаження між джерелами електроенергії та оптимального керування потоками активної і реактивної потужності в електричних мережах. Для цього можна рекомендувати системи автоматичного керування, побудовані з використанням принципу найменшої дії.

Таким чином, розроблені алгоритми та програмні засоби дозволяють розв'язувати оптимізаційні задачі окремо, або у комплексі, що не підвищує складності й не погіршує

якості отриманих результатів, оскільки їх розв'язування виконується від глобального екстремуму цільової функції, отриманого згідно принципу найменшої дії. Відмінність розв'язання задач полягає у переліку доступних для коригування незалежних змінних і, відповідно, ступенем відхилення оптимального розв'язку від глобального екстремуму функції.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуальної задачі зменшення витрат на виробництво та транспортування електроенергії, яке полягає у доведенні доцільності й ефективності застосування принципу найменшої дії (ПНД) для моделювання оптимальних режимів електроенергетичних систем, що дозволяє задіяти здатність останніх до самооптимізації.

Отримані такі нові результати.

1. Проаналізовано дію і використання ПНД в різних галузях науки і техніки, в тому числі і в електротехніці, і показана можливість та доцільність застосування його для побудови методів та алгоритмів оптимального керування режимами електроенергетичних систем, коли критерієм оптимальності є мінімум витрат на виробництво електроенергії та мінімум втрат електроенергії під час її транспортування.

2. Показано, що математична модель процесу оптимізації режимів ЕЕС може бути побудована на основі принципу Гамільтона-Остроградського. Це дає змогу визначити економічний (ідеальний з позицій втрат електроенергії) режим ЕЕС і розробити на його основі метод оптимізації поточних режимів. Відмінною особливістю тут є те, що економічний режим приймається за початкове наближення, а процес розрахунку оптимального режиму зводиться до послідовного врахування активних обмежень на параметри режиму і введення їх в допустиму область. **Оптимізаційний обчислювальний процес будується від ідеального режиму до оптимального режиму.**

3. Формування процесу оптимізації режимів ЕЕС від початкового ідеального режиму дає змогу вдосконалити метод і алгоритм роздільної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужності з використанням ПНД, що зводиться до розрахунків режимів за заступною R -схемою, і поширити його на комплексну оптимізацію ЕЕС по активній і реактивній потужностях. Електростанції і джерела реактивної потужності моделюються економічними опорами, в яких враховуються втрати активної потужності в ЕЕС. Це дає змогу ефективніше використовувати джерела активної та реактивної потужностей з метою зменшення витрат на генерування та транспортування електроенергії в ЕЕС.

4. В процесі прийняття оптимальних рішень щодо оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужності з використанням ПНД доцільно і можливо врахувати втрати активної потужності на генерування реактивної потужності електростанціями і ДРП. Для цього економічні опори ЕС і ДРП під час розрахунків коригуються на відповідну величину. Таким чином можливо врахувати витрати на генерування реактивної потужності в ЕЕС, що важливо в умовах ринку електроенергії.

5. Показано, що принцип найменшої дії може бути використаний для оптимального керування режимами ЕЕС. Розроблена структурна схема адаптивної системи керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму, а електростанції представлені характеристиками економічних опорів. Оптиміальне керування режимом ЕЕС здійснюється таки чином, що **поточні режими керуючими впливами наближаються до ідеального режиму.**

6. Розроблена система автоматичного керування найвигіднішим розподілом навантаження між електростанціями в енергосистемі в темпі процесу. На відміну від існуючих, де використовуються характеристики відносних приростів і спрощена модель ЕЕС, в ній електростанції моделюються характеристиками економічних опорів, а ЕЕС – її заступною R -схемою. В якості інформаційного забезпечення використовується база даних

ОІК АСДК ЕЕС. Використання запропонованої САК дає змогу підвищити ефективність АСДК виробництвом і транспортуванням електроенергії в ЕЕС.

7. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена результатами розрахунків тестової ЕЕС, а також результатами їх дослідної експлуатації в Південно-Західній електроенергетичній системі. Використання вдосконаленого модулем оптимізації режимів ЕЕС на засадах ПНД програмного комплексу АЧП в ПЗЕС дозволить додатково знизити втрати електроенергії в ЕЕС на 0.5–0.7%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лежнюк П.Д. Принцип найменшої дії в задачах оптимізації електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, В.В. Нетребський // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 35–41. – ISSN 0204–3599.

2. Лежнюк П. Д. Математичне моделювання оптимальних станів електроенергетичних систем на засадах принципу найменшої дії / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2007. – №596. – С. 73–79. – ISSN 0321–0499.

3. Лежнюк П. Д. Самооптимизация режимов электроэнергетических систем как проявление принципа наименьшего действия / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський // Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону. – 2008. – №4. – С. 137-144. – ISBN 978–966–02–4888–5.

4. Лежнюк П.Д. Застосування принципу найменшої дії для оптимізації режимів електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». – 2009. – №637. – С.44–50. – ISSN 0321–0499.

5. Лежнюк П.Д. Принцип найменшої дії в задачах технічної електродинаміки / П.Д. Лежнюк, В.І. Нагул, В.В. Нетребський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – №1. – С. 110–118. – ISSN 1681–7893.

6. Лежнюк П.Д. Принцип наименьшего действия в моделировании оптимальных состояний электроэнергетических систем / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський, О.Ю. Петрушенко // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України. – Київ. – 2010. – том 2. – С. 215–222.

7. Лежнюк П.Д. Оптимізація режимів роботи джерел електроенергії в енергосистемі з використанням принципу найменшої дії / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський // Наукові праці Донецького національного технічного ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 255–258. – ISSN 2074–2630.

8. Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції “Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи”, 24 – 27 травня 2005 р., Тернопіль / М-во освіти і науки України. – Т.: ТДТУ ім. І.Пулюя, 2005. – 119 с. – ISBN 966-305-028-4.

9. The 2nd International Conference on Inductive Modelling (ICIM'2008) dedicated to the blessed memory of Academician Alexey Ivakhnenko, 15-19 September 2008, Kyiv, Ukraine / IRTS ITS NANU, 2008. – 316 p. – ISBN 978–966–02–4889–2.

АНОТАЦІЯ

Нетребський В. В. Оптимізація нормальних режимів електроенергетичних систем на засадах принципу найменшої дії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2012.

Дисертацію присвячено розробленню методів оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем для зменшення витрат під час виробництва та транспортування електроенергії. Показано, що економічний струморозподіл в ЕЕС ґрунтується на прояві в електроенергетиці принципу найменшої дії (ПНД), при цьому найменші втрати електроенергії, які можливі в ЕЕС при заданих навантаженнях у вузлах, в загальному будуть тоді, коли струморозподіл розраховано за її заступною R -схемою. Розвинуто метод роздільної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужності з використанням ПНД, та показана можливість комплексної оптимізації ЕЕС по активній і реактивній потужностях. Вдосконалена адаптивна система керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму. Запропонована схема розподіленого обчислювального комплексу для оптимізації роботи електростанцій в енергосистемі в темпі процесу. Для практичної реалізації оптимального керування розроблено алгоритми оптимізації нормальних режимів ЕЕС.

Ключові слова: електроенергетична система, принцип найменшої дії, моделі самооптимізації, економічний струморозподіл, втрати електроенергії.

THE SUMMARY

Netrebsky V.V. Optimisation of electropower systems normal modes on the basis of least action principle. - A manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on Specialty 05.14.02 – Electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2012.

The dissertation is devoted working out of optimisation methods of electropower systems (EPS) normal modes for decrease of expenses by manufacture and electric power transfer. It is shown, that economic distribution of currents is based on developing process in electric power industry of least action principle (LAP). The least losses of the electric power, which possible in EPS at the set loadings in knots, generally will be when distribution of currents is counted on its R -equivalent circuit. The method separate optimisation of EPS modes on active and a reactive power with use LAP is developed. Possibility of complex optimisation EPS on active and jet powers is shown. The adaptive control system of EPS normal modes where in the capacity of the reference model the model of its economic regime used is developed. The circuit design of the distributed computer system for optimisation of power stations working in an electric power system in rate of process is offered. Algorithms of EPS normal modes optimisation are developed for practical implementation of optimum control.

Keywords: an electropower system (EPS), least action principle (LEP), self-optimisation models, economic distribution of currents, electric power losses.

АННОТАЦИЯ

Нетребский В. В. Оптимизация нормальных режимов электроэнергетических систем на основе принципа наименьшего действия. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2012.

Диссертация посвящена разработке методов оптимизации нормальных режимов электроэнергетических систем для уменьшения расходов во время производства и транспортировки электроэнергии.

Учитывая характерные особенности ЕЕС как объекта управления, а также необходимость реализации управления технологическими процессами в условиях неполноты и недостоверности текущей информации о состоянии объекта и внешних влияниях, целесообразным является переход к частичной децентрализации управления с использованием адаптивных систем автоматического управления. Вместе с тем применение саморегулированных систем управления, построенных на основании принципа наименьшего

действия (ПНД), позволяет не потерять системного эффекта относительно минимизации суммарных потерь мощности в электрических сетях.

Анализ того, что ПНД проявляется не только в механике, но и в электромеханике и электротехнике, указывает на необходимость и целесообразность исследования возможности применения его для построения метода и алгоритмов оптимального управления режимами неоднородных электрических сетей энергосистем, когда критерием оптимальности является минимум потерь электроэнергии во время ее транспортировки.

Показано, что наименьшие потери электроэнергии, которые возможны в ЕЭС при заданных нагрузках в узлах, в общем будут тогда, когда токораспределение в системе будет отвечать токораспределению, рассчитанному по R -схеме замещения. Этот вывод относительно экономического токораспределения в ЕЭС основывается на проявлении в электроэнергетике принципа наименьшего действия.

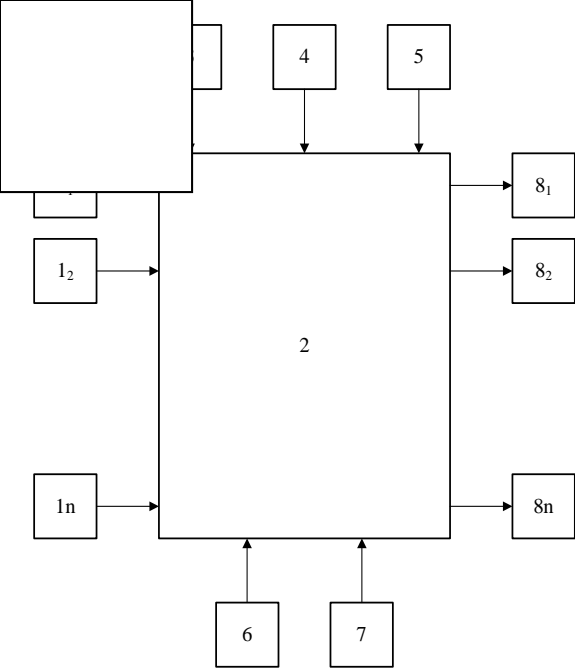
Усовершенствован метод раздельной оптимизация режимов ЕЭС по активной и реактивной мощности с использованием ПНД, который распространен и на комплексную оптимизацию ЕЭС по активной и реактивной мощностям. В этом случае в экономических сопротивлениях станций учитываются потери активной мощности в ЕЭС от потоков реактивной мощности, которая генерируется как электростанциями, так и источниками реактивной мощности.

Модернизирована адаптивная система управления нормальным режимом ЕЭС, где в качестве эталонной модели используется модель ее экономического режима, что позволяет реализовать задачу приближения текущего режима к экономическому с учетом ограничений. Как исходная информация используется база данных ОИК, что обеспечивает адекватность результатов оптимизации. В оптимальную область режим вводится соответствующей коррекцией коэффициентов трансформации трансформаторов, автотрансформаторов и линейных регуляторов.

Предложена схема распределенного комплекса для оптимизации работы электростанций в энергосистеме в темпе процесса, который реализован в вычислительной среде TRACE MODE. Вычислительная система наивыгоднейшего распределения нагрузки между электростанциями является частью АСДУ ЭЭС. Она подсоединена к базе данных ОИК, откуда в модель ЭЭС поступает информация о нагрузке узлов системы. Электростанции в вычислительном комплексе моделируются их характеристиками экономических сопротивлений.

Работоспособность и эффективность предложенных в работе методов и алгоритмов проверена путем проведения расчетов по оптимизации схем Юго-Западной электроэнергетической системы. Разработанные на их основе модули программ переданы на предприятия Юго-Западной электроэнергетической системы для опытно-промышленной эксплуатации. Показано, что за счет комплексной оптимизации режима электрических сетей 110-750 кВ ЮЗЭС можно достичь уменьшения потерь мощности в характерном режиме на 6,71 МВт или 17,37%. Установлено, что на суммарный эффект отдельные независимые переменные имеют разное влияние. Критерий оптимальности – суммарные потери мощности – наиболее чувствителен к изменению генерирования активной мощности (примерно 60% от суммарного эффекта) и менее чувствителен к изменению перетоков мощности в электрических сетях коэффициентами трансформации (примерно 40% от суммарного эффекта).

Ключевые слова: электроэнергетическая система, принцип наименьшего действия, модели самооптимизации, экономическое токораспределение, потери электроэнергии.



Підписано до друку 02.04.2012 р. Формат 29.7 × 42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2012-040
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38