

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису



Лежнюк Петро Дем'янович

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КРИТЕРІАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В
ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність: 05.13.02 - математичне моделювання в
наукових дослідженнях

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця - 1996

001:57

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00743832 (R)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі енергетики та електротехніки
Вінницького державного технічного університету.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Верлань Анатолій Федорович,
доктор технічних наук, професор
Жежеленко Ігор Володимирович,
доктор технічних наук, професор
Кветний Роман Наумович.

Провідна установа - АТ Науково-дослідний інститут
електроенергетики (ВНИИЭ), м. Москва.

Захист відбудеться "20" 12 1996 р. в 10 годин
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 10.01.03
у Вінницькому державному технічному університеті за адресою:
286021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95."

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці
Вінницького державного технічного університету.

Автореферат розісланий "19" 11 1996 г.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Колодний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. В даний час, коли в черговий раз завдяки новим технологіям можливості засобів обчислювальної техніки різко збільшилися, йде переосмислення вирішених задач, зіставлення методів і засобів їх розв'язку з тими, що тепер розробляються і впроваджуються, і, як наслідок, ставляться нові задачі, які повніше враховують умови експлуатації і вплив навколишнього середовища. При цьому виходять з нових можливостей сучасних ЕОМ, які характеризуються великою швидкістю і обсягом оперативної пам'яті, а також здатністю відносно просто поєднуватися в мережі і ефективно функціонувати разом з мікропроцесорними пристроями і системами.

Недивлячись на об'єктивні складнощі, продовжується оснащення технологічних процесів сучасними обчислювальними засобами і комплексами, але їх потенційні можливості використовуються далеко не повній мірі. Поряд з технічними причинами це пояснюється також відставанням розвитку відповідного методологічного забезпечення. Існуючі методи і засоби моделювання та обчислювальні методи багато в чому не відповідають новим умовам і вимагають подальшого розвитку, а в ряді випадків, як такі, що вичерпали можливості удосконалюватися, заміни на більш ефективні. Особливо характерно це для складних динамічних систем кібернетичного типу, прикладом яких є електричні системи (ЕС).

Якісне функціонування цих складних технічних комплексів визначається мірою і ефективністю їх автоматизації. Очевидно, що на належному науково-технічному рівні задача автоматизації може бути розв'язана лише на базі використання сучасних ЕОМ на всіх ієрархічних рівнях — просторових і часових. Досвід експлуатації обчислювальних і програмних засобів підтверджує, що задачі автоматизації оптимального управління необхідно розв'язувати з єдиних методологічних позицій, на єдиній концептуальній базі, виходячи із системного підходу. При цьому більш повно і ефективно використовуються можливості обчислювальної техніки і програмного забезпечення, підвищується техніко-економічна ефективність АСУ в цілому.

В цьому розумінні перспективним є застосування узагальнюючих методів теорії

Людмила В. Стефанівська
АН України

Відмінною особливістю цього підходу, який пропонується в даній роботі, є те, що він охоплює всі етапи розв'язування задач оптимального керування, починаючи із складання математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією результатів розрахунків. Так, моделі процесу автоматизації формуються на основі теорем про подібність і додаткових положень до них, пошук оптимальних варіантів виконується критеріальним програмуванням, керуючі дії визначаються за допомогою критеріальних моделей, чутливість оптимальних розв'язків визначається в результаті критеріального аналізу. Отже доцільно розширити можливості критеріального методу і поширити його на задачі автоматизації оптимального керування (стосовно електричних систем).

Метою дисертаційної роботи є розробка на основі теорії подібності математичних моделей, методичного, математичного і програмного забезпечення, спрямованих на підвищення ефективності автоматизації оптимального керування нормальними режимами ЕС.

Поставлена мета досягається розв'язанням наступних задач:

1. Дослідження можливості і доцільності використання теорії подібності для виявлення загальних закономірностей в моделюванні процесу автоматизації оптимального керування нормальними режимами (НР) ЕС.
2. Створення принципів математичного моделювання задач автоматизації оптимального керування на базі теорії подібності.
3. Математичне моделювання факторів, які впливають на міру і ефективність практичної реалізації оптимальних рішень, при розрахунках оптимальних параметрів і формуванні керуючих дій.
4. Застосування критеріального методу в задачах автоматизації оптимального керування.
5. Розробка методу критеріального аналізу чутливості системи керування і координації відповідно до результатів цього аналізу роботи регулюючих пристроїв.
6. Розробка методики критеріального моделювання залежностей між оптимальними параметрами як основи для визначення законів оптимального керування.

7. Розробка принципів інформаційного і програмного забезпечення адаптованої системи керування з ієрархічною часовою і просторовою структурою.

Методика дослідження. Математична модель процесу автоматизації оптимального керування НР ЕС формується на основі рівнянь стану ЕС і теорії оптимального керування. Для отримання критеріальних моделей залежності між оптимальними параметрами використовуються основні положення теорії подібності. Побудова алгоритмів розрахунків оптимальних режимів здійснюється із залученням методів лінійного і нелінійного програмування. Результати оптимізаційних розрахунків аналізуються на чутливість. Адаптивна система автоматичного управління НР ЕС створюється на основі методів теорії оптимального керування, чутливості, подібності і моделювання.

Достовірність результатів досліджень підтверджується коректним використанням методів прикладної математики, математичного програмування, законів електротехніки. Правильність та ефективність отриманих рішень і рекомендацій підтверджуються обчислювальними експериментами на ЕОМ, а також порівнянням їх з результатами, отриманими апробованими в практиці методами.

Наукова новизна полягає в створенні методології та розробці засобів використання критеріального моделювання в задачах автоматизації оптимального керування, які дозволяють комплексно вирішити проблеми підвищення ефективності АСДУ ЕС. Отримані результати є новим внеском у розвиток теорії подібності та математичного моделювання стосовно задач ЕС.

На захист виносяться наступні результати і положення:

1. Методика застосування критеріального методу для автоматизації оптимального керування НР ЕС.
2. Методика і алгоритми одержання критеріальних моделей залежностей, які пов'язують оптимальні параметри об'єкта, що оптимізується, а також критерії подібності, які встановлюють, зокрема, подібність оптимальних режимів ЕС.
3. Принципи формалізації і моделювання факторів, які визначають міру і ефективність практичної реалізації оптимальних розв'язків, і методика врахування їх на стадії розрахунків оптимальних параметрів і формування законів оптимального керування.

4. Методика і алгоритми аналізу чутливості оптимальних розв'язків, метод розв'язування некоректних задач нелінійного програмування, сформульованих у відносних одиницях.

5. Комплекс алгоритмів і програм оптимізації і аналізу чутливості для АСДУ ЕС, орієнтованих на широке використання нових інформаційних технологій, мереж сучасних ПЕОМ і мікропроцесорних пристроїв.

6. Принципи побудови адаптивної системи автоматичного керування НР ЕС.

Зв'язок з державними програмами НДР. Результати, викладені в дисертації, отримані в процесі наукових досліджень, які проводилися автором: за підпрограмою 0.01.13 "Цілісне підвищення якості електроенергії по напрузі і зниження втрат в електричних мережах ЄЕС СРСР" комплексної цільової програми О.Ц.003 ДКНТ СРСР і Держплану СРСР (постанова № 473/249 від 12.12.1980 р.); за міжвузівською цільовою програмою "Економія електроенергії" розділи 1.1.13 "Розробити метод оптимізації режимів ЕЕС, який дозволяє одержати оптимальний розв'язок у вигляді узагальнених залежностей" і 1.1.14 "Дослідити режимні заходи зниження втрат електроенергії в ЕЕС з використанням узагальнених залежностей" (наказ Мінвузу СРСР № 703 від 1.06.1982 .); за міжвузівською цільовою програмою "Економія електроенергії" — розділ 01.13 "Розробити на основі узагальнюючих методів теорії подібності способи і засоби оптимального керування режимами електричних систем" (наказ Мінвузу СРСР № 101 від 09.02.1987 р.); по темі "Автоматизація керування нормальними режимами електричних систем на основі узагальнюючих методів теорії подібності" (наказ Мінвузу УРСР № 78 від 21.03.1991 р.).

Практична цінність і реалізація результатів роботи.

Отримані в дисертаційній роботі теоретичні результати і розроблені алгоритми дозволяють на єдиній методологічній основі критеріального методу розв'язувати задачі автоматизації оптимального керування НР ЕС. Запропоновані методи дозволяють отримати критеріальні моделі, які функціонально пов'язують оптимальні за напругою і реактивною потужністю режими ЕС, розрахувати параметри оптимальних режимів, аналізувати одержані оптимальні розв'язки на чутливість і формувати відповідні керуючі дії. Математичні моделі та розроблений комплекс програм аналізу і оптимізації втрат

потужності в ЕС дозволяють створити імітаційну модель процесу оптимізації ЕС і на базі її розробити систему інтелектуальної підтримки диспетчера ЕС.

Результати виконаних в роботі досліджень використовуються в енергосистемах, а також у проектних та дослідницьких організаціях при створенні адаптивної системи керування НР ЕС. За результатами досліджень розроблена галузева методика з оцінки ефективності застосування трансформаторів з РПН і автоматичного регулювання напруги в ЕС. Методика і програми оптимального керування НР впроваджені в АСДУ ВЕО "Вінницяенерго" та РЕУ "Архенерго". Від їх використання за рахунок зниження втрат електроенергії економічний ефект складає 125 тис.крб. за рік (в цінах 1991 р.).

Теоретичні розробки і програми для ЕОМ використовуються в курсах "АСУ і оптимізація ЕС" та "Математичні методи і моделі задач електроенергетики в розрахунках на ЕОМ", які читаються в ВДТУ, в дипломному проектуванні і в дослідженнях аспірантів.

Апробація. Основні результати роботи доповідались на: III, IV Республіканських науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми енергетики", м. Київ, 1980, 1985 рр.; Всесоюзній науковій конференції "Зниження втрат в електроенергетичних системах", м. Баку, 1981 р.; VIII, IX, X Всесоюзних наукових конференціях "Моделювання електроенергетичних систем", м. Баку, 1982 р., м. Рига, 1987 р., м. Каунас, 1991 р.; Всесоюзному семінарі "Оптимізація складних систем", м. Вінниця, 1983 р.; Всесоюзних науково-технічних семінарах "Зниження втрат і підвищення якості електроенергії в електричних мережах енергосистем", м. Алма-Ата, 1984 р., м. Бишкек, 1991 р.; II, III, IV Республіканських науково-технічних конференціях "Пристрої перетворення інформації для контролю і управління в енергетиці", м. Харків, 1985р., 1988 р., 1992 р.; III Всесоюзній науковій конференції "Перспективи і досвід впровадження статистичних методів в АСУ ТП", м. Тула, 1987 р.; Республіканській науково-технічній конференції "Використання обчислювальної техніки і САПР в науково-дослідницьких і дослідних розробках", м. Володимир, 1987 р.; Всесоюзній науковій конференції "Проблеми теорії чутливості вимірювальних датчиків електронних і електромеханічних систем", м. Володимир, 1988р.; Всесоюзному семінарі

"Кібернетика електроенергетичних систем", м. Челябінськ, 1990 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми комплексної автоматизації електроенергетичних систем на основі мікропроцесорної техніки", м. Київ, 1990 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції "Розробка методів і засобів економії електроенергії в електричних системах і системах електропостачання промисловості і транспорту", м. Дніпропетровськ, 1990 р.; Всесоюзному семінарі "Питання створення АСДУ нового покоління", м. Баку, 1990 р.; Всесоюзній нараді "Оптимізація енергетичних режимів енергосистем при роботі в умовах повного держзрахунку", м. Москва, 1991 р.; Всесоюзній нараді-семінарі "Оптимізація електричних режимів і противарійного управління енергосистем і енергооб'єднань", м. Махачкала, 1991 р.; Республіканському науково-технічному семінарі "Методи і засоби техніко-економічної підтримки рішень по керуванню енергопідприємствами", м. Київ, 1992 р.; Науково-технічній конференції країн СНД "Контроль і управління в технічних системах", м. Вінниця, 1992, 1993, 1995 рр.; Всеросійському симпозиумі "Використання засобів обчислювальної техніки в енергетиці", м. Москва, 1992 р.; Всеросійській науково-технічній нараді "Використання ПЕОМ на підприємствах електричних мереж", м. Москва, 1992 р.; Науково-технічній конференції "Управління ефективністю енерговикористання", м. Одеса, 1995 р.; Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці", м. Львів, 1995 р.; Міжнародній конференції по управлінню використанням енергії, м. Київ, 1995 р.; Науково-технічній конференції "Управління технологічними і енергетичними процесами", м. Севастополь, 1996 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 85 робіт, в тому числі в журналах "Електричество", "Известия АН СССР. Энергетика и транспорт", "Электронное моделирование", "Известия вузов. Энергетика", "Электрические станции", видано навчальний посібник і брошура, отримано АС на винахід.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, підсумку, списку літератури із 213 найменувань, додатків. Дисертаційна робота викладена на 315 сторінках машинописного тексту з рисунками і таблицями.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ присвячений характеристиці проблеми оптимального керування НР ЕС і дослідженню можливостей узагальнюючих методів теорії подібності і моделювання при розв'язуванні задач автоматизації оптимального керування.

Аналіз показує, що з метою керування НР ЕС, критерієм оптимальності яких є мінімум втрат активної потужності, нині розроблено ряд методів, алгоритмів і програм характерною особливістю яких є те, що будь-яка зміна умов експлуатації, включаючи зміну навантажень споживачів і джерел електроенергії, потребує повторення оптимізаційних розрахунків, тобто значних затрат коштів і часу на збір інформації і підготовку керуючих дій. Це обмежує можливість їх застосування в АСДУ, де для отримання відчутного техніко-економічного ефекту потребується коригування параметрів режиму в темпі процесу.

Необхідність прийняття оптимальних рішень в умовах недостатності й невизначеності інформації і зменшення часу підготовки коригуючих дій призвела до того, що знайшли застосування способи визначення керуючих впливів, у яких рішення готуються завчасно. До таких способів відноситься, наприклад, регресійний метод. Однак в нашому випадку він використаний не може бути, оскільки дає великі похибки. Тут потребуються інші підходи. До них відноситься підхід, який використовується в даній роботі. Він відрізняється тим, що в ньому поряд з математичною формалізацією процесів для представлення їх на ЕОМ використовуються і фізичні властивості реальних систем, зокрема, здатність однорідних ЕС до самооптимізації, коли розсіювана на їх елементах активна потужність при будь-якому складі навантажень прямує до мінімуму. Ці властивості ЕС використовуються у формі співвідношень, які встановлюються методом теорії подібності і моделювання.

Характерною особливістю керування НР ЕС також є те, що вироблені в АСДУ рекомендації по оптимізації режимів часто не реалізуються експлуатаційним персоналом. Зумовлено це необхідністю врахування на етапі практичної реалізації низки факторів, які в розрахунках не розглядались. До них відносяться надійність і ресурс регулюючих пристроїв (РП),

чутливість оптимальних рішень і пов'язана з цим оцінка реальних можливостей РП впливати на величину критерію оптимальності в ЕС. Тому в даній роботі задача оптимального керування НР ЕС формулюється в загальному випадку наступним чином:

мінімізувати

$$F = \Delta P(X, U) + P(\delta u) + P(\omega) + \sum_{i \in S} \Pi_i \quad (1)$$

за умов

$$V(X, U) = 0; \quad X \in M_x; \quad U \in M_u, \quad (2)$$

де $\Delta P(X, U)$ - сумарні втрати активної потужності в ЕС, які залежать від параметрів режиму X і параметрів РП U , що змінюються в часі; $P(\delta u)$ - потужність, яка еквівалентна збитку споживачів через відхилення напруги; $P(\omega)$ - потужність, що еквівалентна збитку через недовідпуск електроенергії, який викликаний відмовами РП; Π_i - штрафна функція, яка вводиться для врахування ресурсу РП, в том числі й кількості перемикачів пристроїв РПН трансформаторів (s - кількість РП); $V(X, U)$ - рівняння зв'язку керуючих U і керованих змінних X ; M_x, M_u - області допустимих значень змінних X і U .

В роботі задача (1)-(2) формулюється як задача оптимального керування з квадратичним критерієм якості:

мінімізувати функцію керування

$$F(U) = \int_{t_0}^{t_k} [X_t(t)QX(t) + U_t(t)RU(t)] dt \quad (3)$$

в просторі станів

$$\frac{dX}{dt} = AX(t) + BU(t); \quad X(t_0) = X_0; \quad (4)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t),$$

де $X(t), U(t), Y(t)$ - відповідно вектори стану, керування і спостереження; A, B, C, D, Q, R - матриці постійних коефіцієнтів; t_0, t_k - початок і кінець інтервалу часу; X_0 - початкове значення вектора стану.

При такій постановці задачі розв'язок має вигляд закону оптимального керування:

$$U(t) = -W Y(t), \quad (5)$$

де W - матриця зворотного зв'язку.

Серед можливих способів реалізації відповідної системи керування тут віддається перевага адаптивному регулюванню з еталонною моделлю, як найбільш близькою за ідеєю до самовідновлюваних регуляторів. Такий підхід відповідає вимогам до керування НР ЕС, в його рамках можуть застосовуватись багато із напрацьованих і використовуваних на сьогодні в АСДУ алгоритмів і програм, він досить просто реалізується на практиці за допомогою програмованих мікропроцесорів і мікро-ЕОМ. В даній схемі еталонна модель є частиною системи керування, яка складається із двох контурів. Внутрішній контур - це звичайна конфігурація, яка включає керований процес і регулятор. Параметри регулятора настроюються зовнішнім контуром так, щоб мінімізувати розузгодження між виходами моделі U_m і керованого процесу U . Основна проблема тут полягає в побудові механізму самонастройки і еталонної моделі, яка адекватна задачі оптимального керування процесом.

В другому розділі розвивається критеріальний метод стосовно задач оптимального керування.

Критеріальний метод (критеріальне моделювання, критеріальне програмування і критеріальний аналіз) ефективно використовується для розв'язку оптимізаційних задач у науці і техніці. Однак розроблені алгоритми дозволяють із заданою точністю розв'язувати задачі обмеженої розмірності. В сучасних складних динамічних системах (наприклад, ЕС) виникає необхідність розв'язувати оптимізаційні нелінійні задачі, в яких кількість змінних досягає сотень, тисяч і має тенденцію до росту. Таким чином необхідно розвивати чисельні алгоритми, які дають можливість розв'язувати такі задачі. В даній роботі розробляються алгоритми, які суттєво розширюють можливості критеріального методу в цьому напрямку.

Критеріальне моделювання передбачає перетворення вихідної моделі (1) чи (3) в безрозмірну, так звану критеріальну форму запису, де всі величини, які беруть участь в процесі, мають значення критеріїв подібності. Таке представлення дозволяє виявити найбільш загальні властивості ЕС і при визначених умовах проводити дослідження явищ при неповній інформації про них.

Критеріальне рівняння досліджуваного процесу, отримане на основі π -теореми, в загальному вигляді записується:

$$F_* = \sum_{i=1}^m \pi_i \prod_{j=1}^n U_j^{\alpha_j} \quad (6)$$

де $F_* = F/F_0$; $U_j = U_j/U_{j0}$; F_0, U_{j0} - оптимальні значення функції і змінних; π_i - критерії подібності; α_j - постійні коефіцієнти, які визначаються властивостями системи.

Це співвідношення дозволяє визначити відносну зміну F при відхиленні U_j від прийнятого оптимального значення. Тобто за допомогою критеріальної моделі можна розв'язувати задачі аналізу оптимальних рішень на співрозмірність і чутливість.

Аналіз на співрозмірність дозволяє встановити найбільш доцільну відносну долю окремих складових в оптимальному варіанті системи. Аналіз на чутливість дозволяє встановити зміни критерію оптимальності при відхиленні оптимізованих змінних від їх оптимальних значень - пряма задача чутливості. Розв'язок зворотної задачі чутливості дозволяє виявити можливу область варіювання параметрів U_j при заданій величині відхилення функції від її оптимального значення.

Для виконання критеріального аналізу потрібно знати критерії подібності π , визначення яких для розглядуваних багатомірних задач утруднене. В даній роботі розробляються прийоми і алгоритми розв'язку задач великої розмірності критеріальним програмуванням (КП). В їх основу покладено використання наступних принципів: лінеаризація, зведення двоїстої задачі КП до добре програмно забезпечених стандартних обчислювальних процедур, зменшення міри складності прямої задачі КП.

В результаті виконаних досліджень показано, що КП можна використовувати для пошуку екстремуму в оптимізаційних задачах великої розмірності (сотні змінних і складових математичної моделі з обмеженнями і без). Розширити можливості КП вдалося за рахунок реалізації ефективних алгоритмів розв'язку двоїстої задачі КП. Запропоновано комплексний алгоритм розв'язку двоїстої задачі КП, в якому реалізується лінійна програма (симплекс-метод), методи дихотомії і інтерполяції. Залежно від характеристик математичної моделі і заданих умов контролю точності обчислень вибирається той чи інший шлях отримання розв'язку задачі. Метод характеризується надійністю і економічністю. В ньому максимально використовуються стандартні процедури.

Третій розділ присвячений математичному моделюванню умов оптимальності НР ЭС. Досліджуються фізичні основи залежності критерія оптимальності від параметрів процесу, який оптимізується. Керуючими параметрами, від яких залежить значення критерія оптимальності і на який безпосередньо здійснюють вплив РП, є контурні е.р.с. $\dot{E}_x = E_{xa} + jE_{xp}$. Введенням їх в контури ЕС компенсується негати́вна дія її неоднорідності.

Втраги потужності в ЕС знаходяться:

$$\Delta P = J_{a1} r_b J_a + J_{p1} r_b J_p + 2(-J_{a1} H_1 E_{xp} + J_{p1} H_1 E_{xa}) + E_{xa1} G_x E_{xa} + E_{xp1} G_x E_{xp}, \quad (7)$$

де $J = J_a + jJ_p$ - задаючі струми вузлів, значення частини яких фіксується (навантаження), а решта оптимізується (генерація); r_b - діагональна матриця активних опорів віток ЕС; H - реактивна складова матриці струморозподілу C_β , яка зв'язує струми в вузлах J з контурними струмами; G_x - активна складова матриці контурних провідностей.

В роботі отримані умови оптимального струморозподілу в ЕС, які в загальному записуються:

I_{a0}
I_{p0}
μ_a
μ_a^r
μ_p
μ_p^r

$$=$$

C'_r	0
0	C'_r
$-2r'_{ii}$	0
0	$-2r'_{ij}$

$$\left[\begin{array}{l} J_a \\ J_a \text{ max} \\ J_a \text{ min} \\ J_p \\ J_p \text{ max} \\ J_p \text{ min} \end{array} \right],$$

$$\mu_a^r \geq 0, \quad \mu_p^r \geq 0,$$

де

$$C'_r = r_b^{-1} [M'_1 M'_{i1} M'_{i1}] \left(\left[\begin{array}{l} M \\ M' \\ M' \end{array} \right] r_b^{-1} [M'_1 M'_{i1} M'_{i1}] \right)^{-1};$$

$$r'_{ij} = \left(\left[\begin{array}{l} M \\ M' \\ M' \end{array} \right] r_b^{-1} [M'_1 M'_{i1} M'_{i1}] \right)^{-1}.$$

Тут C'_r - матриця струморозподілу заступної схеми ЕС, в якій опори віток представлені тільки їх активними складовими

(г-схема), G_{ij} - матриця вузлових провідностей заступної г-схеми ЕС, M' і M'' - блоки матриці з'єднань віток ЕС у вузлах, які відповідають вузлам навантаження та генерації, μ_a^r, μ_p^r - множники Лагранжа.

Оптимальні значення контурних е.р.с. визначаються:

$$E_{ка}^0 = -G_k^{-1} N J_p; \quad E_{кp}^0 = G_k^{-1} N J_a. \quad (8)$$

В роботі введено системний показник неоднорідності ЕС:

$$\nu = N_a x_{ва} r_{ва}^{-1} - x_{кк} r_{кк}^{-1} N_a, \quad (9)$$

де $x_{ва}$ - реактивна складова матриці опорів дерева ЕС; $r_{кк}, x_{кк}$ - активна та реактивна складові матриці контурних опорів; N_a - матриця з'єднань віток в контури для дерева ЕС.

З врахуванням показника неоднорідності ν вираз для оптимальних зрівнювальних е.р.с. переписується:

$$E_{ка}^0 = \nu r_b M_a^{-1} J_p, \quad E_{кp}^0 = -\nu r_b M_a^{-1} J_a. \quad (10)$$

де M_a - матриця з'єднань віток в вузлах для дерева ЕС.

Тобто видно, що оптимальні значення контурних е.р.с. визначаються неоднорідністю ЕС і значеннями навантаження та генерації у вузлах. Для мінімізації втрат ΔP в контури необхідно ввести зрівнювальні е.р.с., рівні E_k^0 і взяті з протилежним знаком. Введення зрівнювальних е.р.с. в контури ЕС підлягає певним закономірностям, які в роботі узагальнені в критеріальній моделі, сформованій на підставі подібності оптимальних станів ЕС:

$$E_{*a.zp} = \pi_a^E J_{*p}; \quad E_{*p.zp} = \pi_p^E J_{*a}. \quad (11)$$

$$\pi_a^E = -[E_{zpa}^{(6)}]_{д}^{-1} \nu r_b M_a^{-1} [J_p^6]_{д} = idem; \quad (12)$$

де

$$\pi_p^E = [E_{zpp}^{(6)}]_{д}^{-1} \nu r_b M_a^{-1} [J_a^6]_{д} = idem$$

критерії подібності; $E_{*a.zp}, E_{*p.zp}, J_{*a}, J_{*p}$ - відносні значення е.р.с. і струмів (за базис прийняті їх оптимальні значення).

Оптимізуючі режими ЕС е.р.с. вводяться в контури за допомогою трансформаторів, автотрансформаторів і спеціальних ВДГ. Згідно з умовами оптимальності для них отримані закони оптимального керування:

$$k'(t) = 1 - \pi_a^E J_p(t), \quad k''(t) = -\pi_p^E J_a(t), \quad (13)$$

де k' , k'' - вектори дійсних та уявних складових коефіцієнтів трансформації.

Ці закони покладені в основу функціонування системи автоматичного керування. Як видно з (10)-(12), вони визначаються неоднорідністю ЕС.

На підставі отриманих результатів розроблені критеріальні моделі, які зв'язують критерій оптимальності та параметри процесу, що оптимізується.

Четвертий розділ присвячений моделюванню факторів, які впливають на ефективність керування НР ЕС. Розробляється математична модель надійності регулюючих пристроїв для врахування її в математичній моделі оптимального керування нормальними режимами ЕС. Для приведення у відповідність розмірностей критерію оптимальності і складової надійності цільової функції визначається потужність, яка еквівалентна збитку через відмови РП. Вона визначається наступним чином:

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^s P_{\text{вд}i} q_{\text{рп}i} = \sum_{i=1}^s P_{\text{вд}i} (1 - \exp(-\omega_{\text{рп}i} t)), \quad (14)$$

де $P_{\text{вд}i}$ - потужність на i -тій підстанції з РП, що відповідає можливому недовідпуску електроенергії при відмовах РП; $\omega_{\text{рп}i}$ - інтенсивність відмов РП.

Для підвищення ефективності оптимального керування режимом ЕС $P(\omega)$ вводиться в цільову функцію задачі (1)-(2).

Для об'єктивного врахування реальних можливостей РП, які беруть участь в оптимальному керуванні потоками потужності, вимагається знати $\omega_{\text{рп}i}$ кожного РП зокрема. З цією метою в ЕС передбачається наявність системи діагностики технічного стану РП, розроблені фізична і електронна моделі, запропоновані процедурні моделі збору і обробки інформації про функціонування РП в АСДУ.

На рис. 1 проілюстрована ефективність та механізм дії врахування надійності РП на стадії формування критеріальних залежностей $F_* = f(k)$ і показано приклад залежностей, отриманих для одного й того ж самого РП без (крива 1') і з врахуванням (крива 1) надійності. Залежність 1 проходить нижче залежності 1'. При заданному допустимому відхиленні функції $\delta F_{*\text{доп}}$ і при вихідному значенні коефіцієнта трансформації $k_{\text{вих}}$ для

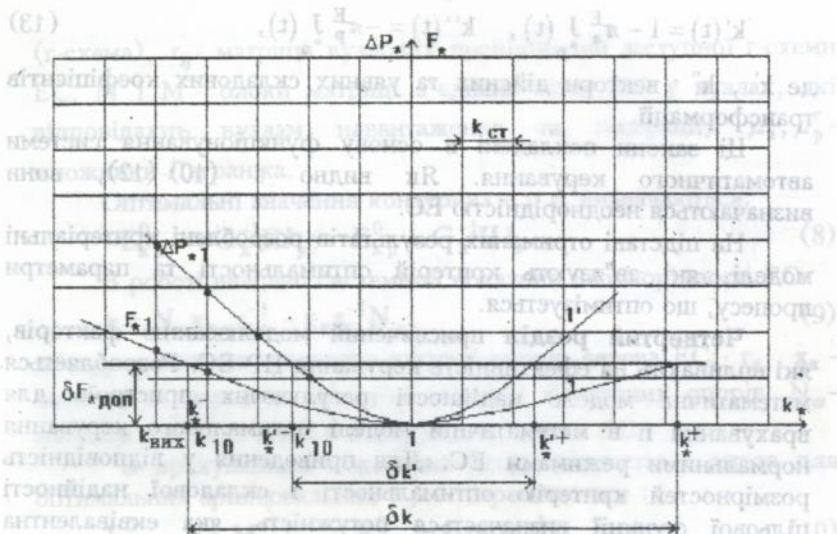


Рис.1.

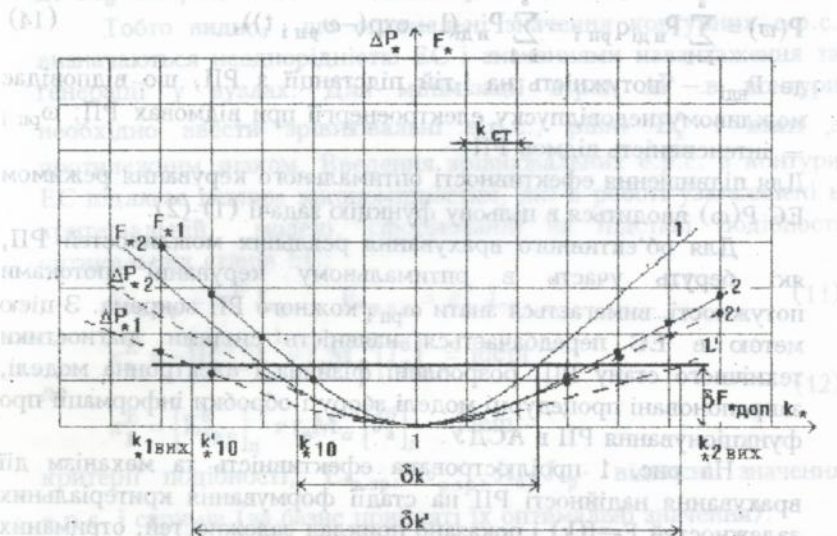


Рис.2.

введення в область оптимальності в першому випадку вимагається більша кількість переключень ніж в другому (3 і 1).

Дії по підвищенню надійності функціонування РП в ЕС вступають в протиріччя з необхідністю забезпечити певну якість електроенергії. Вони можуть бути зняті, якщо в математичну модель (1)-(2) ввести складову збитку, який викликається відхиленням напруг у вузлах від їх оптимальних для споживачів електроенергії значень. Потужність, еквівалентна цьому збитку, визначається наступним чином:

$$P(\delta U) = \frac{1}{b_{вт}} \sum_{j=1}^{m_v} P_j \sum_{i=1}^n d_i \sum_{l=1}^q a_l k_{ij}^l \quad (15)$$

де $b_{вт}$ - вартість 1 кВт·год. втрат електричної енергії; P_j - навантаження j -го вузла; $d_i = P_i / P_j$ - ваговий коефіцієнт, який враховує долю i -го споживача у навантаженні j -го вузла; n - кількість споживачів в j -тому вузлі, що відрізняються економічними характеристиками; m_v - кількість вузлів мережі, збитки в яких враховуються при оптимізації режиму; a_l - коефіцієнти полінома, що апроксимує економічні характеристики споживачів, і які залежать від типів приймачів електроенергії; $k_{ij} = U / U_{ном}$ - відносна напруга на затискачах споживачів.

Включення в математичну модель оптимального керування складової збитку $P(\delta U)$ може значно вплинути на чутливість критерія керування. На рис. 2 представлено приклад залежностей, побудованих для двох трансформаторів, установлених на різних підстанціях ЕС. Пунктирними лініями 1' і 2' показані залежності $\Delta P = f(k_*)$ при зміні k першого і другого трансформаторів. Суцільними лініями 1 і 2 - залежності $F = f(k_*)$, коли до втрат потужності додається потужність, еквівалентна збитку, викликаного відхиленнями напруги.

Розглянутий підхід дозволяє відмовитись від жорсткої фіксації напруги у вузлах примикання розподільчих та живлячих мереж ЕС. Він дає можливість досить повно врахувати вплив розподільчих мереж в процесі оптимізації режиму ЕС. Оптимальні рішення, які при цьому приймаються, є більш обґрунтованими. Врахування збитку, викликаного відхиленнями напруги, при оптимізації НР ЕС допомагає координувати роботу РП і уточнити їх функції. В результаті вони використовуються більш раціонально і підвищується їх техніко-економічний ефект.

При керуванні для досягнення загальносистемного ефекту важливу роль відіграє координація роботи РП відповідно до їх технічного стану (надійність, ресурс) і технічних можливостей. Інтегральним показником, який характеризує можливості і ефективність РП в керуванні НР ЕС, є чутливість критерію оптимальності до змін параметрів РП. Особливо важливо це для трансформаторів з РПН, оскільки оснащення ними енергосистем досить висока, а використовуються вони для керування потоками потужності і зменшення втрат не достатньо.

Для оцінки чутливості втрат активної потужності до параметрів РП використовується критеріальний метод. Оцінка чутливості здійснюється за допомогою критеріальних моделей. Для РП шляхом обчислювального експерименту отримані залежності відносних значень втрат від коефіцієнтів трансформації k в наступному вигляді:

$$F_* = ak_*^\alpha + bk_*^\beta, \quad (16)$$

де a, b, α, β — постійні коефіцієнти, які відображають характер залежності і міру впливу на величину відносних втрат.

На рис. 1 показаний приклад цих залежностей.

Розрахунками реальних ЕС підтверджується, що залежності виду (16) досить стійкі до зміни навантаження ЕС і в основному визначаються їх параметрами. Значить і результати аналізу, виконаного за допомогою (16), поширюються на множину оптимальних режимів. Результати аналізу дозволяють координувати РП при оптимальному керуванні.

В результаті розв'язання зворотної задачі чутливості при заданій області нечутливості втрат $\delta F_{\text{доп}}$ визначаються зони нечутливості δk_j коефіцієнтів трансформації, які перераховуються в зони нечутливості по напрузі для автоматичних регуляторів напруги. Завдяки властивостям КП і виду функції (16) при заданому допустимому відхиленні $\delta F_{\text{доп}}$ граничні значення зони нечутливості для коефіцієнтів трансформації j -го трансформатора визначаються:

$$k_{*j}^- = \left[\frac{(1 + \delta F_{\text{доп}}) \beta}{a(\alpha + \beta)} \right]^{1/\alpha}; \quad k_{*j}^+ = \left[\frac{(1 + \delta F_{\text{доп}}) \alpha}{b(\alpha + \beta)} \right]^{1/\beta} \quad (17)$$

Тобто в цьому та подібних випадках можуть бути отримані рішення зворотної задачі в аналітичному вигляді, і взагалі в аналітичному вигляді може бути сформована область оптимальності M_{k0} .

Як видно з рис. 1, величина цих зон відповідає реальним можливостям РП впливати на величину втрат. Відповідно в ЕС встановлюється різна інтенсивність їх дії. Такий порядок роботи системи керування забезпечує введення НР в область оптимальності мінімально можливим числом керуючих дій, що в свою чергу забезпечує надійність та раціональне спрацювання ресурсу РП.

У п'ятому розділі, використовуючи розроблені математичні моделі і методологічне забезпечення, конкретизується структурна схема системи оптимального керування НР ЕС і створюються засоби його автоматизації. Для двоконтурної системи керування з розподіленою моделлю ЕС розробляється порядок коригування моделі прийняття рішень і обміну інформації між зонами коригування і підсистемами керування. Розробляється імітаційна модель для ієрархічної системи керування режимами ЕС з імітаційною моделлю. Створюються технічні засоби контролю і керування функціонуванням РП в складі САК. Розробляється інформаційне забезпечення САК НР ЕС, що включає систему збору і передачі інформації і графічне середовище для обробки інформації і прийняття оптимальних рішень. Створюється обчислювальне середовище, ядром якого є програмний комплекс аналізу чутливості і оптимізації втрат потужності (ПК АЧП) в ЕС. Особливістю і перевагою використання методів теорії подібності для керування НР ЕС є те, що вони охоплюють всі етапи розв'язку задач оптимального керування, починаючи із складання розрахункової моделі і закінчуючи практичною реалізацією результатів розрахунку. Модель процесу керування, сформована на основі методів подібності, дозволяє синтезувати в зручній для практичної реалізації формі закони функціонування РП, а критеріальні моделі - розробити методи реалізації керуючих впливів, оцінити їх ефективність і реалізувати на практиці принципи автоматизації оперативного керування НР ЕС.

Структурна схема і порядок функціонування системи керування НР, розробленої на базі критеріального методу, така. На першому етапі (зовнішній контур керування) по повній інформації про параметри режиму ЕС $x(t)$ визначаються узагальнені залежності між параметрами оптимальних режимів,

які дозволяють в компактній і зручній формі представити особливості ЕС, виявити причини неоптимального її функціонування. При цьому використовуються результати ретроспективного аналізу по керуванню режимами при короткостроковому плануванні. В результаті формується закон керування РП виду (13).

На другому етапі (контур оперативного керування) отримані критеріальні залежності використовуються для визначення розрахункової величини керуючих впливів $U_m(t)$ і прийняття рішення по їх реалізації. Керування в темпі процесу здійснюється тільки в контурі оперативного керування. В зовнішньому контурі, при необхідності, може здійснюватись коригування критеріїв подібності π^E .

При реалізації такої системи керування можлива децентралізація частини інформаційних функцій без втрати принципів централізованого керування. На визначеному інтервалі зміни навантажень ЕС регулювання параметрів РП здійснюється тільки за параметрами зони коригування, виходячи із загальносистемного критерія оптимальності. При виході параметрів режиму із заданого інтервалу автоматично коригується закон регулювання. Оскільки таке коригування здійснюється за результатами оптимізаційних розрахунків ЕС с врахуванням всіх технічних обмежень, то системний підхід зберігається. В структурній схемі такого керування по суті реалізовано централізоване оперативне керування режимами ЕС "децентралізованими" підсистемами, які являють собою локально діючі РП.

Серед можливих підходів розв'язку проблеми суміщення оперативного і автоматичного керування і одночасного їх функціонування ефективним є використання імітаційного моделювання. Використання імітаційного моделювання дає можливість оперативному персоналу узгодити дії по оперативному керуванню з функціонуванням САК. Процес оперативного і автоматичного керування НР ЕС здійснюється по двоконтурній схемі з імітаційною моделлю (див. рис. 3).

В першому контурі (головному) відбувається автоматичне керування окремими РП за допомогою пристроїв автоматичного контролю і керування функціонуванням (АКУФ) РП. Вони діють за законами регулювання, отриманими узагальнюючими методами теорії подібності.

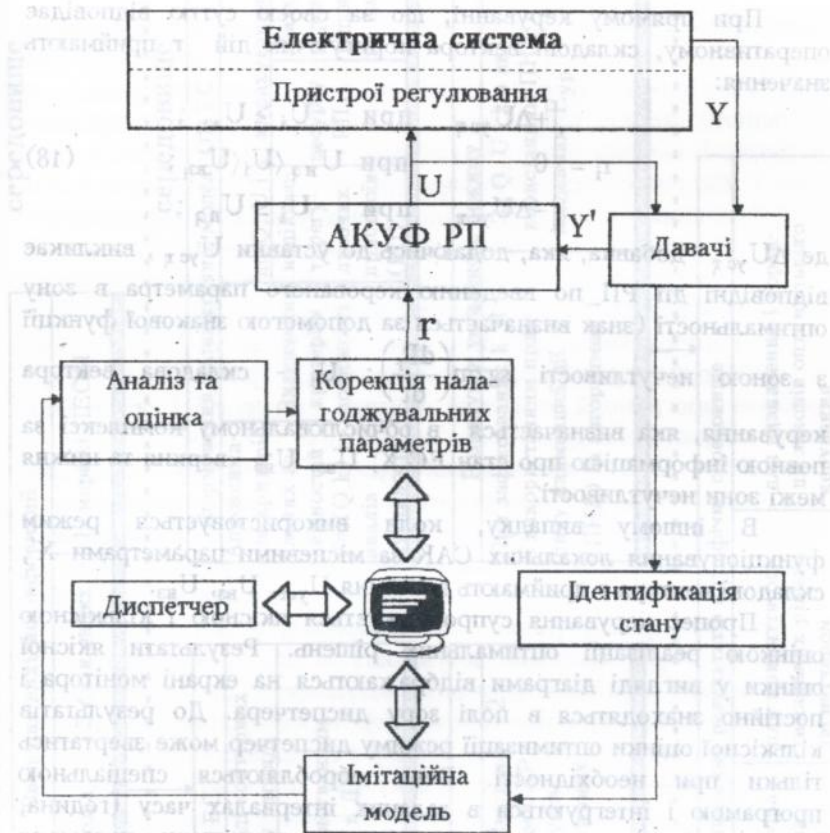


Рис. 3.

У другому контурі (контурі адаптації) залежно від міри порушення НР ЕС і рішення диспетчера можуть виконуватись дії по переналадженню АКУФ РП чи по прямому керуванню параметрами РП. Диспетчер працює в графічному середовищі, через яке він контролює роботу САК і стан ЕС. У графічному середовищі знаходяться результати функціонування імітаційної моделі. Вони подаються у вигляді рекомендацій і інтегральної оцінки дій локальних САК.

При прямому керуванні, що за своєю суттю відповідає оперативному, складові вектора коригуючих дій r приймають значення:

$$r_i = \begin{cases} +\Delta U_{ус\ r} & \text{при } U_i \geq U_{вз\ i}; \\ 0 & \text{при } U_{нз} < U_i < U_{вз\ i}; \\ -\Delta U_{ус\ r} & \text{при } U_i \leq U_{нз}; \end{cases} \quad (18)$$

де $\Delta U_{ус\ r}$ - добавка, яка, додаючись до уставки $U_{ус\ r}$, викликає відповідні дії РП по введенню керованого параметра в зону оптимальності (знак визначається за допомогою знакової функції з зоною нечутливості $\text{sgzm}\left(\frac{dP_r}{dt}\right)$; U_i - складова вектора керування, яка визначається в обчислювальному комплексі за повною інформацією про стан ЕС X; $U_{вз}$, $U_{нз}$ - верхня та нижня межі зони нечутливості.

В іншому випадку, коли використовується режим функціонування локальних САК за місцевими параметрами X' , складові вектора r приймають значення $U_{уст}$, $U_{вз}$, $U_{нз}$.

Процес керування супроводжується якісною і кількісною оцінкою реалізації оптимальних рішень. Результати якісної оцінки у вигляді діаграми відображаються на екрані монітора і постійно знаходяться в полі зору диспетчера. До результатів кількісної оцінки оптимізації режиму диспетчер може звертатись тільки при необхідності. Вони обробляються спеціальною програмою і інтегруються в заданих інтервалах часу (година, зміна, доба і т. д.) Таким чином диспетчеру надається можливість контролювати результати оптимізації не тільки поточного режиму, а й звертатись до результатів своїх дій, узагальнених на протязі будь-якого періоду часу. Він має можливість "програвати", всебічно аналізувати і оцінювати результати оптимізації поточних і прогнозованих ситуацій

Необхідність постійно контролювати параметри поточного режиму ЕС, зіставляти їх з оптимальними значеннями і відповідним чином коригувати вимагає розробки спеціального графічного середовища для прийняття диспетчером оптимальних рішень. Особлива роль відводиться при цьому оцінці ефективності функціонування САК, без чого не можлива якісна взаємодія оперативного і автоматичного керування. З цією метою

Графічне

середовище

Введення вихідної інформації		
З монітора	З бази даних	Із мережі ПЕОМ

Обчислювальне

середовище

Формування математичної моделі УР ЕС	
В методі вузлових напруг у вигляді	В методі контурних стумів у вигляді
балансу потужностей в декартових координатах	балансу дійсної та уявної складової струму в ДК із балансуванням $E_{ур}$ в ДК

Формування математичної моделі ОР ЕС			
Апроксимація критеріальних залежностей $F=f(Q,k)$ і аналіз чутливості	Визначення критеріїв подібності	по Q, U, k з урахуванням надійності регулюючих пристроїв (РП)	ресурсу РП збитків через відхилення напруги

Розрахунок усталеного режиму	
Методом простої ітерації і розв'язком СЛР методом Гаусса при зафіксованих k і Q	1 Методом Ньютона і розв'язком СЛР методом Гаусса при зафіксованих k і Q
	2

Розрахунок усталеного режиму	
При зафіксованих k з використанням принципу найменшої дії (ПНД) за алгоритмом 1	3
	4
	За Q, U, k з використанням ПНД і введенням $E_{ур}$

Введення результатів в графічне середовище		
для відображення на схемі ЕС	для прийняття оптимальних рішень диспетчером	для визначення і корекції законів оптимального керування

Рис. 4.

відповідно до схеми керування в графічне середовище інтегрується імітаційна модель.

Алгоритми формування графічного середовища й імітаційної моделі розроблені на основі об'єктно-орієнтованого підходу. Вони реалізують механізми:

- підготовки вхідної інформації;
- автоматичного формування розрахункової моделі ЕС;
- отримання інформації для прийняття рішення;
- відображення інформації для прийняття рішення;
- безпосереднього прийняття рішення;
- контролю за реалізацією прийнятих рішень.

Основу програмного забезпечення розробленої САК складає програмний комплекс аналізу чутливості і оптимізації втрат потужності в ЕС.

ПК АЧП призначений для виявлення реальних можливостей джерел реактивної потужності, трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку з РПН по автоматизації керування їх режимами роботи і оптимізації режимів ЕС по напрузі і реактивній потужності. При цьому оптимальні значення коефіцієнтів трансформації трансформаторів, які забезпечують зниження втрат активної потужності в ЕС, визначаються з урахуванням чутливості втрат потужності до коефіцієнтів трансформації, з урахуванням збитків через відхилення напруги і з урахуванням надійності і ресурсу РП. Склад і логічна схема ПК АЧП наведені на рис. 4. Структурно ПК АЧП складається із графічного і обчислювального середовищ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПІДСУМОК

Основні результати роботи зводяться до наступного:

1. Показано, що оперативне оптимальне керування складними динамічними системами типу електроенергетичних існуючими методами не досить ефективне. Підвищити ефективність практичної реалізації оптимальних розв'язків в цих системах можливо лише шляхом їх автоматизації з перспективою послідовного переходу на цифрове керування. Доказана доцільність використання в задачах автоматизації оптимального

керування узагальнюючих методів теорії подібності, методів і засобів критеріального моделювання.

2. Розроблені нові прийоми і алгоритми, які суттєво розширюють можливості критеріального моделювання і критеріального програмування. В результаті виконання досліджень показано, що критеріальне програмування можна ефективно використовувати для пошуку екстремуму в задачах оптимального керування великої розмірності (сотні змінних і складових математичної моделі з обмеженнями і без).

3. Створена методологія і запропоновані засоби використання критеріального моделювання в задачах автоматизації оптимального керування нормальними режимами ЕС.

4. Показано подібність оптимальних режимів ЕС, досліджені можливості використання методів теорії подібності в керуванні нормальними режимами ЕС і розроблені нові принципи автоматизації цього процесу.

5. Отримані критеріальні моделі, які зв'язують оптимальні параметри, і запропоновані способи використання їх для оптимізації нормальних режимів ЕС.

6. Розроблена математична модель оптимального керування станами ЕС з урахуванням факторів, які визначають міру практичної реалізації і ефективність оптимальних розв'язків. Врахування надійності, ресурсу і реального регульовального ефекту пристроїв на етапі формування законів управління дозволяє більш раціонально використовувати їх для досягнення загальносистемного ефекту.

7. Показана доцільність виділення в математичній моделі процесу, що оптимізується, причин його неоптимальності і узагальнення їх у вигляді законів керування. Такий підхід дозволяє сформулювати для ЕС закони оптимального керування в критеріальній формі (відносних одиницях), що виключає необхідність проведення оптимізаційних розрахунків кожний раз при зміні навантаження в ЕС.

8. Створена на базі критеріального моделювання методика аналізу чутливості оптимальних розв'язків, яка дозволяє розв'язувати пряму і зворотню задачі чутливості без визначення значень оптимальних параметрів. Запропонований спосіб розв'язання некоректних задач дозволяє автоматизувати координацію і корекцію зон нечутливості регулюючих пристроїв.

9. Розроблені алгоритми і програми, які забезпечують ефективне функціонування автоматичної системи керування нормальними режимами ЕС. Розроблені способи і пристрої визначення, контролю і корекції в часі параметрів законів керування станами ЕС.

10. ПК АЧП, реалізований на основі критеріального методу, переданий в дослідно-промислову експлуатацію РЕУ "Архенерго" і ПЕО "Вінницяенерго". Його впровадження дозволило знизити втрати активної потужності в ЕС на 2-3 %. Методика оцінювання ефективності застосування трансформаторів з АРН впроваджена в енергосистемах РФ і України. Таким чином, створюються передумови для автоматизації оптимального керування нормальними режимами ЕС. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі в курсах "Математичні методи і моделі задач електроенергети", "АСУ і оптимізація ЕС", "Математичні методи оптимізації в електроенергетиці", в курсовому та дипломному проектуванні, а також в НДР студентів і аспірантів.

Отримані результати не обмежуються розв'язком задач тільки в області керування електричними системами. Розроблені методи і засоби критеріального моделювання можуть бути ефективно застосовані в наукових дослідженнях і автоматизації динамічних систем з балансними обмеженнями, де, як і в електричних системах, наявні проблеми суміщення диспетчерського і автоматичного керування. До таких результатів насамперед відноситься методика розв'язку зворотних задач чутливості, методика критеріального моделювання і узагальнення результатів оптимізаційних розрахунків, а також принципи автоматизації оптимального керування.

Основні результати роботи відображені в наступних публікаціях:

1. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критеріального метода в электроэнергетике.- Киев: УМК ВО.- 1989. - 140 с.

2. Воротицкий В.Э., Серова И.А., Лежнюк П.Д., Стан В.В. Методика по оценке эффективности применения трансформаторов с РПН и автоматического регулирования напряжения в замкнутых электрических сетях. РП 34.46.504-90.- М.: СПО Союзтехэнерго. - 1990. - 36 с.

3. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Ярных Л.В. Оптимизация режимов электрических сетей методом критериального программирования // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1979. - N1. - С. 40-47.
4. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Оценка качества функционирования систем критериальным методом // В кн.: Повышение надежности энергосистем. - Иваново: ИЭИ. - 1979. - С. 72-75.
5. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Нагул В.И. Использование критериальных моделей при оптимизации режимов электроэнергетических систем // Электронное моделирование. - 1981. - N4. - С. 80-86.
6. Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Пауткина Л.Р. Использование подпрограмм-функций для представления схем электрических сетей при расчетах на ЭВМ // Изв. вузов. Энергетика. - 1981. - N5. - С. 85-87.
7. Лежнюк П.Д., Ярных Л.В. Расчет токораспределения в электрической сети / Электричество. - 1982. - N8. - С. 10-14.
8. Лежнюк П.Д., Улитич Н.В. Физическое и электронное моделирование систем автоматического регулирования напряжения // В кн.: Электрические сети и системы. Межвед. науч.-техн. сб., вып. 18. - Львов: Вища школа. - 1982. - С. 37-41.
9. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Ярных Л.В. Определение оптимальных режимов электрических сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1983. - N1. - С. 48-59.
10. Лежнюк П.Д., Серова И.А. Восстановление режима электрической системы по ограниченному объему исходных данных с использованием узлового уравнения // В кн.: Оптимизация режимов энергетических систем. Межвед. сб. тр. N 65. - М.: МЭИ. - 1985. - С. 10-18.
11. Астахов Ю.Н., Серова И.А., Лежнюк П.Д. Синтез системы сбора и передачи информации в случае оценивания состояния по линейной модели // Тр. Моск. энерг. ин-та, вып. 104. - 1986. - С. 60-65.
12. Лежнюк П.Д., Оболонский Д.И., Серова И.А. Адаптация метода узловых напряжений к составу исходной информации // Изв. вузов. Энергетика. - 1986. - N10. - С. 47-50.
13. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Остапчук Ж.И., Улитич Н.В. Определение области допустимых отклонений оптимальных

параметров режима электрических сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1986.- N5.- С. 8-15.

14. Веников В.А., Астахов Ю.Н., Богданов В.А., Лежнюк П.Д. Об однозначности учета потерь при оптимизации режима энергосистем / Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1988.- N5.- С. 33-37.

15. Лежнюк П.Д., Оболонский Д.И., Гудко Е.И. Применение методов теории подобия и моделирования в АСДУ // В кн.: Контроль и управление в энергетике. Сб. науч. тр.- Киев: УМК ВО.- 1988.- с.70-77.

16. Лежнюк П.Д., Пауткина Л.Р. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрической сети // Изв. вузов. Энергетика. 1989.- N2.- С. 51-53.

17. Лежнюк П.Д., Лагутин В.М., Оболонский Д.И., Коваль О.П. Устройство автоматического контроля функционирования трансформаторов с РПН / Энергетика и электрификация. - 1989.- N4.- С.16-18.

18. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Нагул В.И. О моделировании оптимальных режимов электроэнергетических систем // Электронное моделирование.- 1990.- N2.- С. 84-89.

19. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1990.- N5.- С. 3-11.

20. Лежнюк П.Д. Автоматизация управления режимом электрических сетей на основе критериального метода // В кн.: Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими объектами. Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф.- Киев: ИЭД АН УССР.- 1990 - С. 178-182.

21. Лежнюк П.Д., Аль-Тхаймер Абдалла. Оптимизация режимов электрических сетей с учетом ущерба, вызываемого отклонениями напряжения // Изв. вузов. Энергетика.- 1991.- N11.- С. 27-31.

22. Воротицкий В.Э., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции.- 1992.- N 1.- С. 60-66.

23. Лежнюк П.Д. Автоматизация управления потоками мощности на основе критериального метода // Тр. Моск.

енерг. ін-та, вып. 649. Управление электроэнергетическими системами. - 1992. - С. 46-58.

24. Лежнюк П.Д., Остапчук Ж.І., Улігич Н.В. Моделювання відмов регулюючих пристроїв трансформаторів у задачах оптимального управління режимами електричних мереж // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 1993. - №1. - С. 56-59.

25. Лежнюк П.Д., Серова І.А., Нгуен Данг Там. Формування стратегії поетапного розвитку систем збору і передачі інформації в енергосистемах // Вісник ВПІ. - 1994. - №1. - С. 63-68.

26. Лежнюк П.Д., Остапчук Ж.І., Аль-Омарі Закарія. Оцінка взаємовпливу регулюючих пристроїв при оптимальному управлінні режимом електричної системи // Вісник ВПІ. - 1994. - №2. - С. 59-62.

27. Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. Відображення нормального режиму електричної системи в графічному середовищі для прийняття оптимальних рішень // Вісник ВПІ. - 1994. - №3. - С. 40-44.

28. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Аль-Омарі Закарія, Кравцов К.І. Апроксимація неявно виражених критеріїв оптимальності електричної системи позиномом // Вісник ВПІ. - 1994. - №4. - С. 35-37.

29. Мокін Б.І., Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісник ВПІ. - 1995. - №3. - С. 5-9.

30. Лежнюк П.Д. Автоматизация режимных мероприятий по уменьшению потерь электроэнергии в электрических системах // В кн.: Управление использованием электроэнергии. - Киев, 1995. - С. 134-137.

31. Лежнюк П.Д., Жан-П'єр Нгома, Бевз С.В. Автоматичний аналіз нормальних режимів електричних систем з математичною моделлю на основі методу Ньютона // Вісник ВПІ. - 1996. - №1. - С.5-9.

32. Лежнюк П.Д., Гайдамака В.М., Бевз С.В. Критеріальне програмування в задачах великої розмірності // Вісник ВПІ. - 1996. - №2. - С. 20-29.

33. А.С. N 721877 (СССР). Устройство для защиты от повышения напряжения в электрической сети переменного тока с зависимой характеристикой времени срабатывания / Лежнюк П.Д., Остапчук Ж.И. // Бюл. изобр. - 1980. - N10.

34. Король В.С., Лежнюк П.Д., Лагутин В.М. Использование нагрузочной способности трансформаторов при оптимизации режимов электрической системы. - Деп. в Информэнерго, N 2611-эн. - 1987. - 16 с.

35. Мокін Б.І., Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. Адаптивна система оптимального керування стаціонарними режимами електричної системи з імітаційною моделлю // Деп. в ДНТБ, N 891-Ук96.- 1996.- 12 с.

36. Лежнюк П.Д., Нагул В.И. Вопросы реализации оптимального режима в электрических сетях // В кн.: Снижение потерь в электроэнергетических системах. Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Баку, 1981.- С. 209-210.

37. Лежнюк П.Д., Пауткина Л.Р. Подобие и моделирование установившихся оптимальных режимов электрической сети // В кн.: Моделирование электроэнергетических систем. Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Баку, 1982.- С. 85-86.

38. Лежнюк П.Д., Лагутин В.М., Нагул В.И. Адаптивная система оптимального управления режимом электрических сетей // В кн.: Моделирование электроэнергетических систем. Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Рига, 1987.- С. 270-271.

39. Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Остапчук Ж.И. Решение прямой и обратной задач чувствительности критериальным методом // В кн.: Проблемы теории чувствительности измерительных датчиков, электронных и электротехнических систем. Тез. Всесоюз. науч. конф. - Москва, 1989.- С. 26.

40. Наладка и приработка систем автоматического регулирования напряжения / Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Остапчук Ж.И., Улитич Н.В. // Повышение эффективности испытаний приборных устройств. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. - Москва, 1989. - С. 77-90.

41. Лежнюк П.Д. Управление нормальным режимом электроэнергетической системы на основе критериального метода // В кн.: Управление и автоматизация проектирования в электроэнергетических системах. Тез. докл. Всесоюз. семин.-Челябинск, 1990.- С. 103

42. Лежнюк П.Д. Автоматизация управления режимами электрических сетей на основе критериального метода // В кн.: Разработка методов и средств экономии электроэнергии в

электрических системах и системах электроснабжения. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Днепропетровск, 1990. - С.36-37

43. Лежнюк П.Д. Применения методов теории подобия при оптимальном управлении нормальным режимом электрической системы // В кн.: Моделирование электроэнергетических систем. Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Каунас, 1991. - С. 46-47.

44. Воротицкий В.Э., Серова И.А., Лежнюк П.Д. Комплекс программ по формированию модели электрической сети напряжением 110 кВ и выше для оптимального управления установившимися режимами // Там же. - С. 206-207.

45. Лежнюк П.Д. Принципы автоматизации управления нормальным режимом электроэнергетической системы на основе теории подобия // В кн.: Контроль и управление в технических системах. Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ. - Винница, 1992. - С. 220-221.

46. Лежнюк П.Д. Автоматизация управления потоками мощности в электрических системах на основе критериального метода // В кн.: Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, силовоточной и полупроводниковой техники. Тез. Всероссийской НТК. - М.: Государственный научный центр РФ, ВЭИ. - 1994. - С. 339-341.

47. Лежнюк П.Д., Лукьяненко Ю.В., Гайдамака В.М., Абдаллах Джалал. Вычислительная среда для автоматизации принятия решений диспетчером ЭЭС // В кн.: Управление эффективностью энергоиспользования. Тез. докл. науч.-техн. конф. - Киев: УДЭНТЗ, 1995. - С. 40-42.

48. Лежнюк П.Д. Критеріальне моделювання в задачах автоматизації оптимального керування // В кн.: Контроль і управління в технічних системах. Тез. допов. наук.-техн. конф., ч. 2. - Вінниця, 1995. - С. 553-554.

49. Лежнюк П.Д. Автоматичне керування нормальним режимом електричної системи на підставі узагальнюючих методів теорії подібності // В кн.: Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці. Тез. допов. міжнарод. наук.-техн. конф. - Львів, 1995. - С. 216-217.

Особистий внесок в роботах, опублікованих у співавторстві: [3,5,7,10,18,29,35] - розроблення математичних моделей і методики їх використання, [1-4,9,11,13,14,19,22,25,44] - розроблення способів та алгоритмів розв'язування задач, в решті публікацій - постановка задач дослідження та участь в їх рішенні, наукове керівництво, аналіз результатів.

Lejnuik P.D. Methods and means of criterial modelling in the problems of electrical networks optimal control automation. In the dissertation for submission for the award of Doctorate degree in Engineering on speciality 05.13.08 - mathematical modelling in scientific investigations, Vinnytsja State Technical University, Vinnytsja, 1996 year. 49 scientific works are submitted, which contain the results of investigations concerning the problem of automation of optimal control based on generalized methods of similarity theory and modelling. The criterial modelling is established to solve the problems of technical-economic efficiency increase and automate the control of setup states of dynamic systems possessing balance limitations, particularly electric systems. The application of criterial models is shown to furnish the possibility of working out the informational provision and software of automatic control systems on the uniform methodological base

Лейнюк П.Д. Методы и средства критериального моделирования в задачах автоматизации оптимального управления электрических систем. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.02 - математическое моделирование в научных исследованиях, Винницкий государственный технический университет, Винница, 1996 г. Защищается 49 научных работ, которые содержат исследования по автоматизации оптимального управления на основе обобщающих методов теории подобия и моделирования. Установлено, что критериальное моделирование позволяет в комплексе решить проблемы повышения технико-экономической эффективности оперативного и автоматического управления нормальными состояниями динамических систем с балансными ограничениями, в частности электрических. Показано, что использование критериальных моделей дает возможность создавать информационное и программное обеспечение систем автоматического управления на единой методологической основе.

Ключові слова: критериальне моделювання, оптимальне управління, автоматизація, електрична система.

Нідзякавана фірмаю "КОНТЕНТ"
Някляд 100 прымірнікаў. Замоўлення 3581.
м. Вінніца, вул. Козацкаго, 13, т. 35-35-50
Формат 60x84/16. Ум. друк арк. 0,6.
Падрукавана ад друку 15.11.96 р.

12/24

424831

AB 36.293