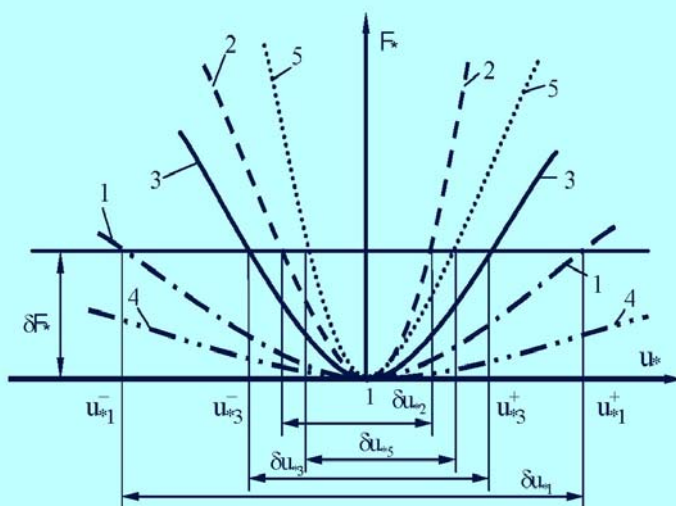


П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра, В. Ц. Зелінський

## ОЦІНЮВАННЯ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра, В. Ц. Зелінський**

**ОЦІНЮВАННЯ ЧУТЛИВОСТІ  
ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ  
КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ**

УНІВЕРСУМ-Вінниця  
2008

УДК 621.311.001.57

Л 40

*Рецензенти:*

**П. П. Говоров**, доктор технічних наук, професор

**Б. С. Рогальський**, доктор технічних наук, професор

**М. М. Черемісін**, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 20.12.2007р.)

**Лежнюк П. Д., Остра Н. В., Зелінський В. Ц.**

Л 40 Оцінювання чутливості оптимального керування режимами електроенергетичних систем критеріальним методом : Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 131 с.

ISBN 978-966-641-256-3

В монографії розроблені методи і засоби підвищення ефективності оптимального керування режимами електроенергетичних систем. Від відомих методів запропонований відрізняється тим, що в основу його покладено критеріальне моделювання, яке забезпечує можливість аналізу чутливості оптимальних рішень у відносних одиницях. Показано, що аналіз чутливості дозволяє визначити параметри, які найбільше впливають на оптимальний розв'язок, сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення задач оптимізації. Запропоновано систему автоматичного керування потужністю та напругою з врахуванням чутливості оптимальних рішень.

Книга розрахована на фахівців з математичного моделювання електроенергетичних систем. Може використовуватись студентами і аспірантами відповідного спрямування.

УДК 621.311.001.57

ISBN 978-966-641-256-3

© П. Лежнюк, Н. Остра, В. Зелінський, 2008

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	11
1.1 Математичне моделювання оптимального керування електроенергетичними системами.....	12
1.2 Подібне моделювання в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС.....	20
1.3 Аналіз проблеми чутливості оптимальних режимів електроенергетичних систем.....	24
2 ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЕС.....	31
2.1 Аналіз чутливості математичної моделі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС.....	31
2.1.1 Оцінка чутливості критеріїв оптимальності.....	31
2.1.2 Зворотна задача чутливості.....	36
2.2 Математичні моделі умов оптимальності втрат потужності в ЕЕС для аналізу їх чутливості до зміни параметрів системи.....	39
2.2.1 Системні показники неоднорідності ЕЕС.....	40
2.2.2 Математичне моделювання процесу оптимального керування струморозподілом в ЕЕС.....	44
2.3 Формування математичної моделі ЕЕС для оцінки чутливості напруги вузлів до коефіцієнтів трансформації трансформаторів.....	46
2.3.1 Особливості математичного моделювання нормальних режимів ЕЕС.....	46
2.3.2 Математична модель ЕЕС з комплексними коефіцієнтами трансформації у схемах заміщення з ідеальними трансформаторами.....	47
2.3.3 Математична модель аналізу нормальних режимів ЕЕС із введенням у схему заміщення замість комплексних коефіцієнтів трансформації додаткових (фіктивних) задаючих струмів.....	51
2.4 Математичні моделі для оптимізації режимів ЕЕС з врахуванням чутливості втрат потужності.....	55
Висновки.....	61

3	АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КРИТЕРІАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ.....	63
3.1	Оцінка чутливості оптимальних розв'язків при дискретності керувальних впливів.....	63
3.1.1	Оцінка чутливості критерію оптимальності.....	63
3.1.2	Зворотна задача чутливості оптимального керування.....	73
3.2	Розподіл допусків на параметри в задачах чутливості оптимального керування критеріальним методом.....	80
3.3	Аналіз чутливості математичної моделі неоднорідності ЕЕС та визначення оптимального складу регулювальних пристроїв.....	86
3.3.1	Загальносистемний показник неоднорідності ЕЕС з поздовжньо-поперечним регулюванням коефіцієнтів трансформації регулювальних пристроїв.....	86
3.3.2	Вибір оптимального складу регулювальних пристроїв ЕЕС за допомогою аналізу чутливості.....	90
	Висновки.....	93
4	ОПТИМІЗАЦІЯ НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ.....	94
4.1	Система оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням чутливості.....	94
4.2	Аналіз чутливості показників якості керування та визначення оптимального складу регулювальних пристроїв.....	98
4.3	Розподіл допусків на параметри регулювальних пристроїв	102
	Висновки.....	105
	ПІДСУМКИ.....	106
	ЛІТЕРАТУРА.....	108
	Додаток А.....	116
	Додаток Б.....	118
	Додаток В.....	121
	Додаток Г.....	126

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АКУФТ – автоматичний контроль і управління функціонуванням трансформаторів;
- АСДК – автоматизована система диспетчерського керування;
- БД – база даних;
- ВДТ – вольтододавальний трансформатор;
- е.р.с. – електрорушійна сила;
- ЕЕС – електроенергетична система;
- ЛЕП – лінія електропередач;
- НР ЕЕС – нормальний режим електроенергетичної системи;
- ОІКК – оперативно-інформаційний керуючий комплекс;
- ООА – об'єктно-орієнтований аналіз;
- ПК – програмний комплекс;
- ПК АЧП – програмний комплекс аналізу чутливості та оптимізації втрат;
- РП – регулювальний пристрій;
- РПН – регулювання під навантаженням;
- САК – система автоматичного керування;
- УПК – установка поздовжньої компенсації.

## ВСТУП

Сучасний розвиток науки і техніки ініціює нові задачі в галузі керування складними технічними системами. Завдяки появі нових можливостей обчислювальної та мікропроцесорної техніки стає реальним автоматизувати оптимальне керування станами складних динамічних систем таких, наприклад, як електроенергетичні, які розподілені на великій території, характеризуються складною просторово-часовою структурою керування і для яких характерні часті та швидкі зміни станів [1, 2].

Електроенергетичні системи як штучні системи не є оптимальними з точки зору втрат електроенергії під час її транспортування і розподілу. Підвищений рівень втрат електроенергії під час її транспортування та розподілу зумовлений цілим рядом факторів, а саме: великою проектною густиною струму в електричних мережах; низьким рівнем компенсації реактивної потужності; високим рівнем неоднорідності та малоефективним використанням наявних регулювальних пристроїв (РП). Це призводить не лише до збільшення втрат порівняно з економічно розвиненими країнами, але й до зниження якості електроенергії, зменшення рівня статичної та динамічної стійкості системи та зниження пропускнуої здатності ліній електропередач [3-7].

Розв'язання проблеми оптимізації режимів роботи ЕЕС залишається важливим і актуальним завданням в сфері наукових досліджень проблем електроенергетики, від ефективного вирішення якого залежить підвищення економічності і надійності роботи ЕЕС в цілому. Ефективне розв'язання цієї задачі вимагає вдосконалення принципів та підходів до побудови схем електричних мереж та їх реконструкції, а також шляхів зниження технологічних втрат електроенергії за рахунок наявних засобів керування. На сьогодні складаються умови в ЕЕС, що дозволяють перейти від епізодичної оптимізації їх режимів до оптимального керування ними [8].

При оптимальному керуванні в ЕЕС ефективність реалізації визначених (розрахованих) оптимальних розв'язків залежить від ряду факторів, які не враховуються або не можуть бути враховані в програмах оптимізації режимів ЕЕС. До таких факторів відноситься надійність регулювальних пристроїв, дискретність їх параметрів, неточність і невизначеність вихідних даних та ін. [9]. Тому висока точність, з якою здійснюються оптимізаційні розрахунки, суперечить реальним умовам роботи ЕЕС. Відзначені фактори можуть бути враховані при аналізі оптимальних розв'язків на чутливість [10, 11].

Математичне моделювання в задачах оптимального керування режимами ЕЕС має специфічні особливості. При розробці математич-

ної моделі потрібно враховувати ту обставину, що кінцевий техніко-економічний ефект від керування режимами ЕЕС визначається результатами практичної реалізації планованих оптимальних режимів. Одержавши оптимальний розв'язок, необхідно проінтерпретувати його в термінах реальної системи відповідно до обраного критерію оптимальності і використовувати його на практиці. Тобто, оптимізація режимів ЕЕС не закінчується одержанням розв'язку задачі. Найважливіша частина оптимізаційного дослідження полягає в обґрунтуванні правильності розв'язку й аналізі його чутливості [12]. З погляду ефективності процесу переходу системи від її поточного режиму до оптимального важливим є не сам отриманий розв'язок, а інформація про режим ЕЕС в межах розв'язку. Це дозволяє краще зрозуміти її основні властивості і використовувати їх для побудови адаптивної системи автоматичного керування (САК).

Чутливість розв'язку до зміни значень параметрів системи вказує на те, які оцінки параметрів варто поліпшити для того, щоб знайти оптимальний розв'язок із заданою точністю. В результаті аналізу чутливості визначається таке. По-перше, відшуковуються параметри, які найбільше впливають на оптимальний розв'язок. Якщо такі параметри існують, то можливо доцільно досліджувати питання про корекцію відповідних властивостей ЕЕС. По-друге, визначається вплив на оптимальні режими ЕЕС варіацій неточно заданих параметрів. Аналіз чутливості дозволяє реально сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення задачі оптимізації, а також виділити ті параметри, похибка визначення яких не суттєво впливає на результати оптимізації і тому уточнювати їх значення немає необхідності. По-третє, з'ясовуються можливі реакції ЕЕС на некеровані зовнішні впливи. Може виявитися, що вихідна математична модель потребує суттєвої корекції, оскільки практична реалізація оптимальних розв'язків не дає очікуваного результату. Тому розробка систем автоматичного керування потоками потужності та напругою з врахуванням чутливості оптимальних рішень дозволить забезпечити оптимальну величину втрат електроенергії в нормальних режимах ЕЕС і, таким чином, з'явиться можливість максимально наблизити в темпі процесу параметри режиму ЕЕС до їх оптимальних значень.

Для того, щоб виявити фізичну суть оптимізації конструктивних параметрів ЕЕС під час їх проектування і реконструкції, необхідно встановити причини відхилення режимів системи від глобального оптимуму за заданим критерієм оптимальності – технологічними втратами електроенергії, та дати їм оцінку.

Однією з основних причин неоптимальності нормальних режимів ЕЕС, що визначає їх економічність, є неоднорідність системи, яка



спричиняє додаткові втрати електроенергії в процесі її транспортування та розподілу. Крім того, неоднорідність ЕЕС призводить також до ряду інших негативних явищ, а саме: зниження якості електроенергії, додаткове перевантаження окремих ЛЕП, а також зниження рівня статичної та динамічної стійкості ЕЕС, що в свою чергу зменшує пропускну здатність систем в цілому [13, 14].

Зниження міри неоднорідності ЕЕС потребує значних капітальних витрат. Тому компенсацію негативного впливу неоднорідності ЕЕС необхідно здійснювати з врахуванням параметричної чутливості, що дозволить виявити в ЕЕС найбільш чутливі до зовнішніх збурень місця, в яких зміна параметрів дала б змогу в найбільшій мірі зменшити неоднорідність системи і, таким чином, наблизити її до однорідного стану.

У вказаному напрямку дослідження ЕЕС доцільно проводити за допомогою узагальнених залежностей між оптимальними параметрами ЕЕС та параметрами поточного режиму у вигляді законів керування. Такі узагальнення можуть бути ефективно отримані з використанням математичних моделей, побудованих на засадах теорії подібності, змінні яких пропорційні змінним оригіналу [15, 16]. Математичні моделі реальних систем, які використовуються сьогодні, створювались по мірі виникнення відповідних практичних задач відповідно до тих чи інших реальних об'єктів [15, 17, 18]. Всі вони в тій чи іншій мірі можуть використовуватися для аналізу оптимальних розв'язків. Найбільш ефективними тут є методи теорії чутливості, в основі яких лежить використання функцій чутливості або градієнтів досліджуваних якостей системи [10]. Однак, останні не досить ефективні під час аналізу оптимальних станів систем типу ЕЕС. Причини тут і в структурі самих систем, і в особливості формування їх станів [10, 15, 17].

Відповідно до таких систем отримав розвиток один з методів математичного моделювання складних динамічних систем – критеріальне моделювання [9, 15, 19, 20]. Особливістю використання критеріального моделювання є те, що оптимізаційне дослідження, в тому числі чутливості, здійснюється у відносних одиницях. При цьому, якщо мова йде про оптимальне керування, то за базові приймаються параметри системи, що забезпечують її оптимальний стан у відповідності з обраним критерієм оптимальності. За певних умов це може дати істотні переваги [9, 19].

В багатопараметричних задачах оптимальності і задачах аналізу чутливості їх оптимальних розв'язків виникають певні складнощі, пов'язані з тим, що область нечутливості критерію оптимальності формується не одним, а багатьма параметрами. Тоді області оптимальності окремих параметрів визначаються на підставі розподілу допусків

на регульовальні параметри при заданому відхиленні критерію оптимальності від його екстремальних значень.

У випадку декількох параметрів розрахунок допусків можна виконати методом послідовних наближень, підбираючи допуски на параметри так, щоб значення показника якості знаходилося в заданому допуску. Такий підхід при великій кількості параметрів може виявитися громіздким в обчислювальному відношенні. Значно простіший алгоритм дає принцип рівних впливів [10]. Але як в першому, так і в другому підходах вимагається знати параметри оптимального стану системи, а також повинні бути обчислені функції чутливості [10]. Це суттєво ускладнює задачу оцінки чутливості і в кінцевому підсумку робить неможливим використання цих способів в задачах створення і експлуатації систем автоматичного керування такими складними системами як електроенергетична. Отже, необхідно дослідити можливості критеріального моделювання стосовно розв'язування задач розподілу допусків на параметри при заданому допустимому відхиленні критерію оптимальності.

В [21] показана ефективність застосування критеріального методу для аналізу та оцінки чутливості оптимальних рішень в складних системах, розроблено засоби математичного моделювання і запропоновані алгоритми. В даній книзі критеріальний метод аналізу та оцінки чутливості оптимальних рішень вдосконалюється і розвивається стосовно електроенергетичних систем. Книга складається з чотирьох розділів.

**В першому розділі** розглянуті особливості математичного моделювання оптимального керування електроенергетичними системами з точки зору аналізу і оцінки їх чутливості. Показана можливість та перспективність застосування критеріального моделювання в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС, зокрема для аналізу чутливості оптимальних рішень.

**В другому розділі** розроблені математичні моделі умов оптимальності втрат потужності в ЕЕС для аналізу їх чутливості до зміни параметрів електричних мереж. Сформовано математичну модель ЕЕС для оцінки чутливості параметрів режиму до коефіцієнтів трансформації трансформаторів. Адаптовано метод оцінки чутливості оптимальних рішень до задач оптимального керування режимами ЕЕС. З допомогою математичного моделювання показано доцільність і ефективність компенсації негативного впливу неоднорідності ЕЕС з врахуванням параметричної чутливості. Розроблено метод формування математичної моделі ЕЕС для оптимального керування її нормальними режимами з врахуванням чутливості втрат потужності до контурних е.р.с.

**У третьому розділі** розроблено алгоритми аналізу чутливості оптимальних дискретних керуючих впливів за допомогою критеріальних моделей. Розвинуто метод розподілу допусків на параметри з використанням критеріального моделювання для функцій декількох змінних. Розроблено алгоритм аналізу чутливості математичної моделі неоднорідності ЕЕС та формування відповідного складу регулювальних пристроїв.

**В четвертому розділі** розроблено алгоритми і програми оцінки регулювального ефекту РП і визначення відповідних зон нечутливості, а також корекції законів оптимального керування у відповідності зі змінами неоднорідності ЕЕС, які відбуваються в процесі експлуатації. Виконано розрахунок матриці системних показників неоднорідності, узагальнених показників неоднорідності та побудовано залежності, що дозволяють визначити діапазон зміни параметрів ЕЕС, який забезпечує наближення ЕЕС до оптимального стану.

## 1 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Оптимізація нормальних режимів роботи ЕЕС є тим резервом, що за певних умов може забезпечити суттєву економію енергоресурсів. В нашому випадку економія енергоресурсів досягається за рахунок зменшення втрат електроенергії під час її транспортування та розподілу [22].

Для ЕЕС характерним є постійна зміна навантаження, генерування та топологія електричних мереж. Ці зміни відбуваються протягом доби, а також протягом більш тривалого часу і мають сезонний характер. Вони вимагають коригування нормальних режимів у відповідності до критерію оптимальності.

Задачі оперативного керування (протягом доби) пов'язані зі значною інтенсивністю роботи регульовальних пристроїв (РП), що, в свою чергу, викликає прискорене спрацювання їх ресурсу і зменшення надійності. Таким чином, під час оптимального керування необхідно відшукувати компромісне рішення, яке б забезпечувало економічність режимів ЕЕС і задовольняло вимоги щодо надійності електрообладнання і електропостачання. Цей компроміс може бути знайдений, якщо задача оптимального керування буде стояти не в точному досягненні оптимального режиму, а в наближенні поточного режиму до оптимального і введенні його в область оптимальності або рівноеконічності режимів.

Виникає задача побудови області оптимальності режимів ЕЕС, яка в термінах автоматичного керування ще називається областю (зоною) нечутливості. Для побудови її доцільно використати апарат теорії чутливості [10]. При цьому під час визначення меж області оптимальності необхідно врахувати особливості ЕЕС як об'єкта керування. До них, крім відмічених, відносяться також дискретність параметрів РП, різний регульовальний ефект РП, а також неточність і невизначеність вихідних даних, з допомогою яких розраховуються оптимальні режими і визначаються значення керуючих параметрів (коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів, навантаження джерел реактивної потужності) [9]. Останнє, зокрема, свідчить про те, що висока точність, з якою здійснюються оптимізаційні розрахунки, суперечить реальним умовам роботи ЕЕС. Тому необхідно розглянути особливості математичного моделювання оптимального керування ЕЕС з точки зору аналізу і оцінки чутливості оптимальних рішень. Необхідно дослідити можливості та перспективи застосування критеріального моделювання в задачах оптимального керування нор-

мальними режимами ЕЕС, а саме для аналізу чутливості оптимальних рішень.

### **1.1 Математичне моделювання оптимального керування електроенергетичними системами**

Існує цілий клас динамічних систем, оптимальне керування режимами яких розподілено в часі й у просторі. Для них характерне довгострокове і короткострокове планування режимів і оперативне керування в темпі процесу з загальною тенденцією до автоматизації останнього на базі сучасної обчислювальної техніки і мікропроцесорних систем [24–32].

Це стосується і ЕЕС. Загальною задачею для них є поєднання оперативного й автоматичного керування [24, 32, 33]. Очевидно, що від того, наскільки вдало буде вирішена ця задача, залежить технічна й економічна ефективність керування режимами ЕЕС в цілому. Основні проблеми тут полягають в розробці відповідних математичних моделей, що враховують динаміку об'єкта керування і самої системи керування.

Складність задач автоматичного й оперативного керування визначається, головним чином, багаторівневою територіальною і тимчасовою ієрархією, випадковим характером збурень, що діють на системи, які змінюються в часі, параметрами об'єктів керування, а також багатомірністю і нелінійним характером останніх.

Незважаючи на те, що вже було розв'язано багато задач автоматичного й оперативного керування динамічними системами, включаючи електроенергетичні [24, 29–34], подальше їх розповсюдження й вдосконалення залишається актуальним у зв'язку з широким впровадженням сучасних засобів обчислювальної техніки й інформаційних технологій. Впровадження цих задач у сучасні АСУ передбачає широку автоматизацію основних функцій процесу керування, а саме: збору та обробки інформації, прийняття рішень з керування режимами, їх техніко-економічного аналізу і автоматизації основних функцій керування. Сукупність сучасних ЕОМ, математичних методів моделювання і технічних засобів, що реалізують керуючі впливи, дозволяє перейти на якісно новий рівень автоматичного керування режимами ЕЕС.

Досвід впровадження оптимізаційних програм у практику оперативного керування ЕЕС показує, що для досягнення ефективності оптимізаційних заходів необхідно постійно здійснювати корегування керуючих параметрів [35, 36]. В зв'язку з цим є доцільним і актуальним дослідження ЕЕС, яке проводиться за допомогою узагальнених залежностей між оптимальними параметрами ЕЕС та параметрами

поточного режиму у вигляді законів керування. Такі узагальнення можуть бути ефективно отримані з використанням математичних моделей, побудованих на засадах теорії подібності, змінні яких пропорційні змінним оригіналу [15, 16].

Оптимізаційні розрахунки є "інструментом" для дослідження режимів ЕЕС і виконуються періодично, а їх результати подаються у вигляді керуючих впливів на засоби регулювання. Під час такого керування необхідно враховувати інтенсивність керуючих впливів, ресурс і надійність комутаційних пристроїв, а також ранжування регулювальних пристроїв за їх регулювальним ефектом [37, 38].

Враховуючи великий об'єм розрахунків, пов'язаних зі складністю сучасних ЕЕС, задачу такого типу керування режимом складно розв'язати і, як наслідок, результати розрахунків часто не доводяться до практичної реалізації або є малоефективними. Тому було досліджено і розроблено ряд методів, які базуються на аналізі стійких математичних моделей, що являють собою узагальнені залежності між параметрами системи [39]. Один з таких методів [40, 41] передбачає використання регресійних моделей для керування режимами. У відповідності з цими залежностями можливе формування законів регулювання і настроювання локальних автоматичних пристроїв, які здійснюють узгоджене використання регулювальних пристроїв. Застосування такого принципу керування дійсне тільки для систем з високою мірою повторюваності однакових чи близьких режимів. У [40] передбачається використання регресійних залежностей як для централізованого, так і для локального керування нормальними режимами ЕЕС. Характерною рисою методики, запропонованої в [40], є те, що в ній для побудови залежностей між параметрами режиму використовуються методи активного експерименту. Застосування методів планування експерименту, тобто побудова регресійних залежностей за результатами активних експериментів, підвищує обчислювальну ефективність регресійного керування. Аналогічний підхід використовується і в [41], де розв'язок задачі керування режимом базується на моделюванні реакції системи на основі експериментів над її режимами.

Досить перспективним є використання методів теорії подібності, які базуються на основі критеріального методу [9, 19]. В наш час критеріальний метод все більш широко застосовується в електроенергетиці. Пояснюється це тим, що його можна використовувати на всіх етапах розв'язування нелінійних оптимізаційних задач, цільова функція та обмеження яких мають форму поліномів. Однаковою є міра його ефективності і при математичному моделюванні, пошуці оптимального розв'язку, аналізі отриманого розв'язку на чутливість та його практичній реалізації.

При розв'язанні задач оперативного й автоматичного керування нормальними режимами ЕЕС виявляється тенденція переходу від задач аналізу їх функціонування до більш складних задач керування процесами, які включають вибір оптимальних методів і засобів керування для цілеспрямованого коригування ходу процесів і характеристик керованих об'єктів. Тому виникає необхідність удосконалення математичної моделі процесу оперативно-диспетчерського керування нормальними режимами електроенергетичних систем.

Керування нормальними режимами ЕЕС за допомогою регулювальних пристроїв (трансформаторів і автотрансформаторів з регулюванням під навантаженням, лінійних регуляторів, джерел реактивної потужності) займає важливе місце серед заходів зменшення втрат електроенергії в ЕЕС. Ця задача відноситься до класу задач теорії керування складними динамічними системами з квадратичним критерієм якості (у нашому випадку це еквівалентні втрати активної потужності), яка в загальному вигляді формулюється так [42, 43]:

мінімізувати функцію керування

$$F(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{t}(\mathbf{t}) + \mathbf{t}(\mathbf{t}) + \mathbf{t}(\mathbf{t})] dt \quad (1.1)$$

у просторі станів

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{A}(\mathbf{t})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{t})\mathbf{u}; & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0; \\ \mathbf{t}(\mathbf{t}) &= \mathbf{t}_x(\mathbf{t}) + \mathbf{t}_u(\mathbf{t}), & \mathbf{x} &\in \mathbf{X}, \mathbf{u} \in \mathbf{U}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $\mathbf{t}(\mathbf{t})$ ,  $\mathbf{t}(\mathbf{t})$ ,  $\mathbf{t}(\mathbf{t})$  – відповідно вектори стану, керування і спостереження;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{t}_x$ ,  $\mathbf{t}_u$  – матриці постійних коефіцієнтів;  $t_0$ ,  $t_k$  – початок і кінець інтервалу часу;  $\mathbf{x}_0$  – початкове значення вектора стану;  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{U}$  – області допустимих значень параметрів стану і керування системи.

Перше рівняння (1.1) є рівнянням режиму системи, а його розв'язок задовольняє початкову умову  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$ , де вектор режиму  $\mathbf{t}(\mathbf{t}) = \psi[\mathbf{t}_x(\mathbf{t}), \mathbf{t}_u(\mathbf{t})]$ . Друге рівняння (1.2) визначає вихідні параметри в залежності від  $\mathbf{t}(\mathbf{t})$  і  $\mathbf{t}(\mathbf{t})$ .

При керуванні нормальними режимами ЕЕС критерієм оптимальності може бути економічний критерій – мінімум витрат або ж втрат за умови дотримання заданих вимог з надійності і якості [44]. Тому коли задача оптимального керування режимами ЕЕС ставиться таким чином, що на стадії формування цільової функції метою є отримання законів керування у вигляді, зручному для подальшої їх автоматичної

реалізації, тоді функція керування (1.1), враховуючи (1.2), матиме вигляд [30]

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{W}(t)\mathbf{y}(t); \quad \mathbf{W} \in \mathbf{X}; \quad \mathbf{u}_0 \in \mathbf{U}_0, \quad (1.3)$$

де  $\mathbf{W}$  – матриця зворотного зв'язку;  $\mathbf{u}_0$  – область оптимальних значень керуючих параметрів, межі якої визначаються за результатами аналізу чутливості оптимальних рішень.

Вираз (1.3) є законом оптимального керування, реалізація якого дозволяє досягнути мінімуму функції (1.1).

Найбільш відомим напрямком детермінованих функціонально-адаптивних систем керування є керування з еталонною моделлю [34]. Схема такої адаптивної системи з еталонною моделлю показана на рисунку 1.1.

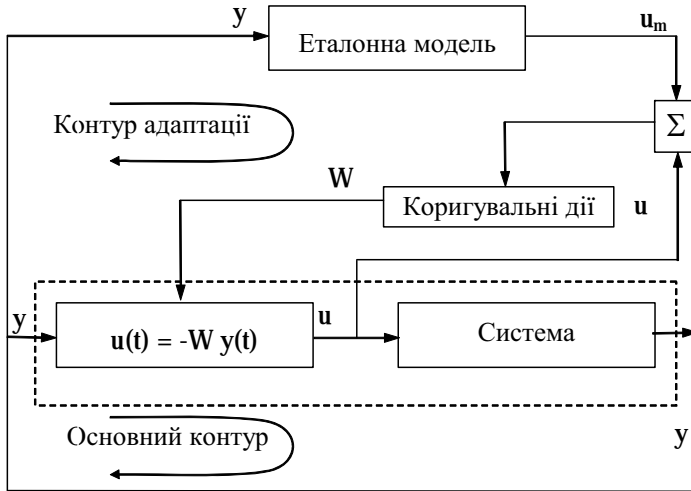


Рисунок 1.1 – Адаптивна система керування з еталонною моделлю

В цьому випадку еталонна модель є частиною системи керування. Система керування, в цьому випадку, складається з двох контурів. Внутрішній контур включає об'єкт керування і регулятор. Параметри регулятора налагоджуються зовнішнім контуром керування таким чином, щоб мінімізувати неузгодженість між виходом моделі  $\mathbf{u}_m$  і виходом процесу  $\mathbf{y}$ .

На різних етапах впровадження системи керування еталонна модель може виконувати різні функції. На початковому етапі автома-



тизації, коли потрібно узгоджувати оперативне керування з автоматичним – це імітаційна модель, за допомогою якої оперативний персонал не тільки визначає і корегує налагоджувальні параметри систем автоматичного керування (САК), але й має можливість "програвати" режими системи й оцінювати наслідки керуючих впливів, у тому числі й автоматичних [45, 46]. На завершальному етапі еталонна модель стає основним елементом самоналагодження і самоаналізу САК.

Ефективність такого підходу залежить від співвідношення частоти отримання відгуків і швидкості змін, що відбуваються в об'єкті керування під впливом зовнішніх факторів. Чим стабільніший об'єкт, тим ефективніший процес адаптації і керування в цілому. Досвід роботи диспетчерських служб ЕЕС показує, що режими енергосистем, наприклад, відносно стійкі протягом 15–30 хвилин [41]. Виходячи з циклічності розв'язання задач в типових оперативно-інформаційних керуючих комплексах (ОІКК) АСУ та з відносною стійкістю режиму, використовується дискретність керування нормальними режимами ЕЕС з періодом  $T=t_k-t_0$ .

У сформульованій задачі керування (1.1), (1.2) неявно припускається, що область можливих значень  $u$  вектора параметрів керування є відомою. Однак у багатьох випадках таке припущення необгрунтоване. Ця область повинна бути визначена. Як правило, розв'язок задачі з визначення  $u$  передуює оптимізації. Її значення повинне бути таким, щоб виконувалась умова працездатності або ж нормального функціонування системи [10]

$$x \in X \text{ для будь-яких } u \in U. \quad (1.4)$$

Однак, у багатьох практичних випадках значні витрати часу і засобів на отримання результатів оптимізації виявляються невиправданими через занадто велику чутливість системи, що оптимізується, до зміни параметрів, в результаті чого ця система практично виявляється непрацездатною. Одним із методів подолання цих ускладнень є постановка задачі оптимізації з врахуванням вимог до чутливості.

Ефективним апаратом дослідження систем керування є методи теорії чутливості [10]. Однак, аналіз відомих методів теорії чутливості, які ґрунтуються на використанні функцій чутливості або градієнтів досліджуваних якостей системи, показав, що вони є недостатньо ефективними для аналізу і синтезу САК ЕЕС. Причини тут і в структурі самої системи, і в особливостях формування її станів [36]. В цій роботі розглядається один з можливих способів вирішення проблеми чутливості оптимального керування режимами ЕЕС. В основу методу, що пропонується, покладено критеріальне моделювання [11, 47, 48]. Осо-

близькістю використання критеріального методу є те, що оцінка чутливості здійснюється у відносних одиницях. При цьому, якщо мова йде про оптимальне керування, то за базові беруться параметри системи, які забезпечують її оптимальний стан у відповідності з обраним критерієм оптимальності.

При постановці задачі оптимального керування в іменованих одиницях, з урахуванням чутливості, її розв'язок матиме вигляд [46, 49]:

$$\mathbf{r}(t) = - \mathbf{g}(t), \quad (1.5)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} + \Delta u_{уст\ i} & \text{при } u_i \geq u_i^+; \\ \mathbf{0} & \text{при } u_i^+ > u_i > u_i^-; \\ - \Delta u_{уст\ i} & \text{при } u_i \leq u_i^-, \end{cases} \quad (1.6)$$

де  $\mathbf{g}$  – матриця зворотного зв'язку;  $\mathbf{r}$  – коригувальні дії САК, які вводять систему в область оптимальності (нечутливості);  $\Delta u_{уст\ i}$  – добавка, яка, після додавання до уставки  $u_{уст\ i}$ , викликає відповідні дії РП по введенню керуючого параметра в зону оптимальності (знак визначається за допомогою знакової функції з зоною нечутливості  $\text{sgzm}\left(\frac{dP_i}{dt}\right)$ );  $i$  –  $i$ -та складова вектора керування;  $u_i^+, u_i^-$  – верхня та нижня межі зони нечутливості зміни  $u_i$ . Практична реалізація (1.5), (1.6) показана на рисунку 1.2. З рис. 1.2 видно, як пов'язані зони нечутливості критерію оптимальності  $\delta F$  та керуючого параметра  $\delta u$ . Для заданого  $\delta F$  зона нечутливості  $\delta u$ , що за своїм змістом є областю оптимальності, визначається з умов

$$\begin{cases} F = f(\mathbf{u}); \\ F = F_0 + \delta F, \end{cases} \quad (1.7)$$

де  $F_0$  – оптимальні значення функції якості;  $u_0$  – оптимальне значення керуючого параметра, яке може прийматися в якості уставки САК.

Згідно з (1.5), (1.6), як це показано на рис. 1.3., параметр  $\mathbf{u}$  підтримується в зоні нечутливості. В разі виходу параметра з цієї зони, коригувальними діями РП  $\mathbf{r}$ , він повертається в область оптимальності (на рис. 1.3. це моменти часу  $t_1, t_2, t_3$ ).

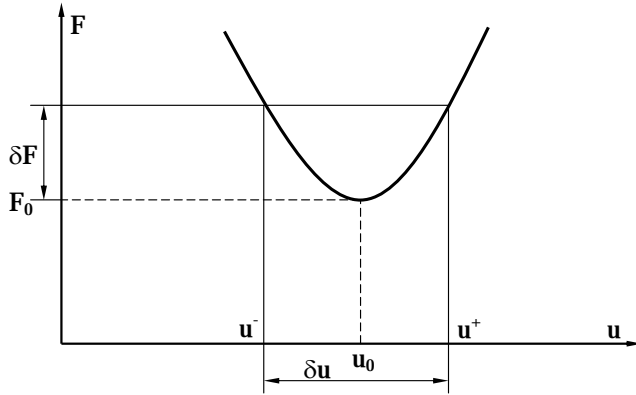


Рисунок 1.2 – Зона нечутливості критерію оптимальності та керуючого параметра

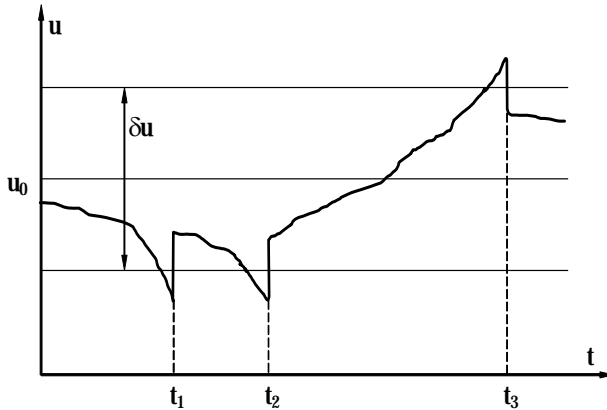


Рисунок 1.3 – Оптимальне керування з врахуванням чутливості

Оптимальне керування у відповідності з (1.5), (1.6) потребує визначення меж зон нечутливості  $u_1^+$  та  $u_1^-$ , що пов'язано з необхідністю розв'язку зворотної задачі чутливості [10]. Для ЕЕС ця задача є особливо складною через відсутність виразу цільової функції в аналітичній формі та через необхідність пошуку її екстремуму. Тому розв'язувати її доцільно критеріальним методом [16].

В критеріальній формі всі величини подаються у відносних одиницях [15, 47]. Таким чином, закон оптимального керування (1.5), (1.6) відповідно перепишеться:

$$\mathbf{u}^*(t) = -\pi \mathbf{y}^*(t), \quad (1.8)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} +\Delta \mathbf{u}_{уст\ i} & \text{при } \mathbf{u}_{*i} \geq \mathbf{u}_{*i}^+; \\ 0 & \text{при } \mathbf{u}_{*i}^+ > \mathbf{u}_{*i} > \mathbf{u}_{*i}^-; \\ -\Delta \mathbf{u}_{уст\ i} & \text{при } \mathbf{u}_{*i} \leq \mathbf{u}_{*i}^-, \end{cases} \quad (1.9)$$

де  $\pi$  – за своїм змістом є, як це показано в [9], матрицею критеріїв подібності;  $\mathbf{u}_{*i} = \mathbf{u}_i / \mathbf{u}_{i0}$  – параметри РП, за допомогою яких оптимізується режим системи, у відносних одиницях (за базисні беруться, як уже відзначалося, оптимальні значення параметрів  $\mathbf{u}_{i0}$ ). Всі інші величини в (1.8), (1.9) переводяться у відносні одиниці за аналогічною схемою.

Ілюстрація практичної реалізації (1.8), (1.9) показана на рисунках 1.4, 1.5. На рис. 1.4 функція якості наведена у відносних одиницях –  $F_* = F / F_0$ .

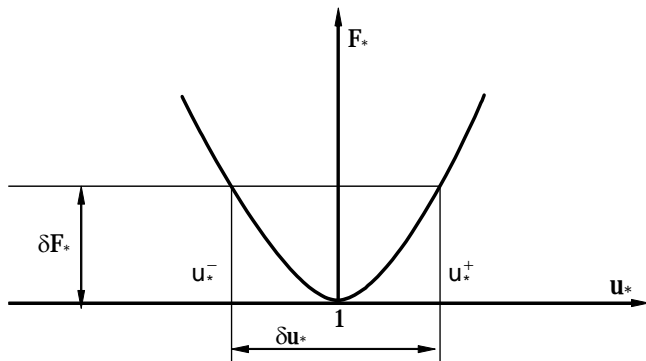


Рисунок 1.4 – Зона нечутливості критерію оптимальності та керування параметра у відносних одиницях

Відповідно, зона нечутливості критерію оптимальності  $\delta F_*$  задається, а керуючий параметр  $\delta u_*$  визначається у відносних одиницях –  $\delta F_* = \delta F / F_0$ ,  $\delta u_* = \delta u / u_0$ .

При цьому, якщо початок координат перенесений в одиницю, то зона нечутливості  $\delta u_*$ , визначається з умов

$$\begin{cases} F_* = f(u_*); \\ F_* = 1 + \delta F_*. \end{cases} \quad (1.10)$$

На відміну від попереднього випадку уставка САК (1.8), (1.9) дорівнює одиниці (рис. 1.5), а зона нечутливості  $\delta u_*$  задається у відносних одиницях (в реальних пристроях частіше в %). В усіх інших, дії САК аналогічні.

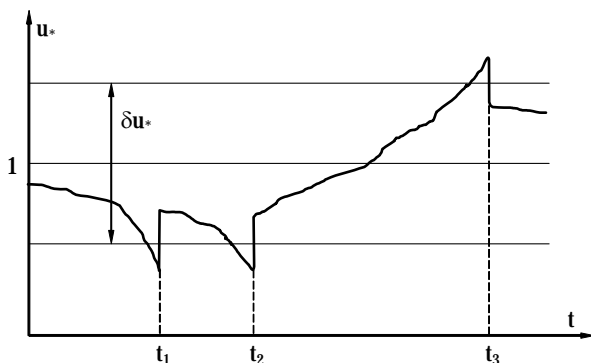


Рисунок 1.5 – Оптимальне керування з врахуванням чутливості у відносних одиницях

## 1.2 Подібне моделювання в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС

В задачах автоматизації оптимального керування нормальними режимами ЕЕС існує необхідність мати для функціонування системи автоматичного керування аналітичні залежності між параметрами на її вході і виході. Очевидно, що й результати оцінки чутливості повинні бути подані в аналітичному вигляді. Розв'язок задачі оптимального керування реалізується в нашому випадку за допомогою адаптивної системи керування, схема якої зображена на рис. 1.1. При цьому передбачається, що отриманий закон керування реалізується в критеріальній формі (1.8), (1.9). Саме завдяки властивостям критеріального методу чутливість досліджується без визначення функцій чутливості та оптимальних значень параметрів. У випадку, коли цільова функція

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-256-3>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-256-3>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-256-3>

*Наукове видання*

**Лежнюк Петро Дем'янович  
Остра Наталя Вікторівна  
Зелінський Віктор Цезарович**

**ОЦІНЮВАННЯ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО  
КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ  
КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В.Зелінським

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к.114  
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 25.06.2008 р.  
Формат 29,7×42 ¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. др. арк. 7,51  
Наклад 100 прим. Зам. № 2008-092

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к.114  
Тел. (0432) 59-81-59