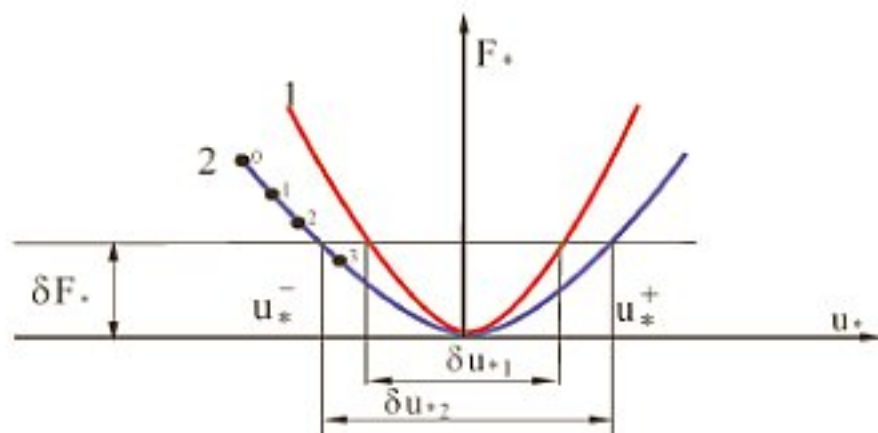


П. Д. ЛЕЖНЮК, В. О. ЛЕСЬКО

## ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ



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

**П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько**

**ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 621. 316.11

ББК 31.279

Л 40

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 28.10.2010 р.)

Рецензенти:

**О. В. Данилюк**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Кутін**, доктор технічних наук, професор

**Лежнюк, П. Д.**

Л 40 Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько. – Вінниця, ВНТУ, 2010. — 120 с.

ISBN 978–966–641–390-4

В монографії наведено нове вирішення актуальної задачі компенсації негативного впливу неоднорідності електричних мереж енергосистеми, що полягає у вдосконаленні математичних моделей та формуванні умов оптимальності режимів ЕЕС з врахуванням чутливості втрат активної потужності у вітках її схеми до збурень у вузлах.

Монографія розрахована на інженерно-технічних працівників енергопостачальних компаній, а також може бути корисною студентам і аспірантам, які спеціалізуються в галузі математичного моделювання та оптимізації втрат електроенергії в електричних мережах.

**УДК 621. 311**

**ББК 31.279**

**ISBN 978–966–641–390-4**

© П. Лежнюк, В. Лесько, 2010

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	7
1. ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ В НЕОДНОРІДНИХ ЕЕС ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРИ НЕВЕЛИКИХ ЗБУРЕННЯХ...	10
1.1. Аналіз і оцінка чутливості до збурень в ЕЕС.....	11
1.1.1. Основні впливні чинники під час аналізу чутливості режимів ЕЕС.....	11
1.1.2. Аналіз критеріїв функціонування ЕЕС і їх зв'язок з чутливістю.....	12
1.1.3. Методи аналізу і оцінки чутливості до зовнішніх збурень в ЕЕС.....	16
1.2. Умови керованості та спостережності при компенсації збурень в ЕЕС.....	18
1.2.1. Вимірювання та спостереження як необхідна складова частина керування.....	18
1.2.2. Аналіз та класифікація збурень в ЕЕС.....	20
1.2.3. Умови спостережності та чутливості неоднорідних ЕЕС при збуреннях.....	21
1.2.4. Цілі дослідження чутливості та неоднорідної структури ЕЕС.....	22
1.2.5. Підходів щодо дослідження спостережності та чутливості в неоднорідностей ЕЕС з врахуванням похибки телеметрії.....	23
1.2.5.1. Вплив похибки телеметрії на результати розрахунків в ЕЕС.....	23
1.2.5.2. Спостережність та чутливість в неоднорідних ЕЕС з врахуванням похибки телеметрії.....	25
1.2.5.3. Дослідження та спостережність режимів ЕЕС на основі виявлення їх структурної неоднорідності.....	27
1.3. Натурно-імітаційне моделювання в оптимальному керуванні режимами неоднорідних електричних мереж.....	28
1.3.1. Вплив неоднорідності на процес розрахунку оптимальних режимів ЕЕС.....	28

1.3.2. Натурно-імітаційне моделювання при керуванні нормальними режимами в неоднорідних ЕЕС з врахуванням чутливості.....	30
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ І АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ НЕОДНОРІДНИХ ЕЕС ДО ЗБУРЕНЬ.....	33
2.1. Математичне моделювання потокорозподілу в ЕЕС з врахуванням чутливості як задача оптимального керування.....	34
2.2. Вплив розрахункових умов на чутливість втрат потужності в ЕЕС.....	38
2.3. Математична модель оцінювання чутливості втрат у вузлах та вітках схеми ЕЕС.....	44
2.3.1. Виділення втрат потужності від перетоків у вузлах та вітках на основі формування матриці коефіцієнтів.....	44
2.3.2. Визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності	47
2.3.3. Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках до напруги у вузлах ЕЕС.....	49
2.3.4. Визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності до похибки телевимірювань у вузлі ЕЕС.....	51
2.4. Висновки.....	52
3. НАТУРНО-ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ АНАЛІЗУ ЧУТЛИВОСТІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЕС.....	53
3.1. Натурно-імітаційне моделювання та аналіз чутливості в оптимальному керуванні ЕЕС.....	53
3.1.1. Організація процесу використання ОІКК.....	54
3.1.2. Організація моделюючих процесів.....	57
3.1.3. Керування процесом випробування ОІКК.....	60
3.1.4. Алгоритм керування транзитними перетіканнями з врахуванням чутливості та з використанням натурно-імітаційної моделі у середовищі TRACE MODE.....	63
3.2. Алгоритм визначення та аналізу втрат електроенергії в ЕЕС із врахуванням чутливості засобами АСКОЕ.....	66
3.3. Алгоритми практичної реалізації методів оцінки та аналізу чутливості втрат потужності у вітках схеми при невеликих збуреннях у вузлах ЕЕС.....	70
3.3.1. Алгоритм визначення чутливості втрат потужності у вітках від потужностей у заданих вузлах.....	70

3.3.2. Алгоритм визначення чутливості параметрів режиму ЕЕС до збурень у вузлах схеми.....	72
3.3.3. Алгоритм визначення чутливості втрат до похибки телевимірювань у вузлі мережі ЕЕС.....	75
3.3.4. Практична компенсація збурень в нормальних режимах ЕЕС з врахуванням чутливості.....	78
3.4. Оцінка якості функціонування системи компенсації впливу збурень у вузлах на втрати потужності.....	81
3.5. Висновки .....	86
<b>4. ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ЗБУРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ...</b>	<b>87</b>
4.1. Чутливість втрат потужності у вітках електричної мережі 110-750 кВ до збурень .....	87
4.1.1. Чутливість сумарних втрат в електричних мережах до збурень у вузлах схеми.....	88
4.1.2. Чутливість втрат у вітках електричної мережі до збурень у вузлах схеми.....	91
4.1.3. Визначення чутливості втрат до похибки телевимірювань у вузлі електричної мережі.....	94
4.2. Оцінювання чутливості втрат потужності в неоднорідних електричних мережах до збурень у їх вузлах.....	95
4.2.1. Залежність чутливості втрат потужності від збурень у вузлах.....	95
4.2.2. Компенсація втрат потужності в електричних мережах, викликаних збуреннями у вузлах.....	99
4.3. Висновки .....	108
<b>ПІДСУМКИ .....</b>	<b>109</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>111</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКУФ	– автоматичний контроль і управління функціонуванням;
АСДК	– автоматизована система диспетчерського керування;
БВ	– балансвальний вузол
БР	– базовий режим
е.р.с.	– електрорушійна сила;
ЕЕС	– електроенергетична система;
ЕК	– енергетична компанія;
ЛЕП	– лінія електропередачі;
НН	–нижча напруга;
ОІКК	– оперативний інформаційно-керувальний комплекс;
РП	– регулювальний пристрій;
РПН	– регулювання під напругою;
САК	– система автоматичного керування;
ВН	– вища напруга;
УПК	– установка поздовжньої компенсації.

## ВСТУП

Зміни, які відбулися в енергетиці України за останні роки, пов'язані, перш за все, з ринковою орієнтацією всього енергетичного сектора, виявили пріоритетність і актуальність досліджень, направлених на розв'язання задач з енергозбереження на новому якісному рівні. І однією з актуальних, з погляду зниження втрат електроенергії в електроенергетичних системах (ЕЕС), є завдання оперативного моніторингу і мінімізації втрат активної потужності при її передачі та розподілі. Зокрема, важливість цієї задачі зростає з переходом до електропостачання за двосторонніми угодами і з впровадженням нової моделі ринку – балансууючого ринку [1–3].

ЕЕС постійно знаходяться під дією зовнішніх і внутрішніх збурень. Збурення можуть виникати в ЕЕС в одній або декількох точках одночасно. В залежності від їх значення наслідки можуть характеризуватися кількісними змінами параметрів режиму в межах допустимих їх змін або якісними змінами режиму, наприклад, втратою стійкості. За післядією це дві різні задачі і розв'язуються вони різними методами [4–6].

Складність утримання або введення режиму ЕЕС в допустиму область полягає в тому, що реакція параметрів режиму у різних її вузлах і вітках на збурення суттєво відрізняється. Відповідно вимагається різна дія окремих регулюючих пристроїв (РП) (джерел активної і реактивної потужності, трансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням, лінійних регуляторів тощо) на параметри режиму елементів і підсистем ЕЕС. Вплив РП носить системний характер і тому необхідно розглядати зміну їх параметрів як вплив не тільки на окремі параметри режиму, а й на загальносистемні характеристики, такі як сумарні втрати активної потужності в електричних мережах ЕЕС, втрати від транзитних перетоків потужності, розподіл навантаження між джерелами потужності, міжсистемні перетоки потужності. Останнє, по суті, стосується задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС [7–9], а тому в рамках цієї задачі і доцільно визначати дію РП як реакцію на збурення в системі.

Для забезпечення ефективного керування перетіканнями потужності доцільно оцінювати чутливість втрат потужності до зміни навантаження (транзиту). На сьогодні розроблено низку методів визначен-



ня втрат електроенергії від транзитних перетікань [10–12]. Розроблено також системи оптимального керування транзитними потоками потужності в ЕЕС з метою їх перерозподілу для зменшення впливу на паралельно працюючі мережі нижчої напруги та для зменшення транзитних втрат [13, 14]. Через зміну умов функціонування ЕЕС їх необхідно вдосконалювати. Перспективним тут є використання методів теорії подібності і подібного моделювання [15, 16].

В структуру існуючої системи оптимального керування нормальними режимами ЕЕС входить імітаційна модель процесу як елемент, призначений для верифікації програмних засобів, а також для дослідження законів оптимального керування та коригування їх відповідно до зміни умов в ЕЕС [17–21].

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 [8, 22–24].

Реакція на збурення в системі перетікань потужності, в тому числі транзитних, і відповідний вплив їх на значення втрат потужності, а також на ефективність дій, направлених на компенсацію неоднорідності електричних мереж, залежить від структурних характеристик ЕЕС. Аналіз та оцінка впливу збурень в ЕЕС на параметри режиму і його характеристики дозволяє дослідити структурні властивості електричних мереж і системи в цілому. Врахування структурних властивостей ЕЕС для вирішення завдань оптимального керування виправдовує витрати на попереднє отримання інформації про них [25–30]. Подальше їх використання для розрахунку та практичної реалізації керуючих впливів в АСДК за допомогою натурно-імітаційного моделювання суттєво підвищують техніко-економічну ефективність оптимального керування режимами ЕЕС в темпі процесу.

Книга складається з чотирьох розділів. У *першому розділі* розглядаються особливості моделювання оптимального керування електроенергетичними системами з точки зору аналізу і оцінки їх чутливості до невеликих збурень в неоднорідних електричних мережах. У *другому розділі* адаптовано метод визначення коефіцієнтів чутливості до збурень підчас оптимального керування режимами ЕЕС, розроблено математичні моделі умов оптимальності втрат потужності в ЕЕС для аналізу їх чутливості до зміни параметрів режиму електричних

мереж, сформовано математичну модель ЕЕС для оцінки чутливості параметрів режиму до зміни потужності у вузлах. У *третьому розділі* наведено алгоритм реалізації методу визначення втрат потужності з використанням залежностей між параметрами режиму для отримання значення показника чутливості при зміні навантаження у вузлі ЕЕС, а також алгоритми практичної реалізації законів керування перетоками потужності для підвищення ефективності заходів зі зменшення втрат потужності в неоднорідних ЕЕС з врахуванням чутливості параметрів режиму до збурень в системі. У *четвертому розділі* на прикладі реальних ЕЕС показана працездатність, ефективність і адекватність алгоритмів, запропонованих у попередніх розділах. Проведено практичні розрахунки при різних видах невеликих збурень в електричних системах, визначено чутливість втрат у вітках схеми до впливу цих збурень для більш точних оптимізуючих дій.

## **1 ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ В НЕОДНОРІДНИХ ЕЕС ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРИ НЕВЕЛИКИХ ЗБУРЕННЯХ**

Оскільки нормальні режими ЕЕС піддаються постійним збуренням, то вимагається відповідна реакція на них з боку системи оптимального керування. Можливі два випадки: 1) в результаті таких збурень, як зміна навантаження або генерування у вузлах електричних мереж, режим залишається в області оптимальності; 2) значення критерію оптимальності (сумарних втрат активної потужності) вийшло за межі області оптимальності. В першому випадку ніяких дій регулюючими пристроями (РП) не потрібно. В іншому випадку необхідно визначитися, якими РП і як вводити режим в область оптимальності. Очевидно, що не всіма РП це в однаковій мірі ефективно робити [31–33].

В неоднорідних мережах в результаті збурень зміна втрат потужності у вітках відбувається не пропорційно. Значення критерію оптимальності, в основному, змінюється в результаті приростів втрат тільки у частині віток. Яких саме, – це залежить від параметрів ЕЕС, а не тільки цих віток, а також від місця збурень в системі. Щоб виділити в ЕЕС вітки з найбільшими приростами втрат в результаті збурень в певному вузлі (вузлах), необхідно оцінити чутливість втрат у вітках електричних мереж до змін потужності у вузлах [26].

Таким чином, для підвищення ефективності заходів зі зменшення втрат потужності в неоднорідних ЕЕС, зокрема, для раціонального використання ресурсу регулюючих пристроїв, необхідно оцінювати і враховувати чутливість параметрів режиму до збурень в системі. В загальному задача чутливості оптимального керування режимами ЕЕС розв'язана у [6, 33, 34]. У зв'язку з новими обставинами (електропостачання за двосторонніми угодами, напруженість в оперативному балансуванні електроенергії, адресність передачі електроенергії і необхідність визначення відповідних втрат, транзитні перетоки і відшкодування за них, тощо [2, 3, 35–37]) відомі методи необхідно розвивати і вдосконалювати.

В зв'язку з цим, необхідно вдосконалювати та розробляти математичні моделі, що дозволяють більш ефективно розв'язувати задачі

оптимального керування режимами ЕЕС з врахуванням чутливості втрат. Вони повинні давати можливість аналізувати і на основі результатів аналізу проводити оптимізацію режиму ЕЕС, а також визначати найбільш впливові фактори, які можуть бути враховані при прийнятті оптимальних рішень. Таким чином, у цьому розділі розглядаються особливості моделювання оптимального керування електроенергетичними системами з точки зору аналізу і оцінки їх чутливості до невеликих збурень в неоднорідних електричних мережах.

## **1.1. Аналіз і оцінка чутливості до збурень в ЕЕС**

### **1.1.1. Основні впливні чинники, що впливають на аналіз чутливості режимів ЕЕС**

Збурення в системі призводять до зміни стану ЕЕС з оптимального до неоптимального. Повернути в оптимальний стан систему можна діями всіх РП, що є нерациональним і недоцільним, або РП з найбільшим регулювальним ефектом. При цьому для підвищення ефективності оптимального керування здійснюється оцінка чутливості критерію оптимальності до збурень в ЕЕС, вибирається склад регулюючих пристроїв, якими найбільш рационально режим ЕЕС вводиться в область оптимальності, і визначаються налагоджувальні параметри відповідних систем автоматичного керування (САК). Такий підхід дозволяє мінімізувати витрати ресурсу РП. Чутливість мережі до зміни значень параметрів системи вказує на те, які оцінки параметрів слід покращити для того, щоб знайти розв'язок із заданою точністю.

В результаті аналізу чутливості визначається таке. По-перше, відшуковуються параметри, що найбільше впливають на критерій оптимальності за умов спостережності та керованості системи [15]. Якщо такі параметри є, то доцільно досліджувати питання щодо корекції відповідних властивостей системи з врахуванням похибки телевимірювань. По-друге, визначається вплив на критерій оптимальності режимів системи варіацій неточно заданих параметрів. Аналіз чутливості дозволяє реально сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення задачі керування режимами, а також виділити ті параметри, похибка визначення яких не має великого впливу на результати розрахунків, і тому уточнювати їх значення немає необхідності [26, 30, 38]. По-третє, з'ясовуються можливі реакції системи на некеровані зовні-

шні впливи. Може виявитись, що вихідна математична модель потребує суттєвої корекції, оскільки практична реалізація запланованих режимів не дає очікуваного результату [19, 33].

В наш час використовується велика кількість математичних моделей реальних систем. Ці моделі створювались впродовж виникнення відповідних практичних задач стосовно до тих чи інших реальних об'єктів [7, 8, 16, 39–41]. Всі вони в тій чи іншій мірі можуть використовуватись для аналізу режимів ЕЕС. Найбільш ефективними тут є методи теорії чутливості, в основі яких лежить використання функцій чутливості або градієнтів властивостей системи, що досліджується [42, 43]. Однак, останні не досить ефективні під час аналізу станів систем типу ЕЕС.

При оптимальному керуванні в ЕЕС ефективність реалізації запланованих режимів залежить від низки чинників, що не враховуються або не можуть бути враховані в програмах розрахунку режимів ЕЕС, в тому числі оптимальних. До таких чинників відносяться надійність РП, дискретність їхніх параметрів, неточність і невизначеність вихідних даних, недостатня спостережність і керованість системи та ін. [7, 27, 39, 44]. Тому висока точність, з якою здійснюються розрахунки режимів ЕЕС, може не відповідати реальному стану в ЕЕС.

Відзначені чинники можуть бути враховані при аналізі результатів розрахунків на чутливість [26, 40]. У результаті такого аналізу визначається обґрунтований рівень керуючих впливів на РП для реалізації бажаного варіанта в межах заданої точності.

### **1.1.2. Аналіз критеріїв функціонування ЕЕС і їх зв'язок з чутливістю**

Наявність нелінійності призводить до необхідності досліджувати чутливість параметрів режиму ЕЕС у всьому можливому діапазоні зміни навантажень – від легких до важких режимів, для підвищення ефективності оптимізаційних заходів. Ще важливішим є питання щодо врахування нелінійності в нормальних режимах ЕЕС. Ситуація тут ускладнюється тим, що при великих збуреннях динаміка поведінки елементів і системи в цілому може принциповим чином визначатися нелінійностями. При цьому практично завжди розділення збурення на дози за аналогією із усталеними режимами неправомірне [4].

В той же час ефективний аналіз чутливості в неоднорідних ЕЕС в нормальних режимах на основі систем нелінійних диференціальних рівнянь ще проблематичніший, ніж для усталених режимів. Тому лінеаризація рівнянь й інші припущення неминучі, проте необхідно чітко уявляти собі прийнятну область їх використання і міру достовірності отримуваних оцінок. Ця проблема вирішується за чіткого визначення умов і меж застосовності лінеаризації і допущень з урахуванням реальних властивостей досліджуваної ЕЕС.

Сама по собі реакція параметрів режиму (чутливість) системи на зовнішні збурення небезпечна лише тоді, коли відповідна зміна параметрів режиму призводить до помітного погіршення якого-небудь критерію функціонування ЕЕС. Такими критеріями є [5]:

1) допустимість режиму, тобто знаходження всіх параметрів режиму, зокрема модулів напруги і струмів, в допустимих технологічних межах, які визначаються якістю електроенергії, умовами роботи ізоляції, термічними і механічними перевантаженнями устаткування, F-критерій (від feasibility – допустимість);

2) статична стійкість, зокрема стійкість навантаження при зниженні напруги у вузлах S-критерій (steady state stability);

3) динамічна стійкість – T-критерій (transient stability);

4) оперативна надійність – здатність системи уникати порушень статичної і динамічної стійкості, а також забезпечити допустимість режиму (можливо, при розширених межах допустимої області) при відмовах окремих елементів устаткування – C- критерій (contingency analysis);

5) економічність режиму – E-критерій (economy).

Як показувалося вище, для підвищення ефективності заходів зі зменшення втрат потужності в ЕЕС необхідно враховувати чутливість параметрів режиму до збурень в системі. Виникле збурення  $\Delta D$  (у загальному випадку це вектор) приводить до зміни параметрів режиму ЕЕС, сукупність яких позначимо вектором  $X$ , а через них – до зміни вказаних вище критеріїв, тобто  $\Delta F$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta E$ . Відповідно, можна при збуренні  $\Delta D$ , яке виникло, виділити спочатку дві складові реакції на збурення:

1) залежність  $\Delta X(\tau, \Delta D(t))$ , що по суті є перехідною функцією типу вхід-вихід ( $\tau \leq t$  - моменти часу);

2)  $\Delta G(\Delta X)$  – залежність зміни критерію  $G$  від  $\Delta X$ . Не завжди ця залежність гладка, тобто така, що диференціюється. Зокрема,  $\Delta F(\Delta X)$ , коли допустима область задається системою нерівностей, має стрибки похідних при зміні складу активних нерівностей. Наприклад [5],  $\Delta S(\Delta X)$  включає складні, що аналітично не виводяться, залежності якобіана або інших загальносистемних показників, від вектора  $X$ ; залежність  $\Delta T(\Delta X)$  виявляється через розв'язування системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь; залежність  $\Delta E(\Delta X)$  може бути такою, що диференціюється тільки за відсутності активних нерівностей і стрибків в характеристиках відносних приростів електростанцій.

В якості  $\Delta D$  можуть виступати зміни струмів, потужностей, напруги, параметрів зв'язків (відключень і включень ЛЕП, трансформаторів) і т. д. Відповідно для нормальних режимів друга складова  $\Delta X(\Delta D)$  визначається елементами матриці Якобі  $J$ , матрицею чутливості параметрів режиму до відносно малих змін балансів потужностей (струмів) у вузлах і матрицею чутливості балансів потужностей (струмів) до збурень  $\Delta D$ . Звідси слідує:

- залежність (чутливість) балансів потужностей (струмів) у вузлах від збурень, тобто  $\Delta W(\Delta D)$ ;

- залежність (чутливість) параметрів режиму від змін балансів потужностей (струмів) у вузлах, тобто  $\Delta X(\Delta W)$ , яка є розв'язком системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь;

- залежність (чутливість) критерію ЕЕС від змін параметрів режиму, наприклад,  $\Delta G(\Delta X)$ .

Для повноти аналізується всі три складові. Розпочинати слід з середньої як найбільш важливої [5, 38], властивості якої інваріантні до виду збурення і типу критерію, а визначаються, в основному, властивостями матриці Якобі, яка для нормальних режимів залежить головним чином від топології, параметрів схеми мережі, навантажень у вузлах і їх статичних характеристик. Критерієм чутливості цієї середньої ланки для усталених режимів є обумовленість матриці Якобі  $\delta W/\delta X$ , тобто відношення норми зміни параметрів режиму  $\Delta X$  до зміни незбігання рівнянь усталеного режиму  $\Delta W$  через збурення [43].

У загальному випадку для ЕЕС залежність реакцій  $\Delta X$  (зміна параметрів режиму) від збурень  $\Delta D$  (зокрема, від змін навантажень споживачів) нелінійна. Майже завжди для дослідження чутливості використовується процедура лінеаризації. Вона, природно, справедлива лише тоді, коли, або збурення не настільки великі, щоб нелінійність помітно відчувалася, або самі збурення дробляться на достатньо малі дози:

$$\Delta D = \sum_{k=1}^p \Delta D_k ,$$

де кожна  $k$ -та частка  $\Delta D_k$  допускає використання лінеаризованих моделей.

При цьому чутливість моделі ЕЕС визначатиметься як

$$\Delta X = \sum_{k=1}^p \Delta X_k = \sum_{k=1}^p A_k \Delta D_k ,$$

де на кожному  $k$ -му діапазоні зміни  $\Delta D_k$  матриця  $A_k$  для усталених режимів (зазвичай це обернена матриці Якобі  $J^{-1}$ ) вважається незмінною [38].

Наявність нелінійності призводить до необхідності досліджувати чутливість і властивості ЕЕС, що пов'язані з нею, у всьому можливому діапазоні зміни навантажень – від легких до важких режимів. Це суттєво ускладнює аналіз і є додатковим аргументом того, що доцільно розглядати відносно невеликі збурення в системі (очевидно тоді, коли це дозволяє постановка задачі).

Математичні моделі динаміки ЕЕС складні і є системами нелінійних диференціальних і алгебраїчних рівнянь високого порядку з обмеженнями на зміни деяких змінних із значеннями коефіцієнтів, що змінюються в темпі процесу. Тому доцільно, виходячи з ієрархічного підходу до моделювання динаміки складних ЕЕС [7, 54, 55 ], аналіз чутливості в неоднорідних ЕЕС, з точки зору нормальних режимів, виконувати за допомогою достатньо простих математичних моделей, які не тільки відображають, в основному, точки в системі з найбільшою реакцією на збурення (слабкі місця), але й що мають зв'язок із елементами ЕЕС в яких динамічні параметри і характеристики,



пов'язані з їх конструкцією, а крім того, динамічні взаємодії елементів ЕЕС між собою. Важливою обставиною при цьому є можливість отримання аналітичних і якісних рішень або співвідношень. Велику роль тут відіграє також швидкість отримання необхідних оцінок.

Таким чином економічність режиму (Е-критерій) напряму залежить від чутливості ЕЕС при різних збуреннях, оскільки вони впливають на зміну втрат потужності в елементах електричних мереж.

### 1.1.3. Методи аналізу і оцінки чутливості до зовнішніх збурень в ЕЕС

Для виявлення найбільш чутливих вузлів, параметри режиму яких найбільш чутливі до таких зовнішніх збурень, як зміни активних  $\Delta P$  і реактивних  $\Delta Q$  навантажень, може використовуватися лінеаризований вираз [5]

$$\begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta\delta$  і  $\Delta U$  – зміни фаз і модулів напруги;  $J$  – матриця Якобі для балансу потужності в полярних координатах, що має такий вигляд:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Матриця Якобі – це квадратна, загалом, несиметрична матриця розміром  $(k \times k)$ ,  $k = 2 \times n - 1 - 1$ , де  $n$  – число вузлів в схемі мережі; 1 – число вузлів з фіксованими напругою, один вузол має фіксовану фазу.

Застосування лінеаризації означає, що досліджуються відносно невеликі зовнішні збурення. Як вже відмічалось, великі збурення представляються у вигляді суми невеликих збурень

$$\Delta P = \sum_{i=1}^k \Delta P_i; \quad (1.3)$$

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^k \Delta Q_i, \quad (1.4)$$

таким чином, що для кожного  $i$ -го вектора приростів може розглядатися постійна матриця Якобі  $J_i$ .

Елементи оберненої матриці Якобі  $J^{-1} \left( \frac{\partial \delta_i}{\partial P_j}, \frac{\partial \delta_i}{\partial Q_j}, \frac{\partial U_i}{\partial P_j}, \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \right)$  хара-

ктеризують ступінь впливу зміни активних і реактивних навантажень у вузлі  $j$  на зміни, фаз модулів і напруги у вузлі  $i$ . При переважанні діагональних елементів матриці Якобі над недиагональними зміни фаз напруги в  $i$ -му вузлі у більшій мірі визначаються змінами активних навантажень в тому ж вузлі, а зміни модулів напруги – змінами реактивних навантажень.

Для розв'язання задачі чутливості необхідно враховувати зміну напруги у вузлах та вітках мережі. Матриця Якобі не дає можливості визначити ступінь впливу збурення у вузлі на значення параметрів, зокрема на втрати потужності в кожній вітці мережі. Безпосередній зв'язок параметрів віток з параметрами вузлів для аналізу чутливості вимагає визначення власних чисел і векторів матриць узагальнених параметрів ЕЕС [6], що є складною обчислювальною проблемою.

Для аналізу та оцінки чутливості досить перспективним є використання методів теорії подібності, які базуються на основі критеріального методу [32, 56]. В даний 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. Міра його ефективності при математичному моделюванні, пошуку оптимального розв'язку, аналізі отриманого розв'язку на чутливість та його практичній реалізації є однаковою [56]. Особливістю критеріального методу є те, що аналіз чутливості здійснюється у відносних одиницях.

При розв'язанні задач оперативного й автоматичного керувань 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 керування об'єктів.

При керуванні нормальними режимами ЕЕС критерієм оптимальності може бути економічний критерій – мінімум витрат або ж витрат за умови дотримання заданих вимог з надійності і якості [38]. 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, матиме вигляд [15]

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{w} \mathbf{y}(t); \quad \mathbf{x} \in \mathbf{M}_x; \quad \mathbf{u} \in \mathbf{M}_{u_0}, \quad (1.5)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор керування;  $\mathbf{y}$  – вектор параметрів режиму, що спостерігаються;  $\mathbf{w}$  – матриця зворотного зв'язку;  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{M}_x$  – параметри режиму ЕЕС і область їх допустимих значень;  $\mathbf{M}_{u_0}$  – область оптимальних значень керуючих параметрів, межі якої визначаються за результатами аналізу чутливості.

Такий підхід розкриває характерні властивості моделі, що полегшує проведення аналізу чутливості та визначення допустимої області оптимальних рішень, яка адекватна точності й повноті вихідної інформації.

## **1.2. Умови керованості та спостережності при компенсації збурень в ЕЕС**

### **1.2.1. Вимірювання та спостереження як необхідні складові частина керування**

Вимірювання та спостереження розглядаються як необхідні складові частини керування. Навіть тоді, коли формується програмне керування як функція часу, що визначається, наприклад, на стадії проектування, вихідним є вимірювання, що надає необхідну інформацію про керований процес [5].

Ефективним апаратом дослідження систем керування є методи теорії чутливості [42]. 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 [41]. Тому в ро-

боті розглядається один з можливих способів вирішення проблеми чутливості параметрів ЕЕС до збурень.

При автоматичному керуванні передбачається, що спостереження супроводжується вимірюванням координат і параметрів, і в поняття «спостереження», «вимірювання» вкладається практично однаковий сенс. Під спостережністю тут більш загалом розуміється можливість непрямого визначення величин на підставі вимірювання деяких інших величин і використання апріорної інформації («відновлення» величин). У теорії керування під спостережністю розуміють також можливість непрямих або «псевдо» вимірювань.

Поняття керованості пов'язано з переходом системи шляхом керування з одного стану в інший. Цьому поняттю надаємо або структурно-якісний, або кількісний сенс. При розгляді структурно-якісної сторони керованості дивимось на можливість переходу керованої системи з однієї заданої безлічі станів в іншу безліч станів, як правило, за кінцевий час. Керованість розглядаємо стосовно детермінованих процесів, хоча можлива побудова стохастичних аналогів задання керованості. Будемо розглядати керованість як нормальних об'єктів, не оснащених регуляторами, так і систем, що містять замкнуті контури керування. У великій системі з ієрархічною структурою можна вивчати керованість кожного рівня, починаючи від нижчого і закінчуючи вищим. У будь-якому випадку керованість залежить від структури системи, складу органів керування, значень параметрів, запасу енергії керування [57].

Отже, при високій керованості та спостережності схеми можливо більш ефективно впроваджувати заходи зі зменшення втрат потужності в неоднорідних ЕЕС з врахуванням чутливості параметрів режиму до збурень в системі.

При цьому слід враховувати, що чутливість параметрів керування  $u$  залежить від заданого допустимого відхилення  $\delta F_*$  критерію оптимальності  $F$  та від його оптимального значення  $F_0$ . На рис. 1.1 наведено приклад залежності  $F_*=f(u_*)$  у відносних одиницях, де  $F_* = F/F_0$ , а  $u_* = u/u_0$ . Якщо змінюється значення  $\delta F_*$ , то відповідно змінюється зона нечутливості параметра керування з  $du_1$  на  $du_2$ , або навпаки.

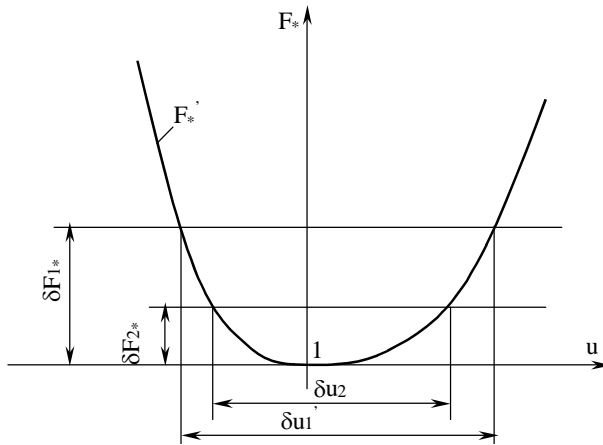


Рис. 1.1. Зміна зони оптимальності при зміні параметрів режиму

### 1.2.2. Аналіз та класифікація збурень в ЕЕС

В процесі функціонування електроенергетична система піддається малим і великим діям, таким як зміни навантажень, комутація елементів схеми, зміни генерування активної і реактивної потужностей, дії автоматики (це приклади нормальних відносно малих збурень). А також короткі замикання, різка зміна навантаження, несанкціоновані відключення устаткування, робота захисту і протиаварійної автоматики (це приклади великих збурень) [48].

Збурення, що знижують якість напруги, можуть виникати як при передачі, так і при розподілі електроенергії. Інші види збурень виникають в процесі керування мережею, при спадах або несподіваних наростаннях навантаження або генерування, що й буде розглядатися в цій роботі. Це не стосується до раптових спадів навантаження, які часто є наслідком аварій.

При дотриманні певних умов можна проводити підвищення транзитної потужності в режимі максимальної надійності, залишаючись в межах допустимої стійкості, тобто при значеннях кута передачі, що не перевищують  $40^\circ$ . Для керування значенням кута передачі використовуються різні пристрої, наприклад, поперечні (шунтуючі) компенсатори і повздовжні компенсатори [48].

ЕЕС реагує на зовнішні дії зміною параметрів режиму – модулів і фаз напруги, перетоків потужності струмів в її елементах, швидкостей

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-390-4>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-390-4>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-390-4>

**Наукове видання**

**Лежнюк Петро Дем'янович**  
**Лесько Владислав Олександрович**

**ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ**  
**В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Редактор Н. Мазур  
Оригінал–макет підготовлено В. Лесько

Підписано до друку 17.12.2010 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 6,93  
Наклад 100 прим. Зам № 2010-197

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.