

УДК 621.311.722

П. Лежнюк, В. Гайдамака, А. Пашенко  
Вінницький національний технічний університет

## НАТУРНО-ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПОДІБНІСТЬ В ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ ЕЕС

© Лежнюк П., Гайдамака В., Пашенко А., 2003

**Показано, що натурно-імітаційне моделювання з використанням подібності оптимальних режимів підвищує ефективність оптимального керування режимами електроенергетичних систем. Включення натурно-імітаційної моделі в систему оптимального керування ЕЕС дозволяє здійснювати верифікацію програмних засобів у реальних умовах їх використання, а також виконувати тестування системи автоматичного керування регулюючими пристроями з метою визначення, наскільки повно досягається ними запланований загальносистемний ефект.**

**It is shown, that naturally-imitating modeling with use of criterion method raises efficiency of optimum control of electropower systems modes. Inclusion of naturally-imitating model in the system of optimum control of EPS allows to carry out verification of software in real conditions of their application and also to test system of automatic control of regulating devices for completeness of achievement by them of general-system effect.**

**Вступ.** З метою покращання якості електропостачання та економії електроенергії в електроенергетичних системах (ЕЕС) широко впроваджуються інформаційно-керувальні обчислювальні системи (ІКОС). Для підвищення ефективності їх функціонування використовується імітаційне моделювання. Його використовують для аналізу і синтезу систем автоматичного керування (САК), для імітації динаміки електроенергетичних установок у системах випробування програмних засобів керування, а також безпосередньо під час практичної реалізації законів оптимального керування [1–3]. До дії ІКОС електроенергетичних систем у реальному часі висуваються особливі вимоги. Вони зумовлені характерними особливостями ЕЕС як об'єкта управління [4, 5]. Передусім це необхідність підтримування балансу потужностей в ЕЕС, ієрархічність і територіальна розподіленість, неповнота і невизначеність вихідної інформації. За таких умов для створення імітаційних моделей, які застосовуються в системах керування ЕЕС, може бути ефективним використання узагальнюючих методів теорії подібності.

У [2] запропоновано метод оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з імітаційною моделлю. На рис. 1 показана схема такого керування, де за допомогою імітаційної моделі відтворюється функціонування ЕЕС в деякому масштабі. Основним призначенням імітаційної моделі в такому оптимальному керуванні є участь у створенні умов самооптимізації нормальних режимів ЕЕС [6]. Таке підпорядкування визначає її внутрішню структуру, склад інформаційного забезпечення від оперативного інформаційно-керувального комплексу (ОІКК) і зміст та форму повідомлень, що передаються через останній пристроям автоматичного контролю і управління функціонуванням (АКУФ) установок, якими оптимізуються режими ЕЕС. У статті розглянуті принципи імітаційного моделювання оптимальних станів ЕЕС на основі їх подібності.

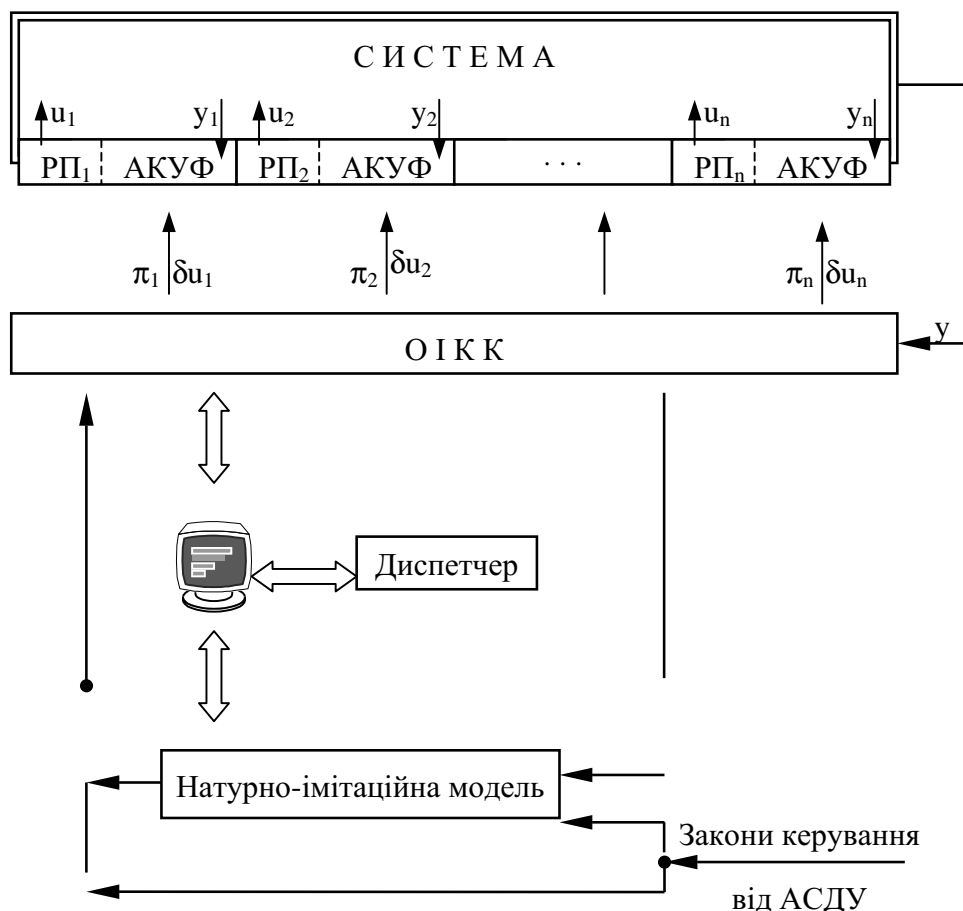


Рис. 1. Схема керування з натурно-імітаційною моделлю

**Об'єкт моделювання і імітація його функцій.** Задача оптимального керування нормальними станами ЕЕС формулюється так [4]:

мінімізувати функцію керування

$$F(u) = \int_{t_0}^{t_k} [x_t(t)Hx(t) + u_t(t)Lu(t)]dt \quad (1)$$

в просторі станів системи

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t); \quad x(t_0) = x_0; \quad (2)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (3)$$

де  $x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $y(t)$  – відповідно вектори стану, керування і спостереження;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $L$  – матриці постійних коефіцієнтів;  $t_0$ ,  $t_k$  – початок і кінець інтервалу часу, на якому мінімізується функція керування;  $x_0$  – початкове значення вектора стану.

У моделі

$$x(t) = \begin{bmatrix} J(t) \\ \dot{U}_\Delta(t) \\ U_\delta \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_B(t) \\ \dot{I}_B(t) \\ U(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} \dot{k}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix},$$

де  $\dot{J}(t) = \dot{U}_d^{-1}(t)\dot{S}(t)$  – вектор струмів у вузлах ЕЕС;  $\dot{U}_d(t)$  – діагональна матриця вузлових напруг;  $\dot{S}(t) = P(t) + jQ(t)$  – вектор потужностей у вузлах;  $\dot{U}_\Delta(t)$  – вектор напруг вузлів відносно базисного;  $U_\delta$  – напруга базисного вузла;  $\dot{U}(t)$  – вектор напруг вузлів;  $\dot{k}(t)$  – вектор коефіцієнтів трансформації трансформаторів, якими вводяться зрівнювальні ЕРС в контури схеми ЕЕС;  $Q(t)$  – вектор навантажень джерел реактивної потужності (ДРП);  $\dot{S}_B(t) = P_B + jQ_B$ ,  $\dot{I}_B(t)$  – вектори потужностей та струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевиміри.

У [2] показано, що розв'язання задачі (1)-(3), застосувавши критеріальний метод, можна звести до закону оптимального керування, який має такий вигляд:

$$u_*(t) = -\pi u_*(t), \quad (4)$$

$$u_*(t) \in \delta u_* \quad (5)$$

де  $\pi$  – вектор зворотного зв'язку, елементи якого за своїм змістом є критеріями подібності;  $\delta u_*$  – область оптимальності (нечутливості), верхня  $u_*^+$  та нижня  $u_*^-$  межі, границі якої визначаються і задаються на певний термін за результатами розрахунків та аналізу характерних станів ЕЕС [7].

У (4)–(5) всі параметри подаються у відносних одиницях. Так, параметри регулюючих параметрів (РП), за допомогою яких оптимізуються режими ЕЕС, у відносних одиницях визначаються як  $u_{*i} = u_i / u_{i0}$  (за базисні приймаються оптимальні значення параметрів  $u_{i0}$ ). Всі інші величини в (4)–(5) переводяться у відносні за аналогічною схемою.

Задача оптимального керування нормальними режимами ЕЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення критерію оптимальності  $F_*$  у встановленій області оптимальності  $\delta F_*$ . Для цього при виході з неї здійснюються керуючі впливи на режим ЕЕС регулюючими пристроями. У результаті досягається зменшення критерію оптимальності від можливого до оптимального. Контроль за значенням критерію оптимальності, як і спостереження за параметрами режиму ЕЕС, здійснюється через проміжки часу  $\tau$ .

Очевидно, що інтенсивність спрацьовування РП залежить від величини зони нечутливості  $\delta u_*$  і характеру  $u_*(t)$ . Розрахункова траєкторія зміни в часі параметрів РП через взаємовплив інших РП може проходити по-різному. У разі змін параметрів РП в ЕЕС, вплив яких значний або за відсутності таких змін, напрямок траєкторії  $u_*$  може суттєво змінюватися. Траєкторія  $u_*$  залежить також від впливу зовнішніх факторів.

Оптимальне керування у відповідності з (4)–(5) вимагає визначення меж зон нечутливості  $u_{*1}^+$  та  $u_{*1}^-$ , що пов'язано з необхідністю розв'язання зворотної задачі чутливості. Для ЕЕС ця задача є особливо складною через відсутність виразу цільової функції в аналітичній формі та через необхідність пошуку її екстремуму. З такої ж причини складно оцінити і врахувати взаємовплив окремих РП і електричних мереж різних напруг під час оптимального керування, а також вплив зовнішніх факторів. Для розв'язання цих задач доцільно застосувати імітаційне моделювання, ефективність застосування якого для оптимального керування нормальними станами ЕЕС показана в [2]. При оптимальному керуванні станами ЕЕС з випередженням на імітаційне моделювання покладається ще одна задача – апроксимація цільової функції і екстраполяція станів ЕЕС на декілька проміжків  $\tau$  вперед з метою ефективнішого використання ресурсу РП [8].

**Імітаційне моделювання під час оптимального керування станами ЕЕС.** На рис. 2 зображена структурно-логічна схема імітаційної моделі, яка використовується в схемі оптимального керування станами ЕЕС (див. рис. 1).

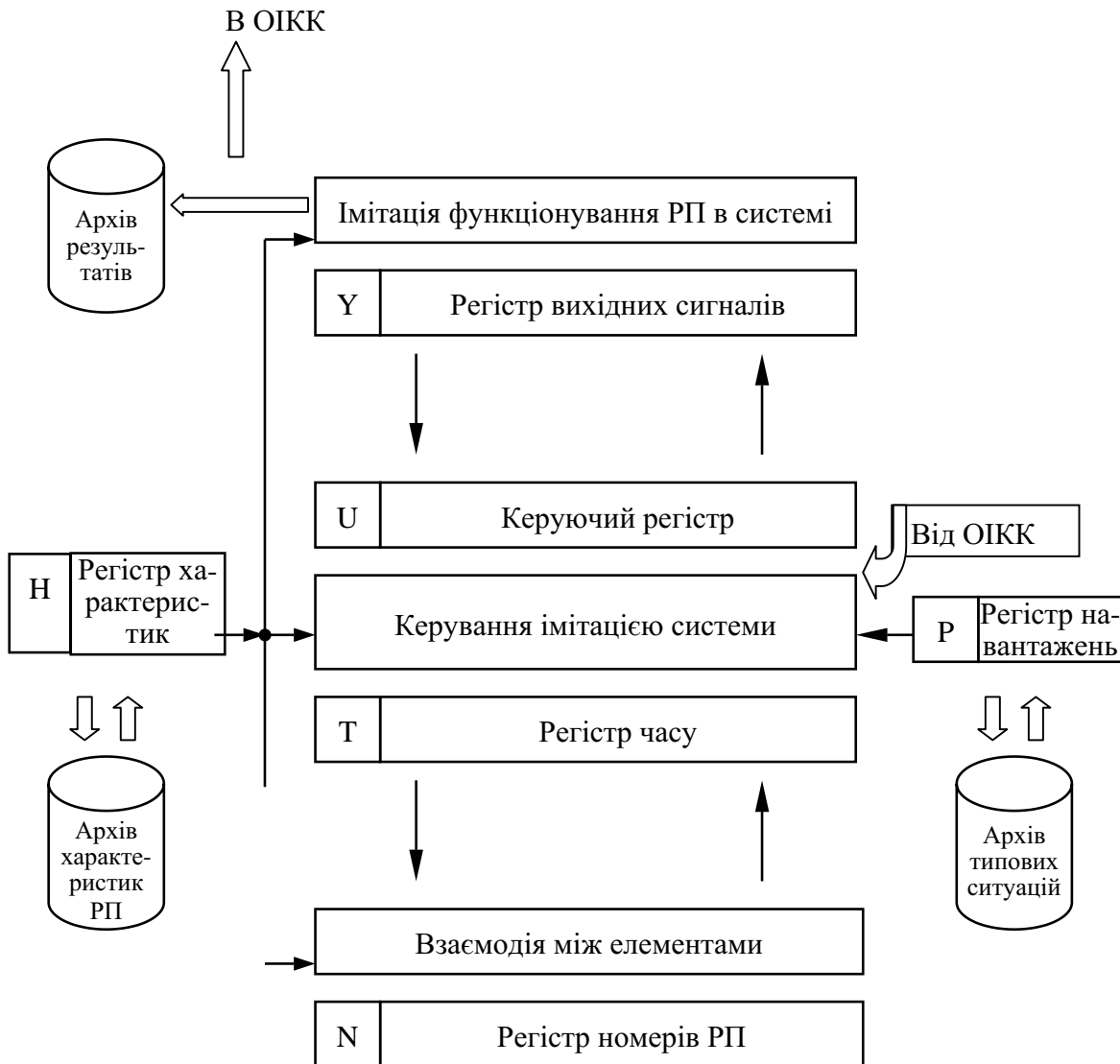


Рис. 2. Структурно-логічна схема натурно-імітаційної моделі

Імітація функціонування складної системи є сукупністю таких частин:

- імітація функціонування елемента системи;
- імітація взаємодії між елементами;
- управління черговістю системних подій.

Імітація функціонування елемента системи зводиться до налаштування модуля на даний елемент системи і реалізації на ЕОМ отриманої таким чином моделі елемента.

Імітація взаємодії між елементами полягає у визначенні коефіцієнтів взаємовпливу між окремими РП і підсистемами ЕЕС методом планування експерименту з використанням подібності оптимальних режимів ЕЕС.

Управління моделлю полягає у встановленні строгої черговості системних подій, які відбуваються під час імітації. Здійснюється це за допомогою імітатора процесу, який формує вектор  $y_*(t)$ . Для того, щоб максимально врахувати специфіку режимів ЕЕС,  $y_*(t)$  формується за даними, взятими з архіву типових ситуацій, і за результатами телевимірювання. Відтворюється  $y_*(t)$  шляхом апроксимації кожної  $i$ -ї складової на  $j$ -му інтервалі позиноміальними сплайнами вигляду

$$y_{*ij} = a_{ij} \tau^{\alpha_{ij}} + b_{ij} \tau^{\beta_{ij}}, \quad (6)$$

де  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  – коефіцієнти сплайну.

Оскільки при формуванні  $y_*(t)$  використовується інформація про поточний реальний стан системи, то це відповідає натурно-імітаційному моделюванню. При цьому складна система, яка моделюється, розбивається на підсистеми. Кожна підсистема є областю корекції одного РП, за допомогою якого реалізується закон оптимального керування (4)–(5). Оскільки область корекції розглядається як елемент системи, то склад компонент вектора спостереження  $y_{*i}$  повинен відповідати певним системним вимогам. Модель цієї підсистеми як елемента моделі системи в цілому формується наступним чином.

**Подібність оптимальних режимів і її практичне використання.** У [9] показано, що оптимальне значення втрат в ЕЕС досягається при відносних значеннях ЕРС, які визначаються за формулами

$$E_{*zpa}^E(t) = \pi_a^E J_{*p}^E(t), \quad E_{*zpp}^E(t) = \pi_p^E J_{*a}^E(t), \quad (7)$$

де  $E_{*zpa}^E(t)$ ,  $E_{*zpp}^E(t)$  – вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівню-

вальних ЕРС ();  $J_{*a}^E(t)$ ,  $J_{*p}^E(t)$  – вектори активних і реактивних складових відносних значень

струмів у вузлах;  $\pi_a^E$ ,  $\pi_p^E$  – матриці критеріїв подібності.

Матриці критеріїв подібності визначаються за формулами [9]:

$$\begin{aligned} \pi_a^E &= -[E_{zpa}^b]_{\Delta}^{-1} v_{r_b} M_{\alpha}^{-1} [J_p^b]_{\Delta}; \\ \pi_p^E &= [E_{zpp}^b]_{\Delta}^{-1} v_{r_b} M_{\alpha}^{-1} [J_a^b]_{\Delta}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $v = N_{\alpha} x_{v\alpha} r_{v\alpha}^{-1} - x_k r_k^{-1} N_{\alpha}$  – матриця системних показників неоднорідності ЕЕС;  $r_b$ ,  $x_b$  – діагональні матриці опорів віток;  $r_k$ ,  $x_k$  – діагональні матриці опорів контурів;  $M_{\alpha}$ ,  $N_{\alpha}$  – матриці з'єднань віток у вузлах і контурах. Індекс "α" означає, що параметри відносяться до дерева схеми ЕЕС, а індекс "б", що параметри є базисними.

Співвідношення (7) є розв'язком задачі (1)–(3), представленим в критеріальній формі (відносних одиницях). Вони є законами оптимального керування, в яких коефіцієнти зворотного зв'язку за фізичним змістом є критеріями подібності. З врахуванням зв'язку між контурними ЕРС і коефіцієнтами трансформації трансформаторів [10] (7) можна переписати у вигляді:

$$k'(t) = 1 - \pi_a^E J_{*p}^E(t), \quad k''(t) = -\pi_p^E J_{*a}^E(t), \quad (9)$$

де  $k'(t)$ ,  $k''(t)$  – вектори дійсних і уявних складових коефіцієнтів трансформації трансформаторів.

Серед можливих способів реалізації відповідної САК надається перевага адаптивному регулюванню з еталонною моделлю, яка в нашому випадку є носієм образу ЕЕС. Еталонна модель описується системою рівнянь (1)–(3) та розв'язком останньої (4)–(5). Змінні, що продукуються еталонною моделлю, можна використовувати для аналізу дій САК або передаватися на вхід натурної моделі (ОІКК) у вигляді реальних керуючих сигналів. Натурні параметри режиму і характеристики ЕЕС використовуються для настроювання системи керування і адаптації законів керування вигляду (4)–(5) до реальних умов експлуатації з врахуванням забезпечення керованості ЕЕС розподіленими територіально РП. Вирази (4)–(5) трансформуються до законів оптимального керування для кожного РП у вигляді

$$u_{*i}(t) = -\pi_i y_{*i}(t), \quad (10)$$

$$u_{*i}(t) \in \delta u_{*i} \quad (11)$$

де  $u_{*i}$  –  $i$ -та складова вектора керування  $u$ ;  $y_{*i}$  – вектор спостереження, елементи якого належать області корекції  $i$ -го РП;  $\pi_i$  – вектор визначальних критеріїв подібності для  $i$ -го РП.

Отже, в цій схемі натурно-імітаційна модель є частиною системи керування. На різних етапах впровадження САК еталонна модель може виконувати різні функції. На початковому етапі автоматизації, коли необхідно узгоджувати оперативне керування диспетчером з автоматичним, це імітаційна модель, за допомогою якої оперативний персонал не тільки аналізує, визначає і коригує налагоджувальні параметри САК, але і має можливість "програвати" стани ЕЕС і оцінювати наслідки керуючих дій, в тому числі автоматичних. На завершальному етапі, коли оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС здійснюється переважно локальними САК, натурно-імітаційна модель стає основним елементом самонастроювання і самоаналізу САК.

**Імітація взаємодії елементів ЕЕС.** Взаємовплив окремих елементів ЕЕС, в тому числі РП, визначається її параметрами і топологією. Відомо, що рівень неоптимальності режимів ЕЕС і, відповідно, втрат електроенергії залежить від її неоднорідності і є порівняно сталою величиною [10]. Моделювання процесу компенсації негативної дії неоднорідності здійснюється методами теорії подібності, які дозволяють отримати характеристики системи  $F_* = f(\pi, u_*)$  і узагальнити оптимізаційні дії у вигляді законів керування [3, 5]. Оскільки  $F_* = f(\pi, u_*)$  стійкі до зміни режимів ЕЕС, зокрема навантажень, то створюється архів таких характеристик. Вони в часі не змінюються і використовуються для аналізу взаємодії елементів системи. За результатами такого аналізу визначаються, наприклад, залежності коефіцієнтів трансформації трансформаторів

$$k_q(t) = k_{q0}(t) + \sum_{i \in M_Q} V_i^Q Q_i(t) + \sum_{j \in M_k} W_j^k k_j(t), \quad j \neq q, \quad (12)$$

де  $V_i^Q$ ,  $W_j^k$  – коефіцієнти впливу на  $q$ -й трансформатор відповідно реактивної потужності і коефіцієнтів трансформації областей корекції РП;  $M_Q$ ,  $M_k$  – множини відповідно ДРП і трансформаторів областей корекції.

Коефіцієнти  $V_i^Q$  і  $W_j^k$  визначаються за допомогою імітаційної моделі методом планування факторного експерименту. При цьому використовуються дані обчислювального експерименту і натурні дані з ОІКК.

Програма імітації взаємодії елементів системи ініціюється з інтервалом часу  $\tau$ . Коефіцієнти впливу оцінюються в поточних станах системи і екстраполюються можливі їх зміни на два–три  $\tau$  вперед відповідно до принципу оптимального керування з випереджен-

ням. У блок формування керуючих дій вони передаються прорангованими згідно з чутливістю критерію оптимальності  $F$  до зміни параметрів РП  $u$ .

**Висновки.** 1. Застосування натурно-імітаційного моделювання в оптимальному керуванні режимами електроенергетичних систем дозволяє адаптувати останнє до експлуатаційних умов ЕЕС, повніше використати можливості регулюючих пристроїв для досягнення системного ефекту і зробити процес оптимізації результативнішим. Створення натурно-імітаційної моделі в складі системи оптимального керування ЕЕС дозволяє здійснити верифікацію програмних засобів у реальних умовах їх використання, а також протестувати САК регулюючими пристроями на предмет досягнення ними загальносистемного ефекту.

2. Використання методів теорії подібності в імітаційному моделюванні підвищує його ефективність за рахунок того, що зменшується обсяг обчислювальних процедур і їх кількість. Досягається це тим, що використовується подібність оптимальних режимів ЕЕС і результати обчислень узагальнюються і переносяться на всі режими ЕЕС що аналізуються.

1. Верлань А.Ф., Галкин В.В. *Имитация динамики энергетических объектов в системах испытания программных средств управления.* – К., 1991. – 184 с. 2. Мокін Б.І., Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. *Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісн. ВПІ.* – 1995. – № 3. – С. 5–9. 3. Питер Джексон. *Введение в экспертные системы.* – М., 2001. – 624 с. 4. Лежнюк П.Д., Абдаллах Джалал, Гайдамака В.М. *Автоматизация процессу компенсації впливу неоднорідності електричної системи на економічність її режимів // Вісн. ВПІ.* – 1997. – № 1. – С. 63–66. 5. Митюшкин К.Г. *Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах.* – М., 1990. – 288 с. 6. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Кравцов К.І. *Моделювання та формування умов самооптимізації режимів електроенергетичної системи // Технічна електродинаміка: Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3.* – 2002. – С. 96–101. 7. Лежнюк П.Д. *Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом.* – Вінниця, 2003. – 131 с. 8. Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. *Принципи формування умов оптимальності нормальних режимів електроенергетичних систем // Зб. наук. пр. Донецьк. держ. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика.* – 2000. – Вип. 21. – С. 73–76. 9. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Пауткіна Л.Р. *Моделювання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режимів // Вісн. ВПІ.* – 1996. – № 4. – С. 44–49. 10. Холмский В.Г. *Расчет и оптимизация режимов электрических сетей.* – М., 1975. – 280 с.