

УДК 621.311.161

О. Б. Бурикін, асп.;

К. І. Кравцов, к. т. н.;

В. В. Кулик, к. т. н., доц.

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ КРИТЕРІАЛЬНОГО МЕТОДУ

*Розглянуто функціонування системи автоматичного керування транзитними потоками потужності і напругою в складі системи оптимального керування нормальними режимами електроенергетичних систем з імітаційною моделлю.*

В результаті реформування енергетичної галузі України та вдосконалення ринкових відносин між суб'єктами енергоринку особливої актуальності набули задачі, пов'язані зі зниженням втрат активної потужності та електроенергії в електроенергетичних системах (ЕЕС). Разом з тим, більшість енергетичних суб'єктів стали транзитерами електроенергії. Таким чином, в зв'язку зі збільшенням втрат електроенергії, в тому числі, від транзитних та взаємних перетоків потужності для окремих енергопостачальних компаній ЕЕС виникає необхідність аналізу існуючих та розробки шляхів та засобів оптимального керування потоками потужності та напруг в ЕЕС.

З огляду на складність електроенергетичної системи, як об'єкта керування, та на її особливості режимного характеру, очевидно, що відслідковувати і коригувати оптимальні значення параметрів відповідно до зміни станів ЕЕС можливо тільки за допомогою систем автоматичного керування (САК) відповідними регульовальними пристроями (РП). На підставі встановлених в [1, 2] закономірностей розглядається функціонування САК транзитними потоками потужності і напругою в складі системи оптимального керування нормальними режимами (НР) ЕЕС з імітаційною моделлю [3].

Дія розглядуваних тут САК трансформаторами зв'язку, які об'єднують електричні мережі різних напруг в електричну систему, направлена на зменшення власних втрат та втрат від транзиту електроенергії в ЕЕС через перерозподіл природних потоків потужності і примусового наближення їх до потокорозподілу в однорідній ЕЕС. Ця задача може бути віднесена до класу задач теорії керування динамічними системами з квадратичним критерієм оптимальності (наприклад, втрати активної потужності)

Мінімізувати

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}_t(t) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_t(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t)] dt \quad (1)$$

в просторі станів

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t); & \mathbf{x}(t_0) &= x_0; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  — відповідно вектори стану, керування і спостереження;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  — матриці постійних коефіцієнтів;  $t_0$ ,  $t_k$  — початок і кінець інтервалу часу;  $x_0$  — початкове значення вектора стану.

В даній моделі

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{k}(t) \\ \mathbf{Q}(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{S}}_B(t) \\ \dot{\mathbf{I}}_B(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{bmatrix},$$

де  $\mathbf{k}(t)$  — вектор комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторів;  $\mathbf{Q}(t)$  — вектор наван-

таження джерел реактивної потужності (ДРП);  $\dot{\mathbf{S}}_B(t)$ ,  $\dot{\mathbf{I}}_B(t)$  — вектори потужностей і струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевимірювання;  $\dot{\mathbf{U}}(t)$  — вектор напруг у вузлах.

Перше рівняння в (2) є рівнянням стану системи, розв'язок якого задовольняє початкову умову  $x_0 = \mathbf{x}(t_0)$  і дає вектор стану  $\mathbf{x}(t) = \psi[\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t)]$ . Друге рівняння в (2) визначає вихідні параметри в залежності від  $\mathbf{x}(t)$  і  $\mathbf{u}(t)$ .

Задача оптимального керування потоками потужності в ЕЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення  $F^*$  у встановленій зоні нечутливості  $\delta F^*$ . Для цього при виході з неї здійснюються керувальні впливи трансформаторами. Для підвищення ефективності керування транзитними потоками потужності в ЕЕС з метою зменшення втрат потужності від транзиту необхідно виявляти реальні можливості трансформаторів з РПН, оцінюючи чутливість втрат потужності до змін коефіцієнтів трансформації [4]. Для підвищення ефективності використання трансформаторів з РПН в ЕЕС при формуванні керувальних впливів необхідно також враховувати їх технічний стан та залишковий ресурс. З врахуванням сказаного в задачі оптимізації режиму ЕЕС критерій оптимальності може бути встановлено такий [5]:

$$F = \Delta P + P(\delta U) + P(\omega) + \sum_{i=1}^q \Pi_{T_i},$$

де  $\Delta P$  — сумарні втрати активної потужності в ЕЕС;  $P(\delta U)$  — потужність, еквівалентна збиткові споживачів через неоптимальність якості напруги;  $P(\omega)$  — потужність, еквівалентна збиткові внаслідок недовідпуску електроенергії, який викликаний відмовами трансформаторів, зокрема відмовами пристроїв РПН;  $\Pi_{T_i}$  — штрафна функція, що вводиться для врахування ресурсу трансформаторів, в тому числі перемикачів пристроїв РПН;  $q$  — кількість трансформаторів, які регулюються.

В [3] показано, що розв'язок задачі мінімізації втрат ЕЕС в критеріальній формі можна звести до закону оптимального керування у відносних одиницях:

$$\mathbf{u}^*(t) = -\boldsymbol{\pi} \mathbf{y}^*(t), \quad (3)$$

$$\Gamma_{*i} = \begin{cases} +\Delta u_{*уст. i} & \text{при } u_{*i} \geq u_{*i}^+; \\ 0 & \text{при } u_{*i}^+ > u_{*i} > u_{*i}^-; \\ -\Delta u_{*уст. i} & \text{при } u_{*i} \leq u_{*i}^-, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\boldsymbol{\pi}$  — за своїм змістом є, як це показано в [2], матрицею критеріїв подібності;  $u_{*i} = u_i/u_{i0}$  — параметри РП, за допомогою яких оптимізуються режими ЕЕС, у відносних одиницях (за базисні приймаються оптимальні значення параметрів  $u_{i0}$ );  $r_{*i}$  — коригувальні дії САК, які вводять систему в область оптимальності (нечутливості);  $\Delta u_{*уст. i}$  — добавка, яка, додаючись до уставки  $u_{*уст. i}$ , викликає відповідні дії РП з введення керованого параметра в область оптимальності;  $u_{*i}$  —  $i$ -та складова вектора керування;  $u_{*i}^+$ ,  $u_{*i}^-$  — верхня та нижня межі зони нечутливості зміни  $u_{*i}$ .

Оптимальне керування у відповідності з (3), (4) вимагає визначення меж зон нечутливості  $u_{*i}^+$  та  $u_{*i}^-$ , що пов'язано з необхідністю розв'язання зворотної задачі чутливості [6]. Для ЕЕС ця задача є особливо складною через відсутність виразу цільової функції в аналітичній формі та через необхідність пошуку її екстремуму, тому для її розв'язання доцільно застосувати критеріальний підхід.

В такій постановці задачі керувальними змінними є е. р. с., які необхідно ввести коефіцієнтами трансформації у всі замкнені контури для реалізації оптимального струморозподілу. В [2] показано, що оптимальне значення втрат в ЕЕС досягається при відносних значеннях е. р. с., які визначаються за формулами

$$\mathbf{E}_{*зр.а}^e(t) = \boldsymbol{\pi}_{a1}^e + \boldsymbol{\pi}_{a2}^e \mathbf{J}_{*а}^B(t) + \boldsymbol{\pi}_{a3}^e \mathbf{J}_{*р}^B(t); \quad \mathbf{E}_{*зр.р}^e(t) = \boldsymbol{\pi}_{p1}^e + \boldsymbol{\pi}_{p2}^e \mathbf{J}_{*р}^B(t) + \boldsymbol{\pi}_{p3}^e \mathbf{J}_{*а}^B(t), \quad (5)$$

де  $\mathbf{E}_{*зр.а}^e(t)$ ,  $\mathbf{E}_{*зр.р}^e(t)$  — вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнюва-

льних е. р. с.;  $\mathbf{J}_{*a}^B(t)$ ,  $\mathbf{J}_{*p}^B(t)$  — вектори активних і реактивних складових відносних значень задаючих струмів;  $\pi_{a1}^e, \pi_{a2}^e, \pi_{a3}^e, \pi_{p1}^e, \pi_{p2}^e, \pi_{p3}^e$  — матриці критеріїв подібності, або в узагальненому матричному вигляді

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{*зр.а}^e \\ \mathbf{E}_{*зр.р}^e \end{bmatrix} = \boldsymbol{\pi}^e \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{J}_{*a}^B \\ \mathbf{J}_{*p}^B \end{bmatrix},$$

де  $\boldsymbol{\pi}^e = \begin{bmatrix} \pi_{a1}^e & \pi_{a2}^e & \pi_{a3}^e \\ \pi_{p1}^e & \pi_{p2}^e & \pi_{p3}^e \end{bmatrix}$  — матриця критеріїв подібності у критеріальній моделі зрівнювальних е. р. с. в контурах ЕЕС.

Матриці критеріїв подібності для ЕЕС з транзитними перетоками потужності визначаються за формулами [2]:

$$\pi_{a1}^e = \left[ \mathbf{E}_{зр.а}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Re}(\dot{\mathbf{E}}_k); \quad \pi_{a2}^e = - \left[ \mathbf{E}_{зр.а}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Re}(\dot{\mathbf{N}}_k \mathbf{z}_в \dot{\mathbf{C}}_e) \cdot \left[ \mathbf{J}_a^{B(6)} \right]_д; \quad (6)$$

$$\pi_{a3}^e = \left[ \mathbf{E}_{зр.а}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Im}(\dot{\mathbf{N}}_k \mathbf{z}_в \dot{\mathbf{C}}_e) \cdot \left[ \mathbf{J}_p^{B(6)} \right]_д;$$

$$\pi_{p1}^e = \left[ \mathbf{E}_{зр.р}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Im}(\dot{\mathbf{E}}_k); \quad \pi_{p2}^e = - \left[ \mathbf{E}_{зр.р}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Re}(\dot{\mathbf{N}}_k \mathbf{z}_в \dot{\mathbf{C}}_e) \cdot \left[ \mathbf{J}_p^{B(6)} \right]_д; \quad (7)$$

$$\pi_{p3}^e = - \left[ \mathbf{E}_{зр.р}^{(6)} \right]_д^{-1} \cdot \text{Im}(\dot{\mathbf{N}}_k \mathbf{z}_в \dot{\mathbf{C}}_e) \cdot \left[ \mathbf{J}_a^{B(6)} \right]_д,$$

де  $\dot{\mathbf{N}}_k$  — друга матриця з'єднань з врахуванням коефіцієнтів трансформації;  $\mathbf{z}_в$  — діагональна матриця повних опорів віток схеми мережі;  $\dot{\mathbf{C}}_e$  — матриця економічного струморозподілу для заступної г-схеми з урахуванням трансформаторних зв'язків;  $\mathbf{E}_{зр.а}^{(6)}$ ,  $\mathbf{E}_{зр.р}^{(6)}$  — вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнювальних е. р. с. для базисного режиму.

З урахуванням зв'язку між контурними е. р. с. і коефіцієнтами трансформації трансформаторів (5) за певних умов (трансформатори в базовій системі контурів знаходяться в хордах, кількість регульованих трансформаторів дорівнює кількості контурів) можуть бути переписані у вигляді [2]

$$\mathbf{k}_{*a} = 1 - \left( \pi_{a1}^e + \pi_{a2}^e \mathbf{J}_{*a}^B + \pi_{a3}^e \mathbf{J}_{*p}^B \right); \quad \mathbf{k}_{*p} = -j \left( \pi_{p1}^e + \pi_{p2}^e \mathbf{J}_{*p}^B + \pi_{p3}^e \mathbf{J}_{*a}^B \right), \quad (8)$$

де  $\mathbf{k}_{*a}$ ,  $\mathbf{k}_{*p}$  — вектори дійсних та уявних складових коефіцієнтів трансформації регульованих трансформаторів.

Серед можливих способів реалізації відповідної САК віддається перевага адаптивному регулюванню з еталонною моделлю. Такий підхід відповідає вимогам до керування НР ЕЕС, в його рамках можуть застосовуватись багато з напрацьованих і використовуваних на сьогодні в АСДУ алгоритмів і програм. Він досить просто реалізується на практиці за допомогою сучасних мікропроцесорних систем.

Структурна схема оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з використанням подібності оптимальних режимів показана на рис. 1. Дана схема керування складається з двох контурів. У першому контурі (головному) здійснюється автоматичне керування окремими РП за допомогою пристроїв автоматичного контролю і керування функціонуванням (АКУФ) РП. Вони діють за законами керування (8). Вектори спостереження  $\mathbf{y}'$  для керування РП формуються з телевимірів у виділеній області корекції, в якій забезпечується часткова або повна спостережність.

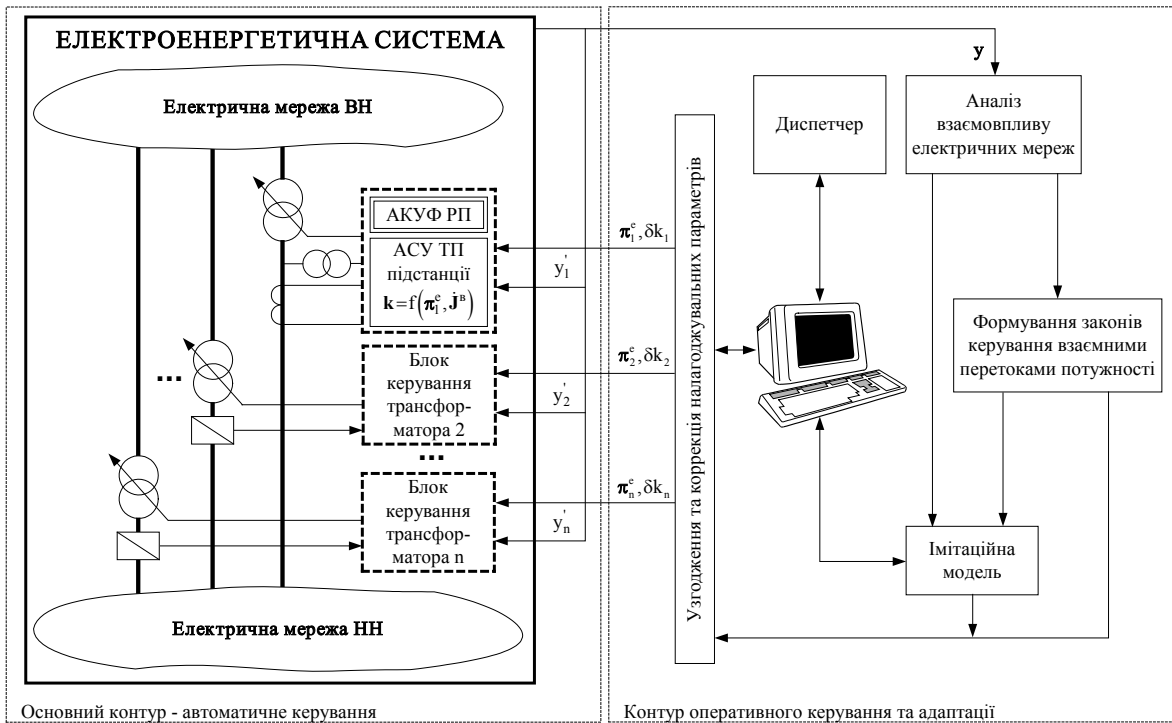


Рис. 1. Структурна схема оптимального керування

У другому контурі (адаптації) в залежності від міри порушення режиму ЕЕС і рішення диспетчера можуть виконуватись дії з переналагодження АКУФ РП або з прямого керування параметрами РП. У останньому випадку пристрої АКУФ РП використовуються для узгодження каналу телемеханіки і схеми керування РП. Команди диспетчера про зміну коефіцієнтів трансформації реалізуються шляхом відповідної зміни складових вектора коригувальних дій  $\mathbf{r}$  [3]. У випадку, коли оптимальне керування здійснюється автоматично, у контурі адаптації з повною інформацією про стан ЕЕС  $\mathbf{y}$  визначається матриця критеріїв подібності  $\boldsymbol{\pi}^e$ , а з неї визначальні для даного РП критерії подібності. Їх склад визначається допустимою похибкою обчислень і реалізації оптимальних коефіцієнтів трансформації. Ще один налагоджувальний параметр — зона нечутливості коефіцієнта трансформації  $\delta k_j$  задається після аналізу чутливості критерію оптимальності  $F$  до зміни коефіцієнтів трансформації за методикою, викладеною в [4].

В такій схемі еталонна модель є частиною системи керування. На початковому етапі автоматизації з її допомогою оперативний персонал аналізує, визначає і коригує налагоджувальні параметри САК, а на завершальному етапі, коли оптимальне керування НР ЕЕС здійснюється переважно локальними САК, еталонна модель стає основним елементом самоналагодження і самоаналізу САК.

На рис. 2 показано, як приклад, критеріальні залежності критерію оптимальності від коефіцієнтів трансформації  $F_* = f(k_*)$ . На підставі таких залежностей встановлюються зони нечутливості коефіцієнтів трансформації  $\delta k_j$ . Як видно, чисельні значення  $\delta k_j$  залежать від величини зони нечутливості критерію оптимальності  $\delta F_*$  і характеру залежності  $F_* = f(k_*)$ .

Координація роботи трансформаторів при оптимальному керуванні здійснюється за критеріальними залежностями  $F_* = f(k_*)$ . Вони відображають технічні можливості трансформаторів в керуванні втратами потужності в ЕЕС та використовуються для визначення впливу їх на потоки потужності. Для того, щоб розділити трансформатори на функціональні групи та визначити роль кожного з них в САК потоками потужності, розв'язується зворотна задача чутливості [4, 6]. В результаті її розв'язання при заданій зоні нечутливості критерію оптимальності  $\delta F_*$  визначаються зони нечутливості  $\delta k_j$  коефіцієнтів трансформації. Як видно з рис. 2, розміри цих зон відповіда-

ють реальним можливостям трансформаторів впливати на втрати. Відповідно з їх регульовальним ефектом встановлюється різна інтенсивність перемикачів для трансформаторів ЕЕС. За такого порядку роботи системи керування введення режиму ЕЕС в область оптимальності реалізується мінімально можливою кількістю керувальних впливів, що в свою чергу забезпечує надійність та раціональне спрацювання ресурсу регульовальних пристроїв.

Пристрої АКУФ РП, які реалізують закони керування (3), (4), побудовані за типовою схемою побудови мікропроцесорних систем. Структурна схема пристроїв представлена на рис. 3. Окрім типових блоків, вони включають у себе постійні запам'ятовувальні пристрої (ППЗП) призначені для збе-

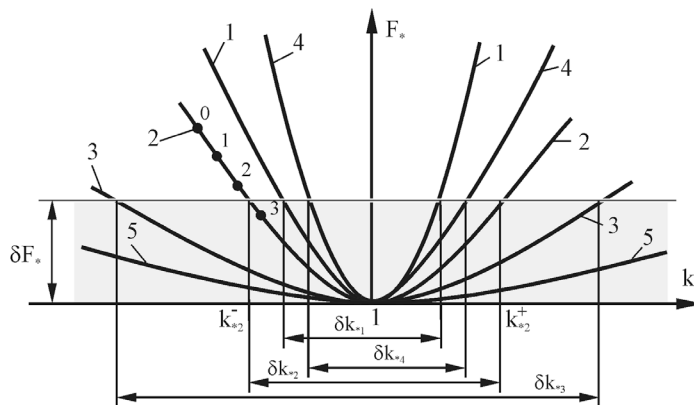


Рис. 2. Критеріальні залежності критерію оптимальності від коефіцієнтів трансформації трансформаторів

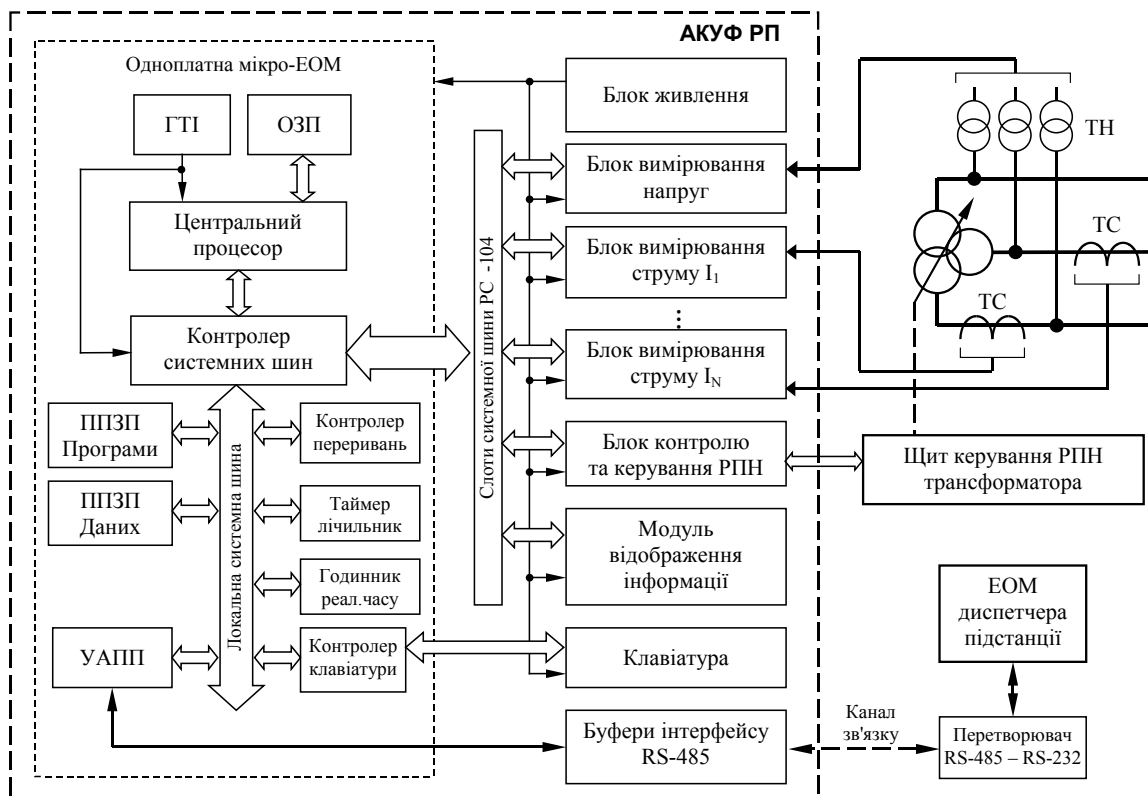


Рис. 3. Структурна схема пристрою АКУФ РП та підключення його до кіл вимірювання та керування

рігання програми функціонування пристрою та інформації, яка є умовно постійною; енергонезалежний ОЗП, призначений для зберігання копій значень основних параметрів пристрою при тимчасовому зникненні живлення; блок контролю та керування РП з кінцевими реле «Збільшити» і «Зменшити» для перемикачів пристрою РПН у відповідних напрямках. Зв'язок з керувальною ЕОМ АСДУ

підстанції реалізований на основі інтерфейсу RS-485 і призначений для отримання від центральної системи керування кодів операцій (керування за законом, встановлення певної відпайки РПН, автономний режим), отримання нового значення відпайки, або параметрів та уставок АКУФ РП, передачі до центральної системи керування значення встановленої на РПН відпайки, а також для передачі звітів про відповідність вимірних параметрів заданим обмеженням. Пристрої АКУФ РП можуть працювати в трьох основних режимах: 1) отримання закону з керуючої ЕОМ і керування за ним (при наявності в достатній кількості достовірної інформації про стан електричної мережі); 2) введення з центральної системи керування номера відпайки і встановлення її на регуляторі РПН (за відсутності в достатній кількості значень місцевих параметрів електричної мережі, або при дистанційному керуванні диспетчером енергосистеми); 3) автономна робота пристрою в режимі стабілізації вторинної напруги трансформатора, або автотрансформатора на заданому рівні з урахуванням введеної зони нечутливості та автономна реалізація струмової компенсації напруги у розподільних електричних мережах розімкненої конфігурації за умови введення їх еквівалентних опорів.

Таким чином, при автоматизації оптимального керування потоками потужності та напругою в ЕЕС можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності та моделювання. На основі них можна розв'язувати задачі, характерні для АСДУ, з єдиних методологічних засад на всіх етапах оптимального керування. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну САК з децентралізацією частини функцій АСДУ практично без порушення принципів централізованого керування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д., Оболонський Д. І., Пауткіна Л. Р. Моделювання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режиму // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1996. — № 4. — С. 44—49.
2. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. Монографія. — Вінниця: «УНІВЕРСУМ—Вінниця», 2004. — 131 с.
3. Мокін Б. І., Лежнюк П. Д., Лук'яненко Ю. В. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1995. — № 3. — С. 5—9.
4. 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. — № 1. — С. 60—66.
5. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 5. — С. 3—11.
6. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. — М.: Наука, 1981. — 464 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006, 25—28.09.2006 р.)

Надійшла до редакції 23.11.06  
Рекомендована до друку 12.12.06

**Бурикін Олександр Борисович** — аспірант, **Кравцов Костянтин Іванович** — старший викладач, **Кулик Володимир Володимирович** — доцент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет