

УДК 621.316.1.072

П. Д. ЛЕЖНЮК<sup>1</sup> (д-р техн. наук, проф.), В. І. НАГУЛ<sup>2</sup> (канд. техн. наук, доц.),  
В. В. НЕТРЕБСЬКИЙ<sup>1</sup> (канд. техн. наук), С. В. КРАВЧУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>2</sup>Південно-Західна електроенергетична система

[lpd@inbox.ru](mailto:lpd@inbox.ru)

## ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС

*Розглядається метод і алгоритм оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії за різних критеріїв оптимальності. Показано, що для адаптації алгоритму до зміни експлуатаційних умов достатньо коригувати економічний опір джерел електроенергії.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, нормальний режим, керування, принцип найменшої дії.

**Вступ.** Сучасний стан організації процесу оптимізації нормальних режимів характеризується тим, що в ринкових умовах окремі підсистеми ЕЕС (генерування, транспортування, розподілу і електропостачання) мають власні техніко-економічні інтереси, що формалізується відповідно різними критеріями оптимальності. Тому в ринкових умовах об'єднати задачі оптимізації окремих підсистем під загальний критерій оптимальності не вдається. Тим більше, що окремі підсистеми в процесі експлуатації можуть змінювати статус як об'єкта господарювання і, відповідно, змінюються умови оптимальності режиму ЕЕС. В таких умовах використання існуючих алгоритмів оптимізації і програм, що їх реалізують, проблематично.

Використовуючи раніше отримані закономірності, на підставі принципу найменшої дії (ПНД), є можливість визначення і реалізації оптимальних режимів ЕЕС в темпі процесу і пристосовувати засоби оптимізації до умов, що постійно змінюються [1]. Можливі два варіанти реалізації такого підходу: оперативне (диспетчерське) керування режимом ЕЕС і автоматизація оптимального керування. В першому випадку для прийняття рішень розробляються алгоритми і програми для ЕОМ, а в другому створюється система автоматичного керування, в якій використовуються умови оптимальності, отримані на підставі ПНД.

Метою статті є розроблення на основі ПНД алгоритмів оптимізації режимів ЕЕС за активною та реактивною потужністю, напругою та коефіцієнтами трансформації, а також створення структурної схеми адаптивної системи керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель економічного режиму ЕЕС.

### Алгоритм визначення параметрів оптимального режиму.

В [2] показано, що задача оптимізації нормальних режимів ЕЕС може бути зведена до розрахунку економічного струморозподілу (за заступною R-схемою) з наступним введенням режиму в допустиму область. Елементи ЕЕС, в тому числі джерела активної і реактивної потужності, представляється активними (економічними) опорами  $R_{ei}$  (рис. 1). Для ЛЕП і трансформаторів це активні складові їх опорів, а для джерел енергії вони визначається у відповідності до задачі оптимізації (оптимізація ЕЕС по активній, реактивній потужності або комплексна оптимізація).

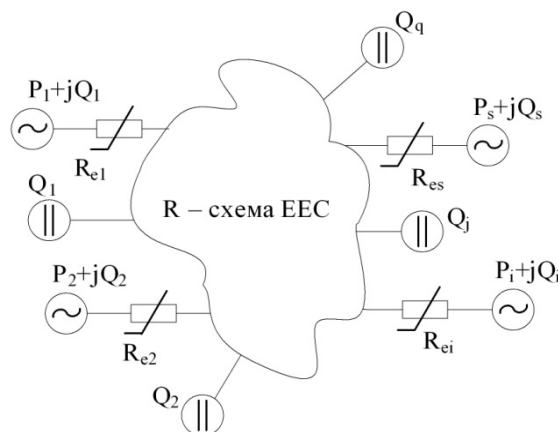


Рисунок 1 - Заступна R-схема ЕЕС

На рис. 2 наведено алгоритм оптимізації режимів ЕЕС. Характерною його особливістю є те, що він адаптований до зміни критерію оптимальності режимів ЕЕС у відповідності до зміни форм господарювання. При зміні суб'єктів господарювання (власників електроенергетичних установок) класична постановка задачі оптимізації режимів ЕЕС і методи її розв'язування [3] вимагають вдосконалення. В алгоритмі розрахунку,

основаному на ПНД, адаптація до нових експлуатаційних умов здійснюється зміною математичної моделі джерел енергії, а саме формули, за якою розраховується їх економічний опір  $R_{ei}$ . Алгоритм побудований наступним чином.

1. Розрахунок оптимального режиму ініціюється системним оператором або автоматично згідно програми функціонування АСДК ЕЕС. Вводяться вхідні дані з бази даних оперативно-інформаційного комплексу (ОІК).

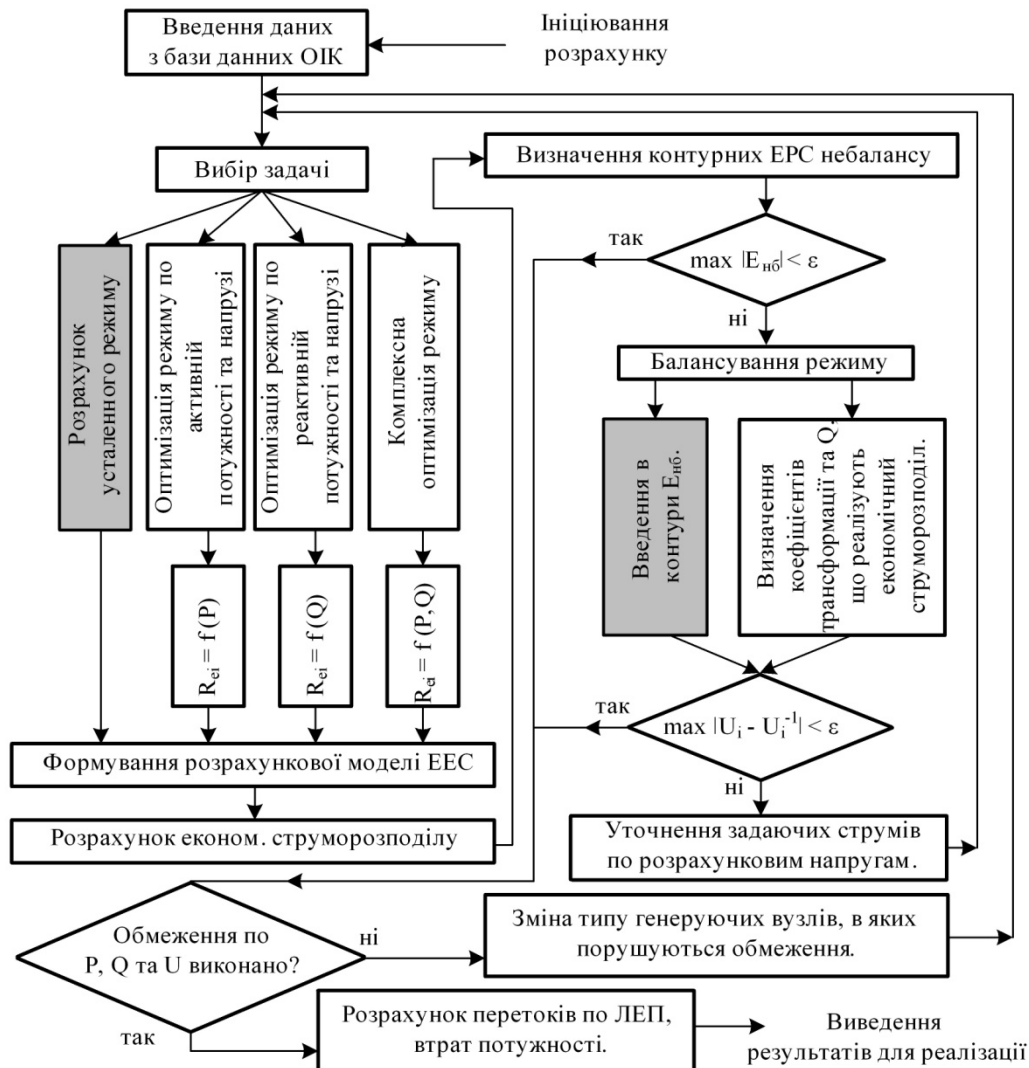


Рисунок 2 - Логічна схема алгоритму оптимізації режимів ЕЕС

2. Розраховуються економічні опори джерел потужності  $R_{ej}$  у відповідності до вибраної задачі оптимізації, які в подальшому уточнюються з врахуванням отриманих навантажень станцій та розрахункових напруг у вузлах [1]:

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2 u_i}{P_i^2 c}, \quad (1) \quad R_{ei} = \frac{B_j(P_j)U_i^2 u_j}{Q_i^2 c}, \quad (2) \quad R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2 u_i}{(P_i^2 + Q_i^2)c}, \quad (3)$$

де  $B_i(P_i)$  – витратна характеристика  $i$ -ої станції;  $P_i$  – потужність  $i$ -ї станції;  $U_i$  – напруга на шинах  $i$ -ї станції;  $u_i$  – ціна тони умовного палива на  $i$ -й станції;  $c$  – вартість 1 кВт-год втрат електроенергії.

У формулах (1)–(3), якщо джерело потужності не входить як суб'єкт господарювання в склад енергосистеми, то замість витратних характеристик  $B_i(P_i)$  підставляється потужність, яка відпускається, а замість  $u_i$  – відпускна вартість кВт-год  $\beta_i$ .

3. Формується розрахункова модель ЕЕС і визначається економічний струморозподіл, що відповідає “ідеальному” стану ЕЕС. Оскільки при цьому в неоднорідних електричних мережах енергосистеми не виконується другий закон Кірхгофа, то визначаються контурні е.р.с. небалансу  $\dot{E}_{ноб}$ . Далі, в залежності від задачі, можливі два варіанти. Якщо розраховується усталений режим, то формується система контурних рівнянь і розраховуються контурні струми, накладання яких на економічний струморозподіл приводить до виконання законів Кірхгофа. В

іншому варіанті е.р.с. небалансу  $\dot{E}_{нб}$  перераховуються в коефіцієнти трансформації, введення яких в контури ЕЕС разом зі зміною навантаження джерел реактивної потужності (ДРП) приводить до балансування режиму. Цей оптимальний режим є найближчим в сенсі вибраного критерію оптимальності до “ідеального” режиму.

4. Через те, що коефіцієнти трансформації і навантаження ДРП є дискретними величинами, то можливі порушення обмежень на значення напруги в деяких вузлах. В цих випадках визначається і фіксується потужність в генеруючих вузлах, що призводить до виконання обмежень. Втрати потужності в ЕЕС при цьому збільшуються.

5. Виводяться результати розрахунку для їх реалізації. За “ручного” керування режимом ЕЕС результати видаються у вигляді рекомендацій для оперативного персоналу. Якщо оптимальне керування режимом здійснюється за допомогою системи автоматичного керування (САК), то відповідно змінюються уставки локальних САК джерел потужності і трансформаторів та автотрансформаторів.

**Автоматизація оптимального керування режимом ЕЕС з використанням ПНД.** Розмістивши джерела електричної енергії за розрахованими опорами, можна замінити визначення мінімуму сумарних витрат на виробництво електроенергії розрахунком економічного режиму ЕЕС за заступною схемою, складеною тільки із активних опорів елементів ЕЕС та економічних опорів  $R_{ei}$ . Процес оптимізації навантаження джерел електроенергії може бути автоматизований в обчислювальній середовищі, наприклад TRACE MODE.

Добре пристосованою для реалізації на практиці схеми наближення поточного режиму ЕЕС до економічного є адаптивна система керування з еталонною моделлю. Вона апробована стосовно керування нормальними режимами ЕЕС, де в якості еталонної використовується імітаційна модель [4]. На рис. 3 приведена адаптивна система оптимального керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель економічного режиму ЕЕС. За допомогою цієї системи керування реалізується задача наближення поточного режиму до економічного з врахуванням обмежень.

Об'єкт керування – режим ЕЕС і регулятори утворюють основний контур системи автоматичного керування (САК). На режим ЕЕС постійно діють збурення у вигляді зміни навантаження  $s$  і параметричні збурення – відхилення параметрів ЕЕС від їх номінальних значень  $q$ . Значення визначальних параметрів  $y'$ , склад яких визначається з результатів аналізу на чутливість критерію оптимальності  $F$  до керуючих параметрів  $u$ , подаються на вхід регуляторів, якими згідно заданих законів керування режим ЕЕС утримується в допустимій області оптимальності. Через регулятори за необхідності можуть здійснюватися прямі керуючі впливи  $g$  безпосередньо оперативним персоналом. Контур адаптації (блоки 2–5) керує коефіцієнтами регуляторів. Процес адаптації залежить, як правило, від векторів зовнішніх впливів  $g$ ,  $s$  і від параметричних збурень  $q$ , викликаних зміною метеорологічних умов. В блок 3 з бази даних ОІК поступає інформація, необхідна для визначення поточного  $F$  і економічного  $F_e$  значень критерію оптимальності. Блок 2 є моделлю-еталоном з вектором стану  $x_e$ , який визначається в результаті розрахунку усталеного режиму ЕЕС за її заступною R-схемою. В блоці 4 перевіряються умови:

$$\Delta F = |F - F_e| \leq \xi_F,$$

де  $\xi_F$  – допустиме відхилення поточних значень критерію оптимальності його оптимального значення.



Рисунок 3 - Адаптивна система оптимального керування нормальним режимом ЕЕС

Якщо остання умова виконується, то це означає, що режим ЕЕС знаходиться в області оптимальності і ніяких керуючих дій не вимагається. В іншому випадку на вхід блоку 5 передаються  $\Delta F$  і визначаються зміни в законах керування  $g$ , які здійснюють зміну генерування джерел електроенергії і потужність від ЕЕС та зводять  $\Delta F$  до  $\xi_F$ .

**Висновки.** 1. Процес оптимізації режимів електроенергетичної системи по активній або реактивній потужності, а також комплексна оптимізація може здійснюватися з використанням принципу найменшої дії. При цьому джерела активної та реактивної потужності в розрахунковій моделі ЕЕС представляються економічним опором. Значення цих активних опорів, якими моделюється вартість генерування потужності, визначаються у відповідності до вибраного критерію оптимальності режимів ЕЕС і в залежності від того, чи джерело потужності входить як суб'єкт господарювання в склад енергосистеми чи ні.

2. Визначення оптимального навантаження джерел активної і реактивної потужності зводиться до розрахунку усталеного режиму ЕЕС за її заступною R-схемою. Для оптимізації потоків потужності в ЕЕС розраховуються відповідні значення коефіцієнтів трансформації. Оптимальні значення коефіцієнтів трансформації визначаються за результатами розв'язання системи контурних рівнянь, що формується з

врахуванням результатів розрахунку економічного струморозподілу. Введення зрівнювальних е.р.с. зміною коефіцієнтів трансформації компенсує контурні е.р.с. небалансу і наближує режим ЕЕС до економічного.

3. Запропонована адаптивна система керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму, що дозволяє реалізувати задачу наближення поточного режиму до економічного з врахуванням обмежень. Як вихідна інформація використовується база даних ОІК, що забезпечує адекватність результатів оптимізації. В оптимальну область режим вводиться відповідною корекцією коефіцієнтів трансформації трансформаторів, автотрансформаторів та лінійних регуляторів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П.Д. Оптимізація режимів роботи джерел електроенергії в енергосистемі з використанням принципу найменшої дії / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський // Наукові праці Донецького національного технічного ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 255–258.

2. Методы оптимизации режимов энергосистем / [В.М. Горнштейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.

3. Соколов В.К. Задачи оперативной оптимизации производства электроэнергии в условиях рыночных отношений / В.К. Соколов, А.А. Прейгель, В.Г. Васильев // Электричество. – 2007. – №1. – С. 2–9.

4. Лежнюк П.Д. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / В.В. Кулик, Д.И. Оболонский // Электричество. – 2007. – №11. – С. 2–8.

#### REFERENCES

1. Lezhnyuk P.D., Netrobskiy V.V. Design and indemnification of influence to heterogeneity of electric networks on the economy of their modes // *Naukovi pratsi Donetckogo natsionalnogo techicnogo universitetu*. 2011; №11: 255–258. (Ukr.)

2. Gornsteyn V.M. The methods of optimization of the modes of grids - M.: Energoizdat, 1981. 336 p. (Rus.)

3. Sokolov V.K., Preygel A.A., Vasil'ev D.I. Tasks of operative optimization of production of electric power in the conditions of market relations // *Elektrichestvo*. 2007; №1: 2-9. (Rus.)

4. Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Obolonskiy D.I. Design and indemnification of influence to heterogeneity of electric networks on the economy of their modes // *Elektrichestvo*. 2007; №11: 2–8. (Rus.)

Надійшла до редакції 11.03.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

П. Д. ЛЕЖНЮК<sup>1</sup>, В. И. НАГУЛ<sup>2</sup>, В. В. НЕТРЕБСКИЙ<sup>1</sup>, С.В. КРАВЧУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

<sup>2</sup>Юго-Западная электроэнергетическая система

**Использование принципа наименьшего действия для усовершенствования управления нормальными режимами ЭЭС.** Рассматривается метод и алгоритм оптимизации нормальных режимов электроэнергетических систем на основе принципа наименьшего действия при разных критериях оптимальности. Показано, что для адаптации алгоритма к изменению эксплуатационных условий достаточно корректировать экономическое сопротивление источников электроэнергии.

**Ключевые слова:** *электроэнергетическая система, нормальный режим, управление, принцип наименьшего действия.*

P. LEZHNYUK<sup>1</sup>, V. NAGUL<sup>2</sup>, V. NETREBSKIY<sup>1</sup>, S. KRAVCHUK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>2</sup>Soutch-West Power System

**Application of the Principle of Least Action to Improve EPS Normal Modes Control.** The paper is devoted to working out of optimisation methods of electric power systems (EPS) normal modes for decrease of expenses by manufacture and electric power transfer. It is shown, that economic distribution of currents is based on developing process in electric power industry of least action principle (LAP). The least losses of the electric power, which possible in EPS at the set loadings in knots, generally will be when distribution of currents is counted on its R - equivalent circuit. The method of separate optimisation of EPS modes on active and reactive power with use LAP is developed. Possibility of complex optimisation EPS on active and jet powers is shown. The adaptive control system of EPS normal modes where in the capacity of the reference model the model of its economic regime used is developed. The circuit design of the distributed computer system for optimisation of power stations working in an electric power system in rate of process is offered. Algorithms of EPS normal modes optimisation are developed for practical implementation of optimum control.

**Key words:** *electroenergy system, normal mode, management, principle of least action.*