

УДК 621.316.1.072

**П.Д. ЛЕЖНЮК** (д-р техн.наук, проф.), **В.В. КУЛИК** (канд.техн.наук, доц.), **В.В. ТЕПТЯ**  
**Вінницький національний технічний університет**  
lpd@inbox.ru

## ФОРМУВАННЯ ЦІНОВИХ ЗАЯВОК ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАЛАНСУЮЧОГО РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В роботі розглядаються метод та алгоритм формування цінових заявок блоків електростанцій з урахуванням транзитних втрат потужності в електричних мережах енергетичної системи, що дозволяє вдосконалити процес розподілу навантажень об'єднаної електроенергетичної системи між електричними станціями, чим підвищити ефективність функціонування ринку електроенергії.

**Ключові слова:** балансуєчий ринок електроенергії, транспортування електроенергії, втрати потужності, електрична станція, цінова заявка

**Вступ.** В електроенергетиці України відбуваються реформи з метою впровадження ринкових методів керування. Було засновано оптовий ринок електроенергії (ОРЕ), на якому здійснюються операції купівлі-продажу електричної енергії за участі конкуруючих енергогенерувальних компаній, системного оператора та незалежних постачальників електричної енергії [1].

Згідно з новою концепцією передбачено перехід від діючого ОРЕ до балансуєчого ринку та електропостачання за двосторонніми договорами [2]. Зазначені структурні перетворення повинні бути концептуально враховані у методичних та програмних засобах керування режимами електроенергетичних систем (ЕЕС). А це вимагає відповідного вдосконалення та адаптації математичних моделей та методів.

Задачі вибору оптимального складу енергогенерувального обладнання займають важливе місце в забезпеченні якості функціонування ЕЕС. Вони мають розв'язуватися з урахуванням заявлених тарифів на електроенергію виробників, запланованих об'ємів її постачання, витрат на її транспортування, прогнозованих графіків електроспоживання, стану енергогенерувального обладнання, необхідної величини резерву потужності для забезпечення надійного і стійкого функціонування об'єднаної енергетичної системи України та її паралельної роботи з енергосистемами суміжних держав та інших факторів. Тому для вдосконалення планування режимів ЕЕС та оперативного керування ними, де від адекватності вхідної інформації та швидкості розв'язання аналітичних та оптимізаційних задач залежить якість прийнятих рішень, необхідно розробляти відповідні методи й засоби.

**Цінові заявки виробників електроенергії в умовах функціонування оптового ринку.** Сучасна практика розподілу заявленого навантаження між джерелами електроенергії базується на використанні цінових заявок блоків електростанцій і заявок енергопостачальних компаній на режими добового (тижневого) електроспоживання. Щодня виробники, які працюють за ціновими заявками, надають розпоряднику системи розрахунків енергоринку цінову заявку та заявку робочої потужності щодо кожного блока (рис. 1).

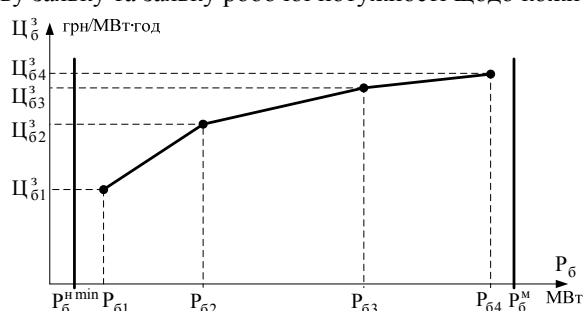


Рисунок 1 – Приклад побудови приращених заявлених цін блока

Заявка робочої потужності відображає потенційну здатність кожного блока виробляти електроенергію в певний розрахунковий період наступної доби. Цінова заявка та заявка робочої потужності згідно [1] складаються з: двох-чотирьох монотонно зростаючих приращених заявлених цін на електроенергію, що може бути відпущена в оптовий ринок ( $C_{6x}^3$ , грн./МВт·год.), та відповідних їм опорних потужностей блока ( $P_{6x}$ , МВт), що визначають ті рівні генерування, за яких відповідні заявлені ціни можуть бути застосовані; чотирьох вартостей пуску блока з резерву ( $C_6^n$ ), грн.; ціни холостого ходу блока ( $C_6^{xx}$ ), грн./год.; максимальної робочої потужності ( $P_{6p}^{p,max}$ , МВт) та мінімальної робочої потужності ( $P_{6p}^{p,min}$ ) для кожного розрахункового періоду наступної доби та інших складових.

© Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Тептя В.В., 2013

Оскільки у розрахунку заявленої ціни для окремого блока враховують вартісні показники вироблення електроенергії, але не враховують витрати на транспортування електричної енергії, це призводить до завищення в першу чергу агрегатів з меншою питомою вартістю незалежно від їх розміщення відносно центрів навантажень і надає можливості системному оператору лобювати інтереси окремих енергогенерувальних компаній.

Таким чином, необхідно вдосконалювати методику формування цінових заявок. Транзитні втрати електроенергії у випадку електропостачання за двосторонніми договорами доцільно враховувати в ціні на електроенергію виробника. Отже, напрямком досліджень в даній роботі є удосконалення методу та алгоритму формування цінових заявок електростанцій на підставі визначення транзитних втрат потужності за умови оптимального поточкорозподілу в електричних мережах (ЕМ).

**Коригування цінових заявок з урахуванням втрат потужності, пов'язаних з постачанням електроенергії за двосторонніми договорами.** У контрактах на електропостачання між виробником і споживачем (енергопостачальною компанією) в ціні виробника для забезпечення прозорості та конкуренції слід враховувати витрати не лише на вироблення, але й на транспортування електричної енергії між межами балансової належності виробника та споживача. Однак, для узгодження інтересів енергогенерувальних, транспортних та енергопостачальних компаній витрати на транспортування, що закладаються в ціну виробника, мають відповідати оптимальному режиму електромережі за втратами електроенергії (або потужності, для оперативних розрахунків).

Електропостачання  $k$ -го споживача від  $s$ -го джерела протягом періоду  $T$ , який характеризується умовно постійним режимом ЕЕС, супроводжується сумарними витратами

$$B_{\Sigma s, k} = \left( P_k \cdot \beta_s + \sum_{\ell \in N} \left[ \Delta P_{\ell(s, k)}^{\text{оп}} \cdot c_{\ell}^{\text{оп}} \right] \right) \cdot T, \quad (1)$$

де  $P_k$  – потужність навантаження, яку покриває джерело за умовами контракту;  $\beta_s$  – середня відпускна ціна 1 кВт·год електроенергії джерела  $s$ ;  $\Delta P_{\ell(s, k)}^{\text{оп}}$  – дійсна частина транзитної складової втрат потужності в електричній мережі  $\ell$ , що зумовлена протіканням струмового навантаження  $k$ -го споживача від джерела  $s$ ;  $c_{\ell}^{\text{оп}}$  – середня вартість транспортування 1 кВт·год електроенергії мережею  $\ell$  з урахуванням впровадження заходів з оптимізації її режимів;  $N$  – множина електричних мереж, якими здійснюється транзит електроенергії.

Складова транзитних втрат  $\Delta P_{\ell(s, k)}^{\text{оп}}$  визначається для кожної трансакції відповідно до умов контракту та обсягів постачання електроенергії:

1) Якщо генерування  $s$ -го джерела повністю забезпечує навантаження  $k$ -го споживача, тоді втрати потужності для множини віток за умови оптимального струморозподілу, який відповідає мінімуму втрат від взаємних і транзитних перетоків  $\eta_s$  у мережах визначаються за виразом:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s, k)}^{\text{оп}} = \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, s)} \hat{\mathbf{J}}_{(s, k)}^{\text{оп}} + \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, k)} \hat{\mathbf{J}}_k^{\text{оп}}, \quad (2)$$

де  $\delta \dot{U}_{B(i, s)}$ ,  $\delta \dot{U}_{B(i, k)}$  – фрагменти матриці спадів напруг  $\delta \dot{U}_B$ , які відповідають  $i$ -ій вітці мережі-транзитера та стовпцям з переліків, відповідно,  $\eta_s$  (вузли генерування) та  $\eta_k$  (вузли навантаження);  $\hat{\mathbf{J}}_k^{\text{оп}}$  – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку  $\eta_k$  за умови оптимального струморозподілу в ЕМ;  $\hat{\mathbf{J}}_{(s, k)}^{\text{оп}}$  – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку  $\eta_s$ , пронормованих до комплексно-спряженого сумарного струму навантаження  $k$ -го споживача.

2) Якщо генерування  $s$ -го джерела частково забезпечує навантаження  $k$ -го споживача, тоді:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s, k)}^{\text{оп}} = \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, s)} \hat{\mathbf{J}}_s^{\text{оп}} + \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, k)} \hat{\mathbf{J}}_{(k, s)}^{\text{оп}}, \quad (3)$$

де  $\hat{\mathbf{J}}_s^{\text{оп}}$  – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку  $\eta_s$  за умови оптимального струморозподілу в мережі;  $\hat{\mathbf{J}}_{(k, s)}^{\text{оп}}$  – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку  $\eta_k$ , пронормованих до комплексно-спряженого сумарного струму генерування  $s$ -го джерела електроенергії;

3) Якщо часткове генерування  $s$ -го джерела частково забезпечує навантаження  $k$ -го споживача, тоді:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s, k)}^{\text{оп}} = \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, s)} \hat{\mathbf{J}}_{(s, \chi)}^{\text{оп}} + \sum_{i \in \eta_B} \delta \dot{U}_{B(i, k)} \hat{\mathbf{J}}_{(k, \chi)}^{\text{оп}}, \quad (4)$$

де  $\hat{\mathbf{J}}_{(s, \chi)}^{\text{оп}}$ ,  $\hat{\mathbf{J}}_{(k, \chi)}^{\text{оп}}$  – фрагменти вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліків, відповідно,  $\eta_s$  та  $\eta_k$ , пронормовані до комплексно-спряженого сумарного часткового струму генерування за умови

оптимального струморозподілу в ЕМ.

Матриця  $\delta \dot{\mathbf{U}}_b$  складається з  $n$  векторів-рядків  $\delta \dot{\mathbf{U}}_{bi}$ , в яких  $j$ -ий елемент має фізичний зміст комплексного спаду напруги в  $i$ -ій вітці, що зумовлений протіканням оптимальної частки одиничного струму від  $j$ -ого вузла навантаження, або генерування.

$$\delta \dot{\mathbf{U}}_{bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_{\Sigma k}^{(i)}) \dot{\mathbf{C}}_i^{\text{on}}, \quad (5)$$

де  $\dot{\mathbf{C}}^{\text{on}}$  – матриця струморозподілу, розрахована для електричної мережі-транзитера, використовуючи її заступну  $r$ -схему зі збалансованими коефіцієнтами трансформації [3 – 5];  $\mathbf{J}^{\text{on}}$  – вектор-стовпець оптимальних задаючих струмів вузлів навантаження та джерел електроенергії, розрахований на підставі попереднього оптимального розподілу прогнозованого навантаження ЕЕС між електричними станціями (за критерієм мінімуму витрат на виробництво електроенергії, без врахування витрат на її транспортування).

Для уточнення ціни електроенергії блоків станцій з урахуванням складової витрат на її транспортування, можна застосувати вираз

$$\mathbf{C}_{\text{EC}_s} = \frac{B_{\Sigma s, k}}{P_k \cdot T},$$

або, враховуючи (1):

$$\mathbf{C}_{\text{EC}_s} = \beta_s + \frac{\sum_{\ell \in \mathbf{N}} [\Delta P_{\ell(s, k)}^{\text{оп}} \cdot c_{\ell}^{\text{оп}}]}{P_k}. \quad (6)$$

У припущенні, що для всіх суб'єктів вартість транспортування електроенергії мережами визначається єдиним оптовим тарифом енергоринку  $\mathbf{C}_{\text{OP}}$ , вираз (6) набуде вигляду:

$$\mathbf{C}_{\text{EC}_s} = \beta_s + \frac{\sum_{\ell \in \mathbf{N}} \Delta P_{\ell(s, k)}^{\text{оп}}}{P_k} \cdot \mathbf{C}_{\text{OP}}. \quad (7)$$

Оскільки виробник може укласти договори на електропостачання з кількома споживачами, для яких витрати на транспортування електроенергії будуть різними, то ціна для окремого джерела (блоку електростанції) має коригуватися з урахуванням транзитних втрат до потенційних споживачів електроенергії.

Приклади цінних заявок для окремого блока, що побудовані за діючою методикою та згідно запропонованого підходу – з урахуванням витрат на транспортування електроенергії, наведено на рис. 2. Врахування витрат на транспортування для споживачів 1 та 2 збільшує заявлену ціну електроенергії блоку (рис. 2, а, рис. 2, б). Однак у випадку постачання електроенергії до споживача 3 (рис. 2, в), зростання потужності генерування блоку призводить до локального розвантаження транзитної електромережі, в наслідок чого зменшуються витрати на транспортування (порівняно з альтернативними варіантами електропостачання споживача 3). Виходячи з цього, після уточнення, ціна у третій та четвертій точках (рис. 2, в) зменшується, оскільки генерування даного джерела зменшує сумарні транзитні втрати, тобто друга складова виразу (6) стає від'ємною. Таким чином, в цінній заявці блока для даного споживача ціна на електроенергію зменшиться, що підвищить його можливості отримання квоти на постачання електроенергії. Слід також зауважити, що транспортування електроенергії від блоку, що розглядається до споживача 3, крім підвищення економічності власної та інших трансакцій до споживача 3, забезпечує покращення режимних параметрів мережі-транзитера: завантаженість ЛЕП та трансформаторів, рівні напруг тощо.

Отже, для забезпечення адекватного оцінювання економічності функціонування певного блоку на енергетичному ринку необхідно використовувати цінні заявки більш складної структури (рис. 2) – з зазначенням цін, що відповідають всім потенційним (або договірним) напрямкам постачання електроенергії. Такий підхід ускладнює розв'язання задачі оптимізації розподілу навантаження між джерелами електроенергії в ЕЕС (що не принципово, враховуючи наявні потужності обчислювальних засобів та періодичність проведення зазначених розрахунків), однак забезпечує знаходження розв'язків, які за діючої моделі є недоступними.

На рис. 3 наведено функціональні та інформаційні зв'язки, необхідні для формування добового графіка видачі потужності джерелами електроенергії на підставі цінних заявок виробників, побудованих з урахуванням витрат на транспортування електроенергії. Використання запропонованого методу та алгоритму використовуються на стадії циклічного уточнення цінних заявок виробників електроенергії в процесі розподілу навантаження між джерелами.

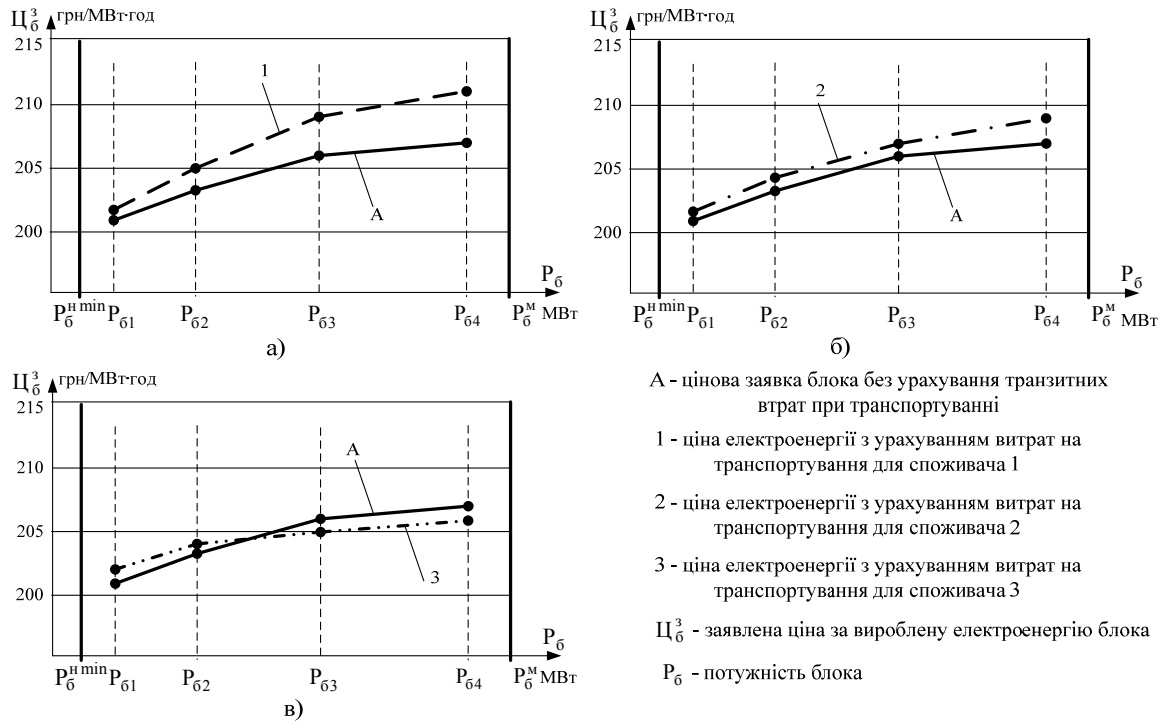


Рисунок 2 – Приклад цінових заявок блока електричної станції з урахуванням витрат на транспортування електроенергії до певних споживачів

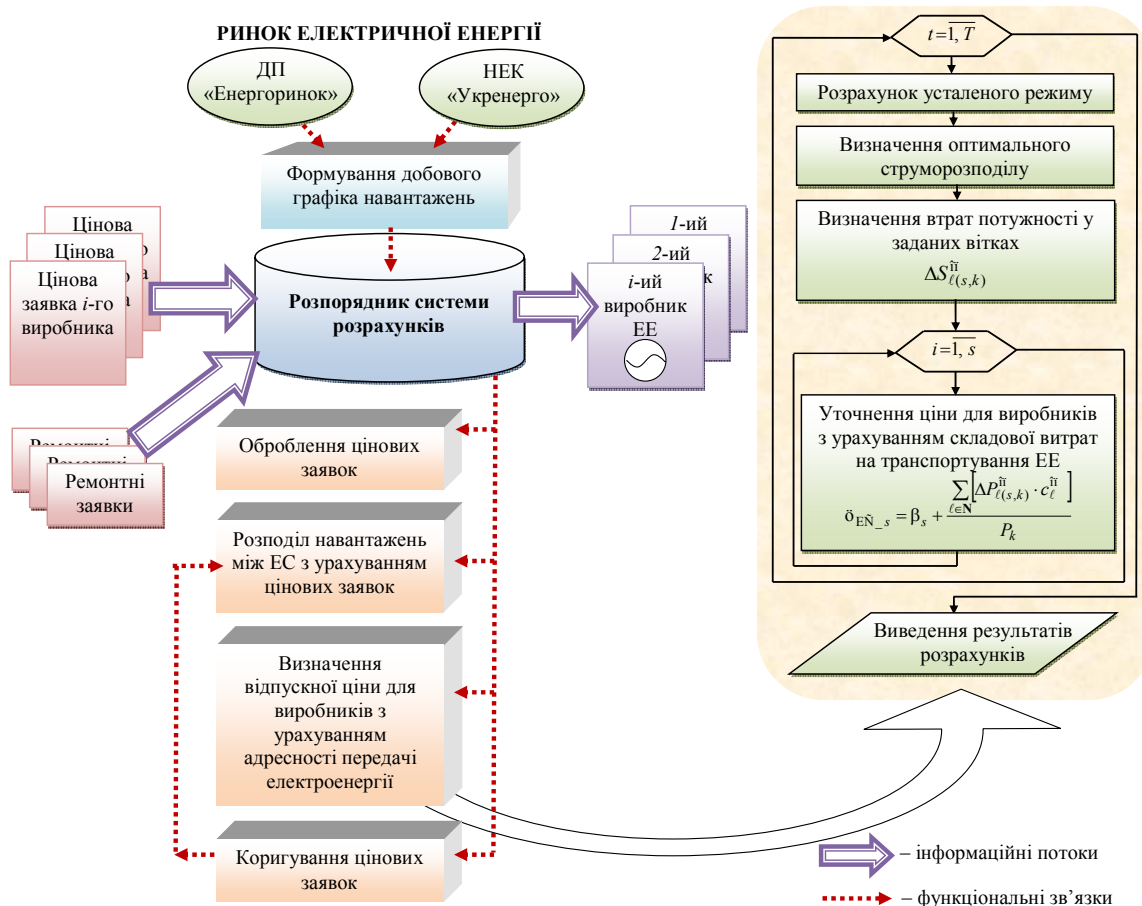


Рисунок 3 – Функціональні та інформаційні зв'язки при формуванні добового графіка навантажень на підставі цінових заявок виробників в сучасних умовах ринку електроенергії

**Висновки.** В роботі запропоновано метод та алгоритм адресного визначення втрат потужності в електричній мережі за умови оптимального поточкорозподілу в електроенергетичній системі, що дозволяє виділити мінімальні транзитні втрати в мережі та врахувати їх в ціні на електроенергію в умовах електропостачання за двосторонніми договорами.

Врахування мінімальних значень транзитних втрат в цінових заявках джерел електроенергії дозволяє створити конкурентне середовище для генерувальних компаній. Використання модифікованих цінових заявок ускладнює розв'язання задачі оптимізації розподілу навантажень між джерелами електроенергії, однак забезпечує обґрунтованість та прозорість прийняття рішень, а значить узгодженість роботи окремих суб'єктів енергетичного ринку.

Реалізація запропонованого підходу до коригування цінових заявок електричних станцій сприятиме комплексному підвищенню ефективності покриття сумарного навантаження енергосистеми за рахунок оптимізації переліку працюючих блоків, а також стимулюванню транспортних компаній до запровадження заходів з оптимізації режимів електромереж. В процесі формування оптимальних рішень необхідно враховувати вплив окремих суб'єктів на режими роботи електроенергетичної системи, а також взаємні і транзитні втрати електроенергії в її електричних мережах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила оптового ринку електричної енергії України [Електронний ресурс] / Національна комісія регулювання електроенергетики України. – (Нормативний документ НКРЕ. Постанова НКРЕ № 921. Протокол Ради Оптового ринку електричної енергії України № 14 від 04.09.2003 р.). – Режим доступу: <http://forca.com.ua/knigi/pravila/pravila-optovogo-rinku-elektrichnoi-energii-ukraini.html>
2. Концепція функціонування та розвитку оптового ринку електричної енергії України [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України. – (Нормативний документ Кабінету Міністрів України. Постанова № 1789 від 16.11.2002). – Режим доступу: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/KP021789.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KP021789.html)
3. Астахов Ю. Н. О моделировании оптимальных режимов электроэнергетических систем / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк, В. И. Нагул // Электронное моделирование. – 1990. – № 2. – С. 84–89.
4. Лежнюк П. Д. Расчет токораспределения в электрической сети / П. Д. Лежнюк, Л. В. Ярных // Электричество. – 1982. – № 8. – С. 10–14.
5. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами / Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 123 с.

#### REFERENCES

1. Pravila optovogo rinku elektrichnoi energii Ukraini. Postanova NKRE № 921. Protokol Rady optovogo rinku elektrichnoi energii Ukraini № 14, 04.09.2003.
2. Kontseptsiya funktsionuvannya ta rozvytku optovogo rinku elektrichnoi energii Ukraini. Postanova № 1789, 16.11.2002.
3. Astakhov U.N., Lezhnyuk P.D., Nagul V.I. About the modelling of optimal regimes of the electrical power networks. *Elektronnoye modelirovaniye*. 1990; 2: 84-89.
4. Lezhnyuk P.D., Yarnykh L.V. Calculation of current allocation in the electric network. *Electrichestvo*. 1982; 8: 10-14.
5. Lezhnyuk P.D., Kulik V.V., Burykin O.B. *Vzayemovplyv elektrychnykh mereg i system v protsesi optymalnogo keruvannya yih regymamy* [United power system electric networks interference in the process of their modes optimum control] Vinnytsia: UNIVERSUM- Vinnytsia, 2008. 123 p.

Надійшла до редакції 01.03.2013

Рецензент: М.В. Гребченко

П. Д. ЛЕЖНЮК, В. В. КУЛИК, В. В. ТЕПТЯ  
Вінницький національний технічний університет

**Формирование ценовых заявок электростанций и повышение эффективности балансирующего рынка электроэнергетики.** В работе рассматриваются метод и алгоритм формирования ценовых заявок с учетом транзитных потерь мощности в электрических сетях энергетической системы, что позволяет усовершенствовать метод оптимального распределения нагрузок объединенной электроэнергетической системы между станциями, чем повысить эффективность функционирования рынка электроэнергетики.

**Ключевые слова:** электрическая станция, транспорт электроэнергии, потребитель, потери мощности, ценовая заявка.

P. LEZHNYUK, V. KULIK, V. TEPTYA  
Vinnytsia National Technical University

**Forming of the Power Plants Price Requests and Increasing Efficiency of the Balancing Market.** The given article is devoted to management of electrical power network (EPS) normal modes efficiency increasing in the conditions of the electric power balancing market and supply under bilateral contracts taking into account electric power polytypic sources. Thereby it is solved problems of an overall power plants and networks performance increasing at the set economic restrictions. It is shown, that optimal control of the electric power sources loads allows to reduce electric power losses in an electric power system. The method and algorithm of price requests formation taking into account transit power losses in power system electrical networks that allows to develop a method of optimum distribution of loadings between stations and to raise efficiency of the electric power market functioning are in-process observed.

The method of determination of the transit electric power losses in an electrical networks in the new economic conditions allows to select a part of transit electric power losses in the power supply conditions. Taking into account the minimal transit electric power losses in the electric power sources price requests allows to make competitive environment for generation companies.

**Key words:** *power plant, electrical energy transmission, consumer, power losses, the price request.*