

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. В. Кулик, к. т. н., доц.;
В. В. Тептя, к. т. н.; В. О. Лесько, к. т. н.

ФОРМУВАННЯ ЦІНОВИХ ЗАЯВОК ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ АДРЕСНИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ ЕНЕРГОРИНКУ

У роботі розглянуто метод та алгоритм формування цінових заявок з урахуванням транзитних втрат потужності в електричних мережах енергетичної системи, що дозволяє вдосконалити метод оптимального розподілу навантажень між електростанціями й підвищити ефективність функціонування ринку електроенергії.

Ключові слова: електрична станція, транспортування електроенергії, споживач, втрати потужності, цінова заявка.

Вступ

Останні десятиліття в Україні діє система оптової торгівлі електричною енергією, організована за принципом «єдиного покупця». Було засновано оптовий ринок електроенергії (ОРЕ), на якому проходять операції купівлі-продажу електричної енергії за участі енергогенерувальних компаній-конкурентів, системного оператора та незалежних постачальників електричної енергії [1, 2].

Ураховуючи недоліки такої моделі ринку, деякі країни Євросоюзу перейшли на аукціонний продаж електроенергії. На сьогодні це актуально і для України. У новій схемі продажу електроенергії потужні споживачі отримують право укладати прямі двосторонні договори з електричними станціями на постачання електроенергії. Обласні енергопостачальні компанії зможуть встановлювати ціну на електроенергію й укладати прямі договори з окремими споживачами. Іншим споживачам відпускати електроенергію з балансувального ринку.

Для формування цін на електроенергію для таких споживачів, як і в сучасних умовах функціонування енергоринку, необхідно враховувати, що їхнє навантаження покривається сукупністю блоків електростанцій. Разом із тим, кожен виробник заявляє свою ціну на відпущену електроенергію певного блоку. Тому перехід до системи двосторонніх договорів пов'язаний з необхідністю визначення частки кожного джерела в покритті навантаження окремого споживача (енергопостачальної компанії) і, на цій підставі, мінімальної ціни, яку споживач повинен сплачувати за отриману електроенергію.

Іншою проблемою переходу до нових ринкових умов є сучасна практика розподілу заявленого навантаження між джерелами електроенергії, що ґрунтується на використанні цінових заявок блоків електростанцій. У розрахунку заявленої ціни електроенергії окремого блока враховують вартісні показники її вироблення, але не враховують витрати, пов'язані з її транспортуванням електричними мережами. Це призводить до завантаження насамперед агрегатів з меншою питомою вартістю, незалежно від їхнього розташування відносно навантажень. Наслідками такого підходу є ускладнення із забезпеченням стійкості й підтриманням економічності режимів магістральних мереж енергосистем, що проявляється в додаткових експлуатаційних витратах. Крім того, у системного оператора з'являється можливість лобювати інтереси окремих енергогенерувальних компаній.

Отже, необхідно вдосконалювати методику формування цінових заявок, урахувавши інші складники витрат, а саме: витрати на транспортування електроенергії мережами-транзитерами. Це призведе до зміни співвідношення вартості електроенергії окремих блоків

для певних енергопостачальних компаній або кінцевих споживачів, що, у свою чергу, вплине на оптимальний розподіл навантаження між електричними станціями. Крім того, урахування в критерії оптимальності зазначеної задачі складника адресних втрат в електромережах забезпечить передумови для її розв'язання в комплексі з актуальною задачею оперативної оптимізації потоків потужності в електричних системах за мінімуму втрат електроенергії.

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

Визначення втрат потужності під час транспортування електроенергії за економічного й оптимального поточкорозподілу в електроенергетичній системі

Розподіл потоків потужності в електроенергетичній системі (ЕЕС) пропонуємо визначати за результатами розрахунку струморозподілу на підставі зафіксованих (або змодельованих) режимних параметрів. Для визначення економічного струморозподілу в електричних мережах одного класу напруги, який забезпечує мінімум втрат електроенергії на її передачу, за умови відсутності обмежень на задавальні (генерувальні) струми вузлів задачу формулюємо так [3]:

мінімізувати

$$\Delta P = \hat{\mathbf{I}}_t \mathbf{R}_e \hat{\mathbf{I}} \quad (1)$$

за умови

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}' \mathbf{I}_a &= \mathbf{J}_a \\ \mathbf{M}' \mathbf{I}_p &= \mathbf{J}_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\hat{\mathbf{I}}_t, \hat{\mathbf{I}}$ – транспонований і спряжений вектори струмів у вітках (далі індекс t означає, що матриця або вектор є транспонованими); \mathbf{R}_e – діагональна матриця активних опорів віток схеми електричної мережі; \mathbf{M}' – перша матриця інцидентів мережі, у якій викреслено рядки, що відповідають генерувальним вузлам (це еквівалентно об'єднанню всіх джерел живлення в один розрахунковий базисний вузол); $\mathbf{I}_a, \mathbf{I}_p$ – вектори активних і реактивних складників струмів у вітках; $\mathbf{J}_a, \mathbf{J}_p$ – вектори активних і реактивних складників вузлових струмів.

Мінімум втрат активної потужності та економічні струми у вітках заступної схеми ЕМ визначають за допомогою методу невизначених множників Лагранжа. Розв'язок цієї задачі в [4] подано у вигляді:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ae} \\ \mathbf{I}_{pe} \\ \mu_a \\ \mu_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_R & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_R \\ -2\mathbf{R} & 0 \\ 0 & -2\mathbf{R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{J}_a \\ \mathbf{J}_p \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де \mathbf{C}_R – матриця коефіцієнтів струморозподілу розрахункової схеми мережі, у якій опори віток представлені тільки їхніми активними складниками: $\mathbf{C}_R = \mathbf{R}_e^{-1} \mathbf{M}'_t (\mathbf{M}'_e \mathbf{R}_e^{-1} \mathbf{M}'_t)^{-1}$; \mathbf{R} – матриця вузлових опорів заступної R -схеми: $\mathbf{R} = (\mathbf{M}'_e \mathbf{R}_e^{-1} \mathbf{M}'_t)^{-1}$; μ_a, μ_p – активна і реактивна складники вектора невизначених множників Лагранжа.

Виходячи з (3), мінімальні втрати електроенергії, які можливі в ЕЕС за заданих навантажень у вузлах, незалежно від її схеми й пасивних параметрів, будуть тоді, коли

потокорозподіл в ЕЕС відповідає економічному струморозподілу. Останній може бути розрахований за її заступною R -схемою, приклад якої наведено на рис. 1, а. Усі джерела електроенергії, потужності яких оптимізуються, представляються балансувальними вузлами.

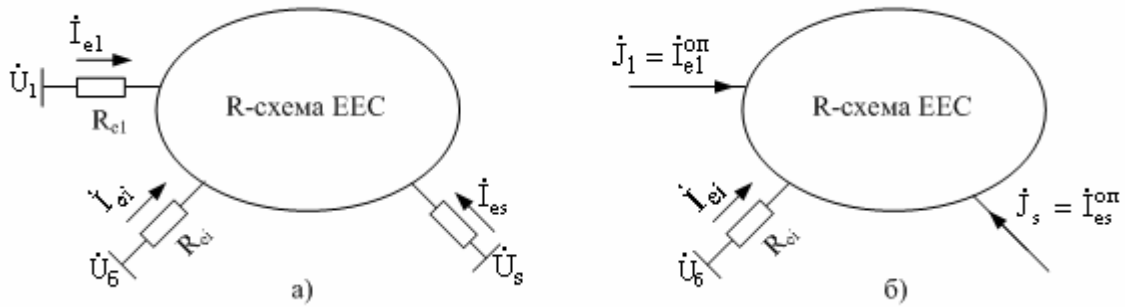


Рис. 1. Заступна схема для визначення економічного (а) і оптимального (б) потокорозподілу в ЕЕС з представленням джерел електроенергії їхніми економічними опорами

Для електричних мереж із трансформаторними зв'язками, як показано в [5], оптимальний струморозподіл можна розрахувати за виразом:

$$\dot{\mathbf{I}}_e = \dot{\mathbf{C}}_e \mathbf{J}, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{C}}_e$ – матриця струморозподілу зі збалансованими коефіцієнтами трансформації, у якій опори віток представлені тільки їхніми активними складниками $\dot{\mathbf{C}}_e = \mathbf{R}_e^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{kt}^{z\delta} \left(\hat{\mathbf{M}}_k^{z\delta} \mathbf{R}_e^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{kt}^{z\delta} \right)^{-1}$; \mathbf{J} – вектор-стовпець задавальних струмів, кожний елемент якого знаходять за відомих потужностей навантаження \dot{S}_i та напруг у вузлах \dot{U}_i :

$\mathbf{J} = \frac{1}{\sqrt{3}} \hat{\mathbf{U}}_d^{-1} \hat{\mathbf{S}}$; $\dot{\mathbf{M}}_k^{z\delta}$ – перша матриця зв'язків віток заступної схеми ЕЕС у її вузлах, визначена за умови збалансованих коефіцієнтів трансформації.

Отже, якщо струморозподіл в електричній мережі збігається зі струморозподілом, розрахованим за заступною R -схемою зі збалансованими коефіцієнтами трансформації, то він відповідає мінімуму втрат активної потужності в ЕЕС, в тому числі їхньому складнику, зумовленому взаємними і транзитними потоками потужності [5].

На потужності генерувальних вузлів у практичних задачах накладають технічні обмеження, урахування яких зумовлює перехід від економічного до умовно оптимального режиму. У випадку порушення певного обмеження, активне генерування у вузлі фіксують на граничному значенні, а задане джерело виводять з переліку оптимізованих. Утворений небаланс потужності розноситься між іншими генерувальними вузлами заступної R -схеми. В оптимальному режимі сумарні втрати активної потужності збільшуються порівняно з економічним, однак вони є мінімально можливими з урахуванням обмежень за потужністю генерування. Перерахувавши оптимальні потужності джерел, крім базисного вузла, задавальні струми, отримуємо заступну схему (див. рис. 1, б), яка дає змогу відтворити оптимальний струморозподіл в електричній мережі, максимально наближений до економічного:

$$\dot{\mathbf{I}}^{on} = \dot{\mathbf{C}}^{on} \mathbf{J}^{on}, \quad (5)$$

де $\dot{\mathbf{C}}^{on}$ – матриця струморозподілу, яка, на відміну від матриці $\dot{\mathbf{C}}_e$, містить рядки і стовпці, що відповідають генерувальним вузлам, крім базисного: $\dot{\mathbf{C}}^{on} = \mathbf{R}_e^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{kt}^{on} \left(\hat{\mathbf{M}}_k^{on} \mathbf{R}_e^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{kt}^{on} \right)^{-1}$; \mathbf{J}^{on}

– вектор-стовпець, утворений із блоків \mathbf{J} та $\mathbf{J}_{дж}$: $\mathbf{J}^{on} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{J}_{дж} \end{bmatrix}$; $\mathbf{J}_{дж}$ – вектор оптимальних

задавальних струмів джерел електроенергії; $\dot{\mathbf{M}}_k^{on}$ – перша матриця зв'язків, аналогічна до $\dot{\mathbf{M}}_k^{z6}$, у якій не викреслено рядки, що відповідають вузлам приєднання джерел електроенергії з оптимізованими параметрами.

Для отримання виразу для визначення втрат потужності в електричних мережах, що відповідають оптимальному струморозподілу, втрати в i -ій вітці заступної схеми ЕМ можна подати так:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \sqrt{3} (\dot{U}_i \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}^{(i)}) \widehat{I}_i, \quad (6)$$

де $\dot{U}_i \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}^{(i)}$ – спад напруги у i -ій вітці; $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}^{(i)}$ – i -ий стовпець матриці зв'язків віток заступної схеми в її вузлах (включаючи базисний) $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}$ з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації; \widehat{I}_i – комплексно-спряжене значення струму в i -ій вітці заступної схеми.

Підставивши (5) в (6), отримаємо вираз для визначення втрат потужності в i -ій вітці за умови оптимального струморозподілу, який відповідає мінімуму втрат від взаємних і транзитних перетоків у мережах:

$$\Delta \dot{S}_{ei}^{on} = \sqrt{3} (\dot{U}_i \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}^{(i)}) \widehat{\mathbf{C}}_i^{on} \widehat{\mathbf{J}}^{on}. \quad (7)$$

Уведемо позначення

$$\delta \dot{U}_{ei} = \sqrt{3} (\dot{U}_i \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma k}^{(i)}) \widehat{\mathbf{C}}_i^{on}, \quad (8)$$

тоді вираз (7) набуде вигляду

$$\Delta \dot{S}_{ei}^{on} = \delta \dot{U}_{ei} \widehat{\mathbf{J}}^{on}. \quad (9)$$

Ураховуючи (9), вектор втрат потужності у вітках заступної схеми ЕМ за умови оптимального струморозподілу

$$\Delta \dot{S}_e^{on} = \delta \dot{U}_e \widehat{\mathbf{J}}^{on}. \quad (10)$$

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

Використовуючи (10), можна визначати сумарні втрати потужності в електричних мережах від протікання струмів навантаження за оптимального режиму, а також виділяти оптимальну частку транзитних втрат в ЕМ від окремої трансакції електроенергії в умовах електропостачання за двосторонніми договорами. Можливість визначення оптимальних транзитних втрат дозволяє враховувати їх в цінній заявці блока, відповідно коригуючи тариф на електроенергію певного джерела для кожного споживача окремо. Таке уточнення ціни дозволяє створити конкурентне середовище для генерувальних компаній, тому що споживачі зможуть обирати виробників з урахуванням мінімальних витрат на транспортування і, відповідно, з меншою вартістю електроенергії.

Алгоритм виділення із загальних втрат у мережі складника, зумовленого протіканням струмів навантаження k -го споживача від s -го джерела електроенергії, проілюстровано на рис. 2.

Матриця $\delta \dot{U}_e$ має розмірність $n \times (m-1)$. Її рядки відповідають віткам, а стовпці – вузлам заступної схеми електричної мережі без урахування базисного вузла (БВ). Вектор $\widehat{\mathbf{J}}^{on}$ – вектор-стовпець задавальних струмів у вузлах без урахування базисного. Для визначення транзитних втрат необхідно виділити з матриць $\delta \dot{U}_e$ та $\widehat{\mathbf{J}}^{on}$ елементи, які відповідають заданому переліку віток η_e мережі-транзитера, а також вузлів η_s (генерування s -го джерела) та η_k (навантаження k -го споживача), між якими відбувається трансакція електроенергії.

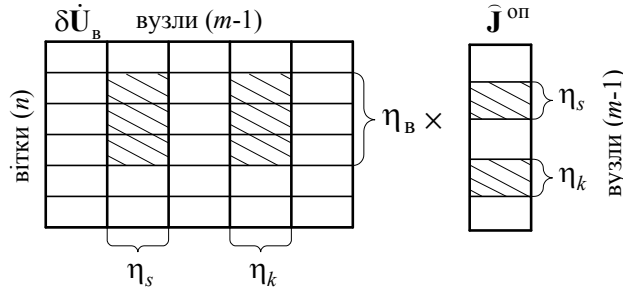


Рис. 2. Приклад виділення параметрів для визначення втрат потужності у вітках мережі-транзитера η_ϵ , зумовлених протіканням струмів навантаження від s -го джерела до k -го споживача

У задачі визначення транзитного складника втрат потужності в мережі ℓ від транспортування електроенергії виробника s до споживача k можливі три випадки:

1) Якщо генерування s -го джерела повністю забезпечує навантаження k -го споживача, тоді вираз (10) набуває вигляду:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s,k)}^{on} = \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,s)} \hat{\mathbf{J}}_{(s,k)}^{on} + \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,k)} \hat{\mathbf{J}}_k^{on}, \quad (11)$$

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

2) Якщо генерування s -го джерела частково забезпечує навантаження k -го споживача, тоді вираз (10) набуває вигляду:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s,k)}^{on} = \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,s)} \hat{\mathbf{J}}_s^{on} + \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,k)} \hat{\mathbf{J}}_{(k,s)}^{on}, \quad (12)$$

де $\hat{\mathbf{J}}_s^{on}$ – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку η_s за умови оптимального струморозподілу в мережі; $\hat{\mathbf{J}}_{(k,s)}^{on}$ – фрагмент вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліку η_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 вираз (10) набуває вигляду:

$$\Delta \dot{S}_{\ell(s,k)}^{on} = \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,s)} \hat{\mathbf{J}}_{(s,u)}^{on} + \sum_{i \in \eta_\epsilon} \delta \dot{U}_{\epsilon(i,k)} \hat{\mathbf{J}}_{(k,u)}^{on}, \quad (13)$$

де $\hat{\mathbf{J}}_{(s,u)}^{on}$, $\hat{\mathbf{J}}_{(k,u)}^{on}$ – фрагменти вектора комплексно-спряжених струмів у вузлах з переліків, відповідно, η_s та η_k , пронормовані до комплексно-спряженого сумарного часткового струму генерування за умови оптимального струморозподілу в ЕМ.

Отже, безпосереднє визначення транзитного складника втрат у мережі ℓ при транспортуванні електроенергії від s -го джерела електроенергії до k -го споживача здійснюють за виразами (11) – (13) залежно від умов електропостачання.

Отримані значення транзитних втрат можна враховувати в цінових заявках виробників для кожного споживача.

Коригування цінових заявок з урахуванням двосторонніх договорів на постачання електроенергії

Під час укладання контрактів на електропостачання між виробником і споживачем (енергопостачальною компанією) у ціні виробника для забезпечення прозорості та конкуренції слід ураховувати витрати на транспортування електричної енергії. Однак для узгодження інтересів енергогенерувальних, транспортних та енергопостачальних компаній витрати на транспортування, закладені в ціну виробника, мають відповідати оптимальному режиму електромережі.

Під час електропостачання k -го споживача від s -го джерела протягом періоду T , який характеризується умовно постійним режимом ЕЕС, сумарні витрати складають

$$B_{\Sigma s, k} = \left(P_k \cdot \beta_s + \sum_{\ell \in N} [\Delta P_{\ell(s, k)}^{on} \cdot c_{\ell}^{on}] \right) \cdot T, \quad (14)$$

де P_k – потужність навантаження, яку покриває джерело за умовами контракту; β_s – середня відпускна ціна 1 кВт·год електроенергії джерела s ; $\Delta P_{\ell(s, k)}^{on}$ – дійсна частина транзитного складника втрат потужності в електричній мережі ℓ , зумовленого протіканням струмового навантаження k -го споживача від джерела s , який визначають за (11) – (13); c_{ℓ}^{on} – середня вартість транспортування 1 кВт·год електроенергії мережею ℓ з урахуванням упровадження заходів з оптимізації її режимів; N – множина електричних мереж, якими здійснюють транзит потужності.

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

$$u_{EC_s} = \frac{B_{\Sigma s, k}}{P_k \cdot T},$$

або, ураховуючи (14):

$$u_{EC_s} = \beta_s + \frac{\sum_{\ell \in N} [\Delta P_{\ell(s, k)}^{on} \cdot c_{\ell}^{on}]}{P_k}. \quad (15)$$

У припущенні, що для всіх суб'єктів вартість транспортування електроенергії мережами визначається єдиним оптовим тарифом енергоринку u_{OP} , вираз (15) набуде вигляду:

$$u_{EC_s} = \beta_s + \frac{\sum_{\ell \in N} \Delta P_{\ell(s, k)}^{on}}{P_k} \cdot u_{OP}. \quad (16)$$

Виробник може укласти договори на електропостачання з кількома споживачами, для яких витрати на транспортування електроенергії будуть різними. Виходячи з цього, ціну для окремого джерела необхідно коригувати з урахуванням транзитних втрат до можливих споживачів електроенергії.

Приклад коригування цінової заявки для окремого блока з урахуванням витрат на транспортування електроенергії до трьох різних споживачів наведено на рис. 3. Із наведеного видно, що врахування витрат на транспортування електроенергії до споживачів 1 та 2 збільшує заявлену ціну електроенергії блока (рис. 3, а, рис. 3, б).

Однак у випадку постачання електроенергії до споживача 3 (рис. 3, в) збільшення потужності генерування блоку призводить до локального розвантаження транзитної електромережі, зменшуючи витрати на транспортування (порівняно з альтернативними варіантами електропостачання споживача 3). Виходячи з цього, після уточнення ціна у третій та четвертій точках (рис. 3, в) знижується, оскільки генерування цього джерела

зменшує сумарні транзитні втрати і другий складник виразу (16) стає від'ємним. Отже, у цій заявці блока для цього споживача ціна на електроенергію знизиться, що підвищить його шанси на отримання квоти на постачання електроенергії.

Отже, реалізація запропонованого методу коригування цінових заявок електричних станцій сприятиме комплексному підвищенню ефективності покриття сумарного навантаження енергосистеми за рахунок оптимізації переліку працюючих блоків, а також стимулювання транспортних компаній до запровадження заходів з оптимізації режимів електромереж.

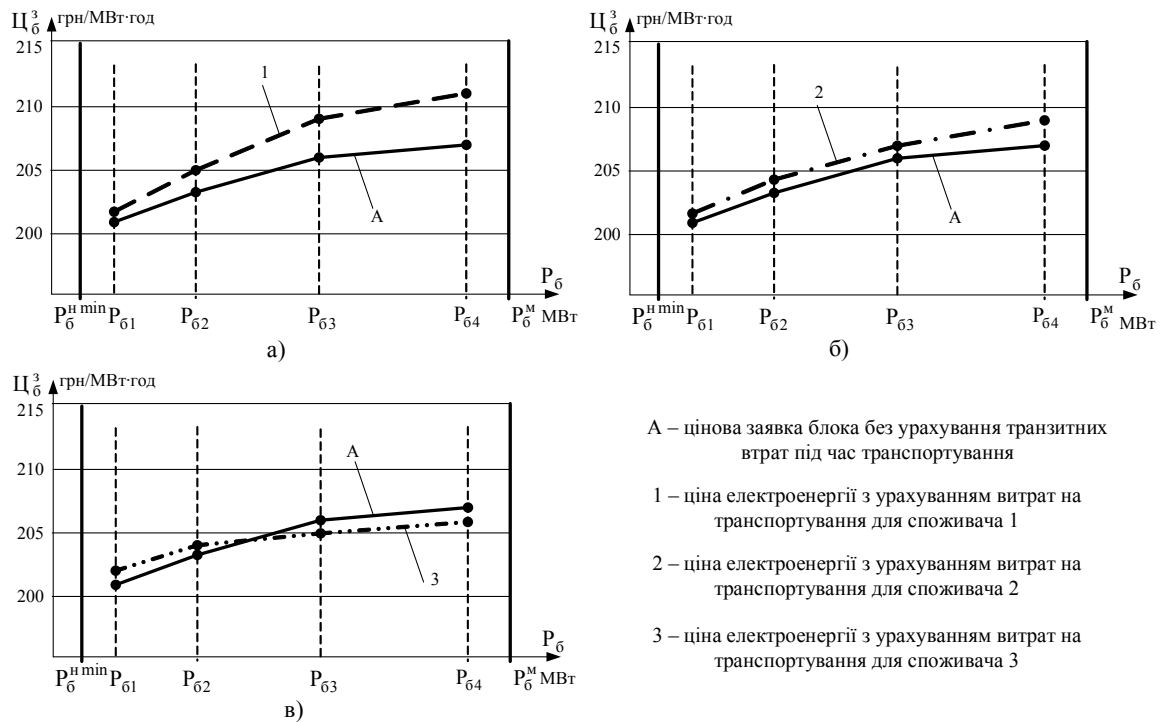


Рис. 3. Приклад коригування цінових заявок блока електричної станції з урахуванням втрат на транспортування електроенергії

Висновки

У 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. Розроблено математичну модель та запропоновано алгоритм для 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.

Метод визначення транзитних втрат потужності в електромережі в нових економічних умовах дозволяє виділити частку транзитних втрат потужності в умовах адресності електропостачання. Урахування мінімально можливого значення транзитних втрат у цінових заявках джерел електроенергії дозволяє створити конкурентне середовище для генерувальних компаній. Використання модифікованих таким чином цінових заявок спрощує розв'язання задачі оптимізації розподілу навантажень і забезпечує обґрунтованість та прозорість прийняття рішень, а значить, узгодженість роботи окремих суб'єктів енергоринка.

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. – (Постанова від 16.11.2002 № 1789). – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1789-2002-%D0%BF>.
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.

Лежнюк Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245, e-mail: lpd@inbox.ru.

Кулик Володимир Володимирович – к. т. н., доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245; e-mail: kulik_vv@mail.ru.

Тептя Віра Володимирівна – к. т. н., інженер кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245, e-mail: TVV75@list.ru.

Лесько Владислав Олександрович – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245; e-mail: leskovlad@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.