

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ПІДСТАНЦІЙ (РОЗПОДІЛЬНИХ ПУНКТІВ) У МЕРЕЖАХ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ КОМПАНІЙ З УРАХУВАННЯМ ЛІНІЙ ЗОВНІШНЬОГО ЖИВЛЕННЯ

© Романюк Ю.Ф., Соломчак О.В., Соломчак А.О., 2013

Запропоновано алгоритм розрахунку місць оптимального розташування головних розподільних підстанцій і розподільних пунктів енергопостачальних компаній з врахуванням ліній зовнішнього живлення. Критерієм оптимізації вибрано дисконтований чистий прибуток від транспортування та реалізації електричної енергії споживачам. Показано, що місце оптимального розташування розподільної підстанції (пункту) зміщене відносно центра електричних навантажень у напрямку джерела живлення.

Ключові слова: електрична мережа, розподільна підстанція, пункт, центр електричних навантажень, дисконтований прибуток, оптимізація.

It has been offered the algorithms determine the optimal location of distribution substations or switchgear for the electrical system, taking into account external power line. Optimality criterion selected discounted costs. It is shown that the optimal position location distribution substation (switching substation) is shifted from the centre of electrical loads in the direction of power.

Key words: distribution substation, distribution points, optimization, algorithm, system power supply, electrical network.

Вступ

Одним із важливих питань проектування є вибір оптимальної схеми зовнішнього електропостачання споживачів.

Як відомо, сьогодні в розподільних електричних мережах застосовують радіальні, магістральні та змішані радіально-магістральні схеми електропостачання. Під час проектування електричних мереж виникає необхідність у виборі оптимального розміщення головних розподільних трансформаторних підстанцій (ГРП) та розподільних пунктів (РП). Зазвичай, ГРП (РП) розміщують у центрі електричних навантажень (ЦЕН) без врахування витрат на спорудження та експлуатацію ліній зовнішнього живлення, що призводить до збільшення сумарних втрат електроенергії та погіршення техніко-економічних показників системи електропостачання. Згідно з методикою [1], під час визначення економічної ефективності капітальних вкладень у спорудження електричних мереж, крім капітальних вкладень, повинні враховуватися також щорічні витрати на експлуатацію цих мереж, які складаються з витрат на їхнє технічне обслуговування та ремонт і вартості відшкодування втрат електроенергії. Крім того, під час порівняння варіантів схем електричних мереж потрібно враховувати надійність електропостачання. Найнадійнішими є радіальні схеми розподільних електричних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За значної протяжності ліній розподільних електричних мереж важливим є зменшення капіталовкладень на їх спорудження. У роботі [2] була запропонована методика вибору місця розташування ГРП за умовою мінімальних витрат провідникового матеріалу при вибраному

економічному перерізі проводів для випадку радіального живлення абонентських трансформаторних підстанцій. Проте, при цьому мінімізуються тільки капітальні вкладення на спорудження мережі й не враховуються витрати на технічне обслуговування і ремонт ліній, а також вартість втрат електроенергії в лініях розподільної мережі. Крім того, у цій методиці не враховувалася дискретність шкали стандартних перерізів проводів та фактична вартість ліній залежно від їх конструкції, номінальної напруги і кліматичних умов. Тому, згідно з [1], вибір оптимального варіанта розміщення ГРП (РП) розподільної мережі здійснено за інтегральним критерієм максимуму дисконтованого чистого прибутку від транспортування та реалізації електричної енергії споживачам, який враховує капітальні вкладення, експлуатаційні витрати та обсяг реалізованої електроенергії.

Постановка завдання

Метою роботи є:

- 1) розроблення алгоритму вибору оптимального варіанта розміщення ГРП (РП) розподільної мережі за інтегральним критерієм максимуму дисконтованого чистого прибутку, який враховує капітальні вкладення, експлуатаційні витрати та обсяг реалізованої електроенергії;
- 2) врахування параметрів мережі зовнішнього живлення (розташування джерела живлення, номінальна напруга, вартість спорудження, втрати електроенергії і витрати на експлуатацію лінії живлення) під час визначення оптимального розташування ГРП (РП).

Результати

Нехай у довільній системі прямокутних координат x, y розміщено n знижувальних підстанцій з координатами x_i, y_i (рис. 1). Для заданого розміщення ТП потрібно визначити координати x_0, y_0 ГРП (РП), які відповідають умові максимуму дисконтованого прибутку для розподільної радіальної мережі, переріз проводів ліній якої вибрано за умовою економічності [3].

Дисконтований чистий прибуток енергопостачальної компанії для мережі згідно з [3] для статичних задач можна записати як

$$P_{dc} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i T_{нбі} (\Pi_{вих} - \Pi_{вх}) (1-p)}{E(1+k) \cos \phi_i} - \sum_{i=1}^n \left[K_{0i} l_i \left(1 + \frac{\alpha_e}{100E} (1-p) - \frac{\alpha_p p}{100E} \right) + \frac{S_i^2 r_{0i} l_i \tau \Pi_{вх} (1-p) 10^{-3}}{U_i^2 E} \right], \quad (1)$$

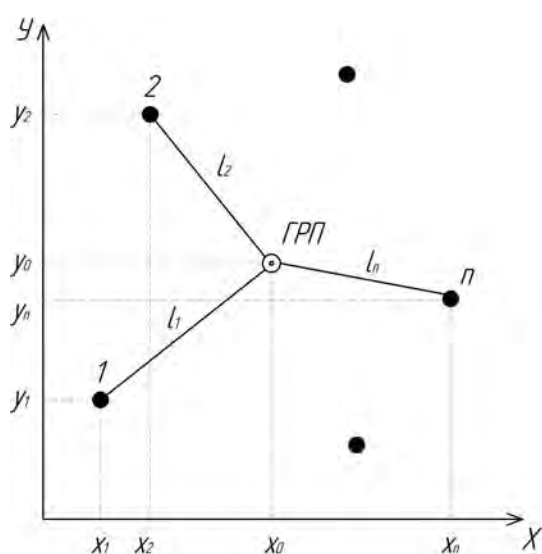


Рис. 1. Схема розміщення трансформаторних підстанцій

де S_i – найбільше активне навантаження i -ї лінії, кВт; $\cos \phi_i$ – коефіцієнт потужності навантаження i -ї лінії; U_i – номінальна напруга i -ї лінії, кВ; K_{0i} – питома вартість спорудження i -ї лінії, грн/км. r_{0i} – погонний активний опір i -ї лінії, Ом/км; $T_{нбі}$ – час використання найбільшого навантаження i -ї лінії, год; $\Pi_{вих}, \Pi_{вх}$ – відповідно вартість електроенергії на виході та вході в електричну мережу, по якій здійснюється транспортування енергії, грн/кВт-год; K – ставка податку на додану вартість, в.о; p – ставка податку на прибуток, в.о; α_e – норма відрахувань на технічне обслуговування та ремонт ліній, %; α_p – норма витрат на реновацію, %; τ – час найбільших втрат, год; E – норма дисконту, яку визначають з врахуванням процентної ставки Національного банку України для довготривалих вкладів [4].

Вираз (1) можна представити як різницю членів, що не залежать і залежать від довжини ліній:

$$P_{dc} = D - \sum_{i=1}^n B_{0i} l_i = D - \sum_{i=1}^n B_{0i} \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}, \quad (2)$$

де D – дисконтований дохід енергопостачальної компанії від транспортування електроенергії; B_{0i} – питомі дисконтовані витрати на одиницю довжини i -ї лінії мережі; l_i – довжина i -ї лінії; n – кількість ліній.

Довжину i -ї лінії l_i виразимо як

$$l_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}, \quad (3)$$

де x_0 та y_0 – координати шуканої точки.

Під час визначення дисконтованого прибутку врахуємо тільки вартість ліній електропередавання без вартості спорудження ГРП (РП).

Для знаходження координат x_0 та y_0 , що відповідають максимуму дисконтованого прибутку, знайдемо часткові похідні функції (2) по координатах x_0 , y_0 і прирівняємо їх до нуля. Оскільки перший доданок рівняння (2) не залежить від довжини ліній, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_{dc}}{\partial x_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}(x_0 - x_i)}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}} = 0; \\ \frac{\partial P_{dc}}{\partial y_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}(y_0 - y_i)}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4) відносно x_0 та y_0 , одержимо

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} x_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i}}; \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} y_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Систему нелінійних алгебричних рівнянь (5) можна розв'язати методом простої ітерації. Як перше наближення, можна використати координати центра електричних навантажень (ЦЕН):

$$\left. \begin{aligned} x'_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n S_i x_i}{\sum_{i=1}^n S_i}; \\ y'_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum_{i=1}^n S_i}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Визначивши значення x'_0 , y'_0 , підставимо їх в праву частину рівнянь (5) замість x_0 та y_0 . Одержані при цьому уточнені значення x_0 та y_0 знову підставимо в рівняння (5). Розрахунок повторюємо до тих пір, поки різниця між одержаними значеннями координат на останньому кроці ітерації та їх попередніми значеннями стане меншою від заданої точності розрахунку. При значній кількості підстанцій розрахунок доцільно виконувати на комп'ютері. Для розв'язання задачі потрібно попередньо вибрати перерізи проводів ліній, кількість паралельних кіл і визначити питомі параметри ліній, після чого виконати розрахунок згідно з виразами (5).

Для прикладу, визначимо місце оптимального розташування ГРП (РП) за максимумом дисконтованого прибутку для вхідних даних, наведених у табл. 1. Питома вартість ліній K_0 визначена згідно з [5] шляхом перерахунку валюти Росії за курсом Національного банку України.

Таблиця 1

Вхідні дані для визначення місця оптимального розташування ГРП

Номер підстанції	S_i , кВ·А	cosφ	x_i , км	y_i , км	Марка кабелю	r_0 , Ом/км	K_0 , тис. грн/км
1	1810	0,85	0,7	1,5	АСБ-95	0,33	450
2	1334	0,80	1,4	5,2	АСБ-70	0,45	432
3	953	0,92	3,1	6,0	АСБ-50	0,63	417
4	1810	0,85	5,3	3,3	АСБ-95	0,33	450
5	1334	0,90	4,1	1,5	АСБ-70	0,45	432

Розподільна мережа номінальною напругою $U_{ном} = 10$ кВ виконана кабелем марки АСБ з алюмінієвими жилами. Вартість електроенергії на вході електричної мережі $C_{вх} = 0,827$ грн/кВт·год, вартість реалізованої споживачам електроенергії $C_{вих} = 1,13$ грн/кВт·год, час використання найбільшого навантаження $T_{нб} = 4700$ год. Під час розрахунку прийємо: $\alpha_e = 3,8\%$; $\alpha_e = 4\%$; $p = 0,21$; $k = 0,2$; $E = 0,2$. Заданому значенню $T_{нб}$ відповідає $\tau = 3090$ год [6].

Спочатку за формулами (6) розрахуємо координати ЦЕН $x'_0 = 2,921$ км, $y'_0 = 3,224$ км, після чого для заданих вихідних даних згідно з виразами (5) визначимо координати оптимального розміщення ГРП (РП) за умовою максимуму дисконтованого прибутку: $x_0 = 3,12$ км; $y_0 = 3,4$ км. При цьому не врахована лінія зовнішнього живлення, довжина якої залежить від місця розташування ГРП (РП). Від довжини цієї лінії, вибраного перерізу її проводів і номінальної напруги залежатиме сумарний дисконтований прибуток від транспортування та реалізації електричної енергії. Тому оптимізація координат розміщення ГРП (РП) повинна здійснюватися з врахуванням лінії зовнішнього живлення.

З метою врахування лінії зовнішнього живлення додатково введемо $n+1$ вузол, який відповідає місцю розташування джерела живлення (ДЖ). Потужність, яка передається від цього вузла до ГРП (РП), дорівнює сумарній потужності навантажень підстанцій $S_{n+1} = \sum_{i=1}^n S_i$. Номінальна напруга цієї лінії може відрізнятись від номінальної напруги розподільної мережі у випадку спорудження ГРП, або дорівнювати номінальній напрузі мережі у разі спорудження розподільного пункту (РП). Тому внесемо такі зміни у вираз (1), врахувавши лінію зовнішнього живлення на ділянці $(n+1)$:

$$\Pi_{dc} = D - \sum_{i=1}^n B_{0i} l_i - B_{0(n+1)} l_{(n+1)}, \quad (7)$$

де $B_{0(n+1)}$ – питомі дисконтовані витрати енергопостачальної компанії на спорудження і експлуатацію лінії зовнішнього живлення, грн/км; $l_{(n+1)}$ – довжина лінії зовнішнього живлення, км.

У результаті максимізації функції (7) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}x_i}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}x_{n+1}}{l_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}}{l_{n+1}}}; \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}y_i}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}y_{n+1}}{l_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}}{l_{n+1}}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Оцінимо економічний ефект у разі розміщення ГРП (РП) в точці, що відповідає максимуму дисконтованого прибутку порівняно з варіантом розміщення ГРП (РП) у центрі електричних навантажень. Без врахування лінії зовнішнього живлення дисконтований прибуток у разі розташування ГРП(РП) у ЦЕН становитиме 66,7 млн. грн., а в оптимальній точці – 66,73 млн. грн., тобто координати ГРП(РП) і ЦЕН практично збігаються.

Визначення координат оптимального розміщення РП з врахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 10 кВ. Для попереднього прикладу задамо координати ДЖ $x_6 = 7$ км, $y_6 = 8$ км. Сумарне навантаження лінії живлення становитиме 7241 кВА.

Якщо живлення РП здійснюється напругою 10 кВ, то лінія зовнішнього живлення повинна бути виконана двома кабелями АСБ-185 з еквівалентним питомим опором $r_0 = 0,082$ Ом/км і питомою вартістю двоколової лінії $K_0 = 880$ тис. грн/км.

На рис. 2 зображена поверхня значень функції чистого дисконтованого прибутку залежно від розташування РП.

Визначимо місце оптимального розташування РП за умовою максимуму дисконтованого прибутку: $x_0 = 4,23$ км; $y_0 = 5,01$ км. Дисконтований прибуток при цьому становить 58,62 млн.грн.

Якщо ж розмістити РП у центрі електричних навантажень з координатами $x'_0 = 2,921$ км, $y'_0 = 3,224$ км, то дисконтований прибуток становитиме 56,14 млн. грн.

Отже, неврахування лінії зовнішнього живлення зумовлює неправильне визначення місця розташування РП, а дисконтований прибуток у разі розташування РП у ЦЕН зменшується на 3 % порівняно з оптимальним варіантом.

Визначення координат оптимального розміщення ГРП з врахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 35 кВ. Розглянемо варіант, коли лінія зовнішнього живлення має вищу номінальну напругу 35 кВ. Для зовнішнього живлення виберемо повітряну лінію з проводом АС-120, з питомим опором $r_0 = 0,25$ Ом/км і питомою вартістю $K_0 = 300$ тис. грн./км.

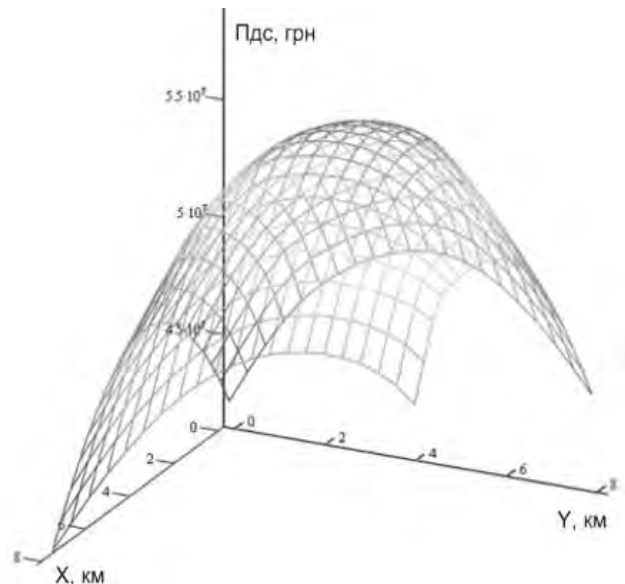


Рис. 2. Поверхня функції дисконтованого прибутку для схеми з лінією зовнішнього живлення напругою 10 кВ

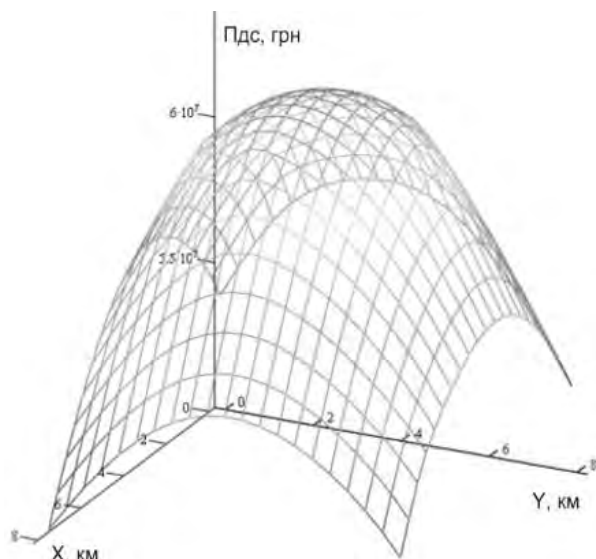


Рис. 3. Поверхня функції дискontованого прибутку для схеми з лінією зовнішнього живлення напругою 35 кВ

На рис. 3 зображена поверхня значень функції чистого дискontованого прибутку залежно від координат розміщення ГРП.

Визначимо координати ГРП за умовою максимуму дискontованого прибутку: $x_0 = 3,48$ км; $y_0 = 3,92$ км. Дискontований прибуток становить 63,91 млн. грн.

Якщо ж розмістити ГРП у центрі електричних навантажень, то дискontований прибуток становитиме 63,54 млн. грн.

У табл. 2 наведені результати розрахунку для різних варіантів розміщення ГРП (РП) з урахуванням лінії зовнішнього живлення. Схеми оптимальних варіантів розподільної мережі зображені на рис. 4.

Ця методика може бути використана також для розв'язання інших задач, наприклад, для визначення місця оптимального розташування районних знижувальних підстанцій, підстанцій глибокого вводу тощо.

Таблиця 2

Порівняльні показники варіантів розміщення ГРП (РП)

Варіант розрахунку координат оптимального розміщення ГРП (РП)	Розміщення ГРП (РП) в ЦЕН	Розміщення ГРП (РП) за умовою максимуму дискontованого прибутку		
	П _{дс} , млн. грн.	x_0 , км	y_0 , км	П _{дс} , млн. грн.
Без урахування лінії зовнішнього живлення	66,7	3,12	3,40	66,73
З урахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 10 кВ	56,14	4,23	5,01	58,62
З урахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 35 кВ	63,54	3,48	3,92	63,91

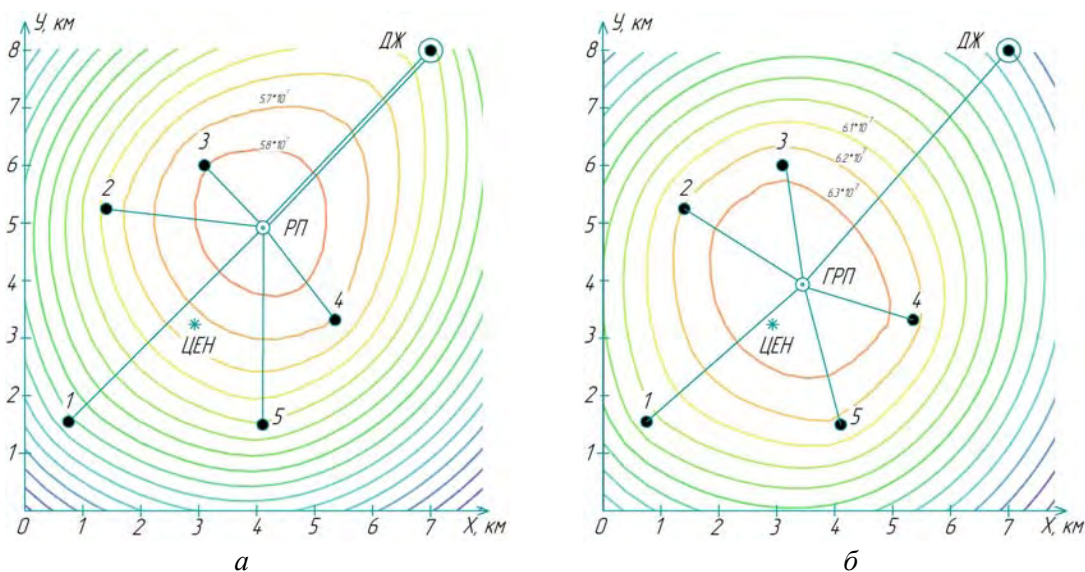


Рис. 4. Схеми оптимального розміщення ГРП (РП) з нанесеними лініями рівня дискontованого прибутку: а – живлення РП двоколовою кабельною лінією напругою 10 кВ; б – живлення ГРП повітряною лінією напругою 35 кВ

Висновки

1. Основним критерієм ефективності капіталовкладень під час визначення місця оптимального розташування ГРП (РП) в електричних мережах енергопостачальних компаній є дисконтований прибуток.
2. Місце розташування ГРП (РП) потрібно визначати з урахуванням лінії зовнішнього живлення.
3. При однакових номінальних напругах розподільної мережі і лінії зовнішнього живлення оптимальним за умовою максимального дисконтованого прибутку є розміщення РП в точці, значно зміщеній відносно ЦЕН в напрямку джерела живлення.
4. Якщо номінальна напруга лінії зовнішнього живлення вибрана вищою від номінальної напруги розподільної мережі, то координати ГРП практично збігаються з центром електричних навантажень.
5. Оскільки цільова функція є полоогою в околі оптимального розв'язку, то можливе розташування ГРП (РП) в межах лінії заданого рівня з незначним зменшенням значення дисконтованого прибутку.
6. Вибір схеми живлення підстанцій слід виконувати на підставі техніко-економічного порівняння варіантів з врахуванням всіх витрат на спорудження ліній і ГРП (РП).

1. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику: ГКД-340000002-97. – [Чинна від 1997]. – К.: Минэнерго Украины, 1997. – 103 с. 2. Романюк Ю.Ф. О выборе места оптимального расположения центральной распределительной трансформаторной подстанции / Ю.Ф. Романюк, С.С. Шнерх // В сб. «Электрические сети и системы», выпуск 11. – Львов, 1972. – С. 138–141. 3. Романюк Ю.Ф. Электричні системи та мережі: навч. посібник. – К.: Знання, 2007. – 292 с. 4. Суходоля О.М. Економічна оцінка ефективності інноваційних проектів (енергозберігаючих заходів) // Електропанорама. – 2002. – № 5– С. 37–40. 5. Укрупненные показатели стоимости сооружения (реконструкции) подстанций 35–750 кВ и линий электропередачи напряжением 6, 10–750 кВ: СТО 56947007-29.240.014 – [Чинний від 18.04.2008] – 2008. – 13 с. – (Стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС России»). 6. Рокотян С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / С.С. Рокотян, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.