

## ВИБІР МІСЦЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ГОЛОВНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПІДСТАНЦІЙ (РОЗПОДІЛЬЧИХ ПУНКТІВ) У НАФТОПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЛІНІЙ ЗОВНІШНЬОГО ЖИВЛЕННЯ

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

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: *s o l o m c h a k @ u k r . n e t*

*Запропоновано алгоритм розрахунку місць оптимального розташування головних розподільчих підстанцій (ГРП) і розподільчих пунктів (РП) систем електропостачання нафтогазових промислів з врахуванням ліній зовнішнього живлення. За критерій оптимізації вибрано дисконтовані витрати, що враховують як капітальні вкладення на спорудження електричної мережі, так і витрати на її експлуатацію. Показано, що за однакових номінальних напруг розподільчої мережі та ліній зовнішнього живлення РП місце його оптимального розташування значно зміщене відносно центра електричних навантажень (ЦЕН) в напрямку джерела живлення, а у випадку підвищення номінальної напруги лінії живлення при спорудженні ГРП її координати практично збігаються з координатами ЦЕН. Шляхом мінімізації цільової функції дисконтованих витрат одержано аналітичні вирази для визначення координат оптимального розміщення ГРП (РП) з врахуванням ліній зовнішнього живлення.*

Ключові слова: нафтогазовий промисел, система електропостачання, розподільча підстанція, розподільчий пункт, центр електричних навантажень, дисконтовані витрати, оптимізація, алгоритм розрахунку.

*Предложен алгоритм расчета мест оптимального расположения главных распределительных подстанций (ГРП) и распределительных пунктов (РП) систем электроснабжения нефтегазовых промыслов с учетом линий внешнего питания. В качестве критерия оптимизации выбраны дисконтированные затраты, которые учитывают как капитальные вложения на сооружение электрической сети, так ее эксплуатационные затраты. Показано, что при одинаковых номинальных напряжениях распределительной сети и линии внешнего питания РП место его оптимального расположения значительно смещено относительно центра электрических нагрузок (ЦЭН) в сторону источника питания, а при повышении номинального напряжения питающей линии, в случае сооружения главной распределительной подстанции (ГРП), ее координаты практически совпадают с координатами ЦЭН. Путем минимизации целевой функции дисконтированных затрат получены аналитические выражения для определения координат оптимального размещения ГРП (РП) с учетом линии внешнего питания.*

Ключевые слова: нефтегазовый промысел, система электроснабжения, распределительная подстанция, распределительный пункт, центр электрических нагрузок, дисконтированные затраты, оптимизация, алгоритм расчета.

*It has been offered the algorithms to determine the optimal location of distribution substations or switchgear for the electrical system of oil and gas industries, taking into account external power line. Discounted costs were selected as optimality criterion. It is shown that at the same nominal voltage in the distribution network and line of external power the place of optimal locations is significantly shifted relative to the center of electrical loads towards power, while increasing the nominal voltage of the supply line in case of construction of fracturing its coordinates practically coincide with the coordinates of centers. By minimizing the objective function of discounted costs, analytical equations for determining the coordinates of the optimal placement of distribution substations or switchgear with regard to the line of external power were obtained.*

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

### Вступ

Одним з важливих питань проектування є вибір оптимальної схеми зовнішнього електропостачання споживачів. Як відомо, на даний час у нафтопромислових мережах застосовують радіальні, магістральні та змішані радіально-магістральні схеми електропостачання. Під час проектування розподільчих мереж виникає необхідність у виборі місць оптимального розташування головних розподільчих трансформаторних підстанцій та розподільчих пунктів. Як правило, ГРП (РП) розміщують у центрі електричних навантажень без врахування витрат на спорудження та експлуатацію ліній зовнішнього живлення, що призводить до збільшення су-

марних втрат електроенергії та погіршення техніко-економічних показників системи електропостачання. Згідно з прийнятою 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 їх технічне обслуговування та ремонт і вартості відшкодування втрат електроенергії. Крім того, при порівнянні варіантів схем електричних мереж потрібно враховувати надійність електропостачання. Найнадійнішими є радіальні схеми розподільчих електричних мереж.

**Актуальність і невирішені питання**

При великій протяжності нафтопромислових мереж важливим є зменшення капіталовкладень на їх спорудження. У роботі [2] була запропонована методика визначення місця розташування центральної розподільної трансформаторної підстанції (ЦРП) нафтопромислового району за умовою мінімальних витрат провідникових матеріалів для радіальної схеми живлення абонентських трансформаторних підстанцій (ТП). У цій роботі було показано, що при виборі перерізу проводів ліній за економічною густиною струму сумарні втрати активної потужності в радіальній мережі пропорційні величині сумарних металовитрат. Однак при цьому були мінімізовані тільки капітальні вкладення на спорудження мережі й не враховувалися витрати на технічне обслуговування і ремонт ліній, а також вартість втрат електроенергії в лініях розподільчої 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. При визначенні місця розташування ГРП також не враховувалась лінія зовнішнього живлення, яка суттєво впливає на величину сумарних капітальних вкладень і втрат електроенергії. Тому вибір місць оптимального розміщення ГРП (РП) у нафтопромислових мережах повинен здійснюватися за критерієм мінімуму дисконтованих витрат з врахуванням ліній зовнішнього живлення.

**Постановка завдання**

Метою даної роботи є:

- розроблення алгоритму вибору оптимального варіанта розміщення ГРП (РП) нафтопромислової мережі за інтегральним критерієм мінімальних дисконтованих витрат на спорудження та експлуатацію електричної мережі, який враховує як капітальні вкладення, так і експлуатаційні витрати;
- врахування параметрів мережі зовнішнього живлення (розташування джерела живлення, номінальна напруга, вартість спорудження, втрати електроенергії і витрати на експлуатацію лінії живлення) при визначенні 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). При заданому розміщенні ТП потрібно визначити координати  $x_0, y_0$  розміщення ГРП (РП), які відповідають умові мінімальних дисконтованих витрат на спорудження розподільчої радіальної мережі, переріз проводів ліній якої вибрано за умовою економічності [3].

Якщо місце розташування ГРП вибирати за умовою мінімальних витрат провідникових матеріалів на спорудження мережі, то координати  $x_0, y_0$  можна визначити за одержаними в [2]

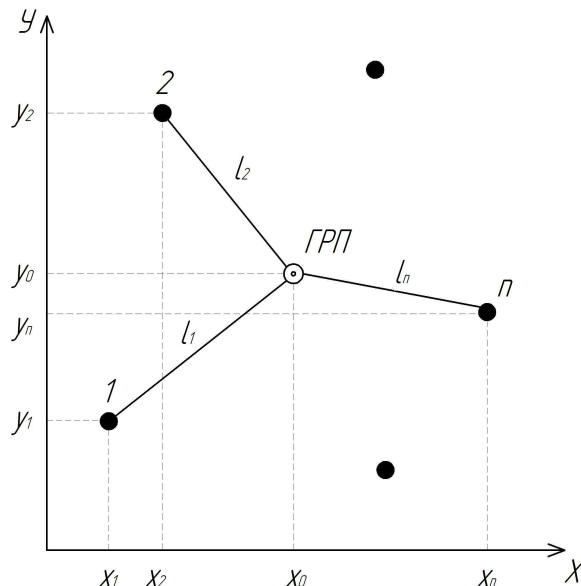
виразами залежно від геометричного розміщення і потужності навантажень трансформаторних підстанцій:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i x_i}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i x_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{l_i}}; \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i y_i}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i y_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{l_i}} \end{aligned} \right\} (1)$$

де  $S_i$  – найбільше навантаження  $i$ -ої лінії, кВ·А;

$l_i$  – довжина  $i$ -ої лінії радіальної мережі, км;

$n$  – кількість радіальних ліній.



**Рисунок 1 – Схема розміщення трансформаторних підстанцій**

Систему нелінійних рівнянь (1) можна розв'язати одним з чисельних методів, наприклад, методом ітерацій. При цьому не враховується лінія зовнішнього живлення ЦРП.

Як показали розрахунки [2], місце розташування ЦРП, визначене за умовою мінімальних витрат провідникових матеріалів на спорудження мережі, виявилось дещо зміщеним відносно центра електричних навантажень. Одержаний результат є тільки частковим розв'язком задачі оптимізації.

Інтегральним критерієм вибору місця розташування ГРП або РП радіальної нафтопромислової мережі є дисконтовані витрати на її спорудження та експлуатацію, які можна визначити як

Таблиця 1 – Вихідні дані для визначення місця оптимального розташування ГРП

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

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

де  $B_{0i}$  – питомі дисконтовані витрати на одиницю довжини  $i$ -ої лінії;

Питомі дисконтовані витрати на 1 км  $i$ -ої лінії виразимо згідно з [3] за виразом

$$B_{0i} = \left( \frac{\alpha_e \%}{100E} + 1 \right) K_{0i} + \frac{S_i^2}{U_i^2 E} r_{0i} \tau \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

де  $\alpha_e$  – норма відрхувань на технічне обслуговування та ремонт лінії, %;

$U_i$  – номінальна напруга  $i$ -ої лінії, кВ;

$K_{0i}$  – питома вартість спорудження  $i$ -ої лінії, грн/км.

$r_{0i}$  – погонний активний опір  $i$ -ої лінії, Ом/км;

$\tau$  – купівельна вартість електроенергії на вході електричної мережі, грн/кВт·год;

$E$  – норма дисконту, яку визначають з врахуванням процентної ставки Національного банку України для довготермінових вкладів, інфляційних процесів, ступеня ризику інвесторів і рівня ліквідності обладнання [5].

Довжину  $i$ -ої лінії  $l_i$  визначимо за формулою

$$l_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}, \quad (4)$$

де  $x_0$  та  $y_0$  – координати шуканої точки.

У дисконтованих витратах врахуємо тільки вартість ліній електропередавання без вартості ГРП (РП).

Для знаходження координат  $x_0$  та  $y_0$ , що відповідають мінімуму дисконтованих витрат, знайдемо часткові похідні функції (2) за координатами  $x_0$ ,  $y_0$  та прирівняємо їх до нуля:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial B_{dc}}{\partial x_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} (x_0 - x_i)}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}} = 0; \\ \frac{\partial B_{dc}}{\partial y_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} (y_0 - y_i)}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) відносно  $x_0$  та  $y_0$ , одержимо:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} x_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i}}; \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} y_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Систему нелінійних алгебричних рівнянь (6) можна розв'язати методом простої ітерації. Як перше наближення можна використати координати центра електричних навантажень:

$$\left. \begin{aligned} x'_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n S_i x_i}{\sum_{i=1}^n S_i}; \\ y'_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum_{i=1}^n S_i}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Визначивши значення  $x'_0$ ,  $y'_0$ , підставимо їх в праву частину рівнянь (6) замість  $x_0$  та  $y_0$ . Одержані при цьому уточнені значення  $x_0$  та  $y_0$  знову підставимо в рівняння (6). 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 з використанням комп'ютера.

Для розв'язання задачі потрібно попередньо вибрати переріз проводів, кількість паралельних кіл і визначити питомі параметри ліній, після чого слід розв'язати систему рівнянь (6).

Для прикладу, визначимо місце оптимального розташування ГРП (РП) за мінімумом дисконтованих витрат для вихідних даних, наведених у табл. 1.

Розподільча мережа номінальною напругою  $U_{ном} = 10$  кВ виконана кабелем АСБ з алюмінієвими жилами. Вартість електроенергії  $C_{ex} = 0,8$  грн / кВт·год, час використання найбільшого навантаження  $T_{ноб} = 4700$  год. Питома вартість ліній  $K_0$  визначена згідно з [6] шляхом перерахунку валюти Росії за курсом національного банку України. Норма експлуатаційних відрахувань  $\alpha_e = 3,8\%$ , норма дисконту  $E = 0,2$ .

За формулами (7) розраховуємо координати ЦЕН  $x'_0 = 2,921$  км,  $y'_0 = 3,224$  км, після чого для заданих вихідних даних згідно з виразами (6) визначаємо координати оптимального розміщення ГРП (РП) за умовою мінімальних дисконтованих витрат без врахування зовнішнього живлення:  $x_0 = 3,104$  км,  $y_0 = 3,438$  км. При цьому не враховано лінію зовнішнього живлення, довжина якої залежить від місця розташування ГРП (РП). Від довжини цієї лінії, вибраного перерізу її проводів і номінальної напруги залежатимуть сумарні дисконтовані витрати на спорудження та експлуатацію розподільчої мережі. Тому оптимізація координат розміщення ГРП (РП) повинна здійснюватися з врахуванням зовнішнього живлення.

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

$$B_{dc} = \sum_{i=1}^n B_{0i} l_i + B_{0(n+1)} l_{(n+1)}, \quad (8)$$

де  $B_{0(n+1)} = \left( \frac{\alpha_e \%}{100E} + 1 \right) K_{0(n+1)} + C \frac{S_{n+1}^2}{(U_{ном}^{n+1})^2 E} \times r_{0(n+1)} \tau \cdot 10^{-3}$  – питомі дисконтовані витрати на спорудження та експлуатацію лінії зовнішнього живлення;

$U_{ном}^{n+1}$  – номінальна напруга лінії зовнішнього живлення;

$l_{(n+1)}$  – довжина лінії зовнішнього живлення.

У результаті мінімізації функції (8) одержимо:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} x_i}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)} x_{n+1}}{l_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}}{l_{n+1}}}; \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i} y_i}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)} y_{n+1}}{l_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{B_{0i}}{l_i} + \frac{B_{0(n+1)}}{l_{n+1}}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Оцінимо економічний ефект від розміщення ГРП (РП) в точці, що відповідає мінімуму дисконтованих витрат порівняно з варіантом розміщення ГРП (РП) в центрі електричних навантажень.

### Визначення 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 на напрузі 10 кВ, то лінія зовнішнього живлення повинна бути виконана двома кабелями АСБ-185 із загальним 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 дисконтованих витрат залежно від місця розташування РП.

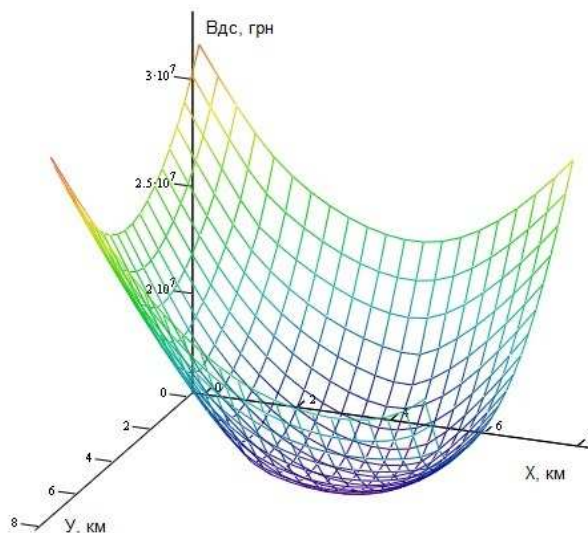


Рисунок 2 – Поверхня функції дисконтованих витрат для лінії 10 кВ

Визначимо місце оптимального розташування РП за мінімумом дисконтованих витрат

Таблиця 2 – Порівняльні показники варіантів живлення ГРП (РП)

Варіант розрахунку координат оптимального розташування ГРП (РП)	Розташування ГРП (РП) в ЦЕН	Розташування ГРП (РП) за умовою мінімуму дисконтованих витрат		
	$V_{дс}$ , млн. грн.	$x_0$ , км	$y_0$ , км	$V_{дс}$ , млн. грн.
Без врахування лінії зовнішнього живлення	7,858	3,104	3,438	7,827
Із врахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 10 кВ	17,78	4,118	4,922	15,85
Із врахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 35 кВ	10,93	3,446	3,93	10,61

$x_0 = 4,117$  км,  $y_0 = 4,922$  км. Дисконтовані витрати при цьому становлять 15,87 млн. грн.

Якщо ж розмістити РП в центрі електричних навантажень з координатами  $x'_0 = 2,921$  км,  $y'_0 = 3,224$  км, то дисконтовані витрати становитимуть 17,78 млн. грн.

Отже, неврахування лінії зовнішнього живлення призводить до неправильного визначення місця розташування РП, а дисконтовані витрати при розташуванні РП в ЦЕН зростають на 12% порівняно з оптимальним варіантом.

**Визначення оптимального розміщення ГРП з врахуванням лінії зовнішнього живлення напругою 35 кВ.**

Розглянемо варіант, коли лінія зовнішнього живлення має вищу номінальну напругу 35 кВ. При цьому для зовнішнього живлення виберемо повітряну лінію з проводом АС-120, для якого питомий опір  $r_0 = 0,25$  Ом/км і питома вартість  $K_0 = 300$  тис. грн/км.

На рис. 3 наведено поверхню значень функції дисконтованих витрат залежно від розташування ГРП.

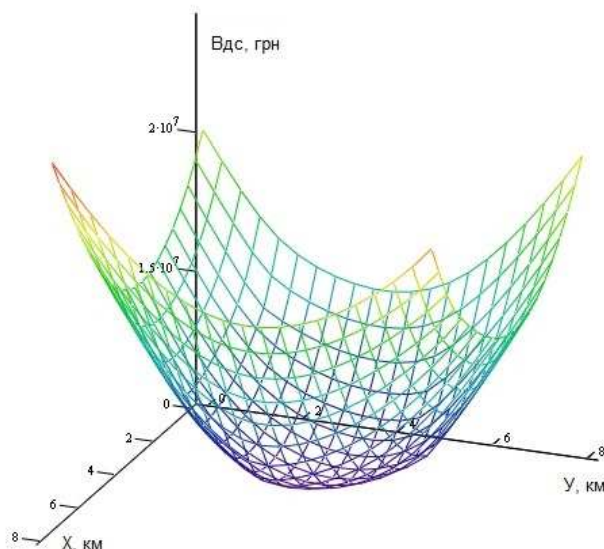


Рисунок 3 – Поверхня функції дисконтованих витрат для лінії 35 кВ

Визначимо координати ГРП за умовою мінімальних дисконтованих витрат  $x_0 = 3,446$  км,  $y_0 = 3,93$  км. Дисконтовані витрати становитимуть 10,61 млн. грн.

Якщо ж розташувати ГРП в центрі електричних навантажень, то дисконтовані витрати становитимуть 10,93 млн. грн.

В табл. 2 наведено результати розрахунку для різних варіантів живлення підстанцій розподільчої мережі.

Схеми оптимальних варіантів розподільчої мережі з врахуванням ліній зовнішнього живлення наведено на рис. 4. На цих рисунках показані лінії рівня функції дисконтованих витрат, що дає підстави зробити висновок про пологість функції в околі оптимального значення. Тому остаточне місце розташування ГРП (РП) можна зміщувати відносно оптимального з врахуванням технічних можливостей і заданих обмежень. При цьому за лініями рівня можна проаналізувати зміну величини дисконтованих витрат відносно оптимального значення.

Запропонована методика може бути використана також для вирішення інших задач, наприклад, для визначення місця розміщення районних знижувальних підстанцій, підстанцій глибокого вводу тощо.

**Висновки**

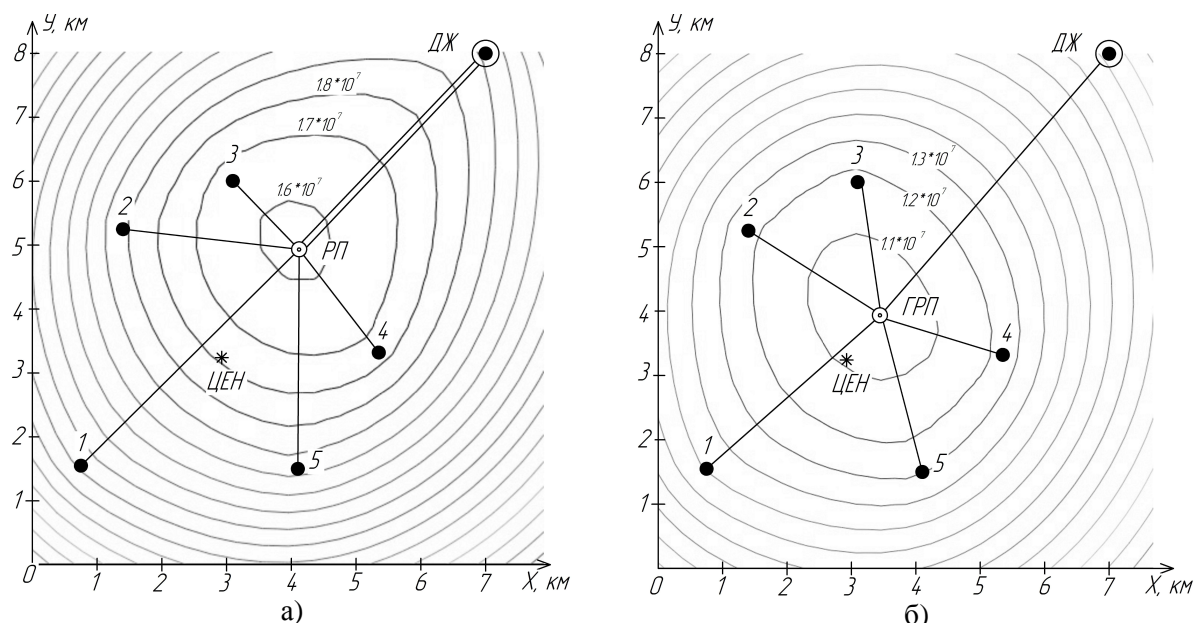
Основним критерієм ефективності капіталовкладень при визначенні місця оптимального розташування ГРП (РП) для споживачів електроенергії є дисконтовані витрати.

Місце розташування ГРП (РП) потрібно визначати з врахуванням лінії зовнішнього живлення.

За однакових номінальних напруг розподільчої мережі і лінії зовнішнього живлення оптимальним за умовою мінімальних дисконтованих витрат є розміщення РП в точці, значно зміщеній відносно ЦЕН в напрямку джерела живлення.

Якщо номінальна напруга лінії зовнішнього живлення вибрана вищою від номінальної напруги розподільчої мережі, то координати ГРП практично збігаються з центром електричних навантажень.

Оскільки цільова функція є пологою в околі оптимального розв'язку, то можливе розта-



а – живлення РП двоковою кабельною лінією 10 кВ;  
б – живлення ГРП повітряною лінією 35 кВ

**Рисунок 4 – Схеми оптимального розміщення ГРП (РП) з нанесеними лініями рівня дисконтованих витрат**

шування ГРП (РП) у межах лінії рівня з незначним зростанням величини дисконтованих витрат.

Вибір остаточної схеми живлення слід виконувати на підставі техніко-економічного порівняння варіантів з врахуванням всіх витрат на спорудження ліній і ГРП (РП).

### Література

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 // Электрические сети и системы. – 1972. – Вып. 11. – С. 138-141.

3 Романюк Ю.Ф. Электричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф.Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.

4 Рокотян С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / С.С. Рокотян, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

5 Суходоля О. М. Економічна оцінка ефективності інноваційних проєктів (енергозберігаючих заходів) / О.М.Суходоля // Електропанорама. – 2002. – № 5. – С. 37-40.

6 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»).

Стаття надійшла до редакційної колегії  
07.09.12

Рекомендована до друку професором  
Костишиним В.С.