

процесів у тиристорному збуднику БУТВ кар'єрних екскаваторів / В. І. Мороз // VII Республіканський семінар "Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии". – Алушта, 21–25 вер. 1992, опубл. у зб. наук. пр. Теорія та моделі пристроїв вимірювальної та перетворювальної техніки – Київ, Ін-т електродинаміки АН України, 1993. – С. 39–43. 11. Костинюк Л. Моделювання електроприводів : Навчальний посібник / Л. Костинюк, В. Мороз, Я. Паранчук. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 404 с.

УДК 621.316.176

А. О. Парфенюк, П. Ф. Гоголюк  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електропостачання промислових підприємств міст  
і сільського господарства

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ІЗ УРАХУВАННЯМ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

© Парфенюк А. О., Гоголюк П. Ф., 2015

Запропоновано метод визначення кількості, потужності та місць встановлення конденсаторних устав, що враховує режими електроприймачів і дає змогу формалізувати операції вибору типу й режиму компенсації реактивної потужності на стадії проектування електропостачальних систем.

*Ключові слова: компенсація реактивної потужності, генетичний алгоритм, електропостачальна система.*

The method to determine the number, capacity and location of power capacitors installations considering load profiles of power consumers is proposed. It made it possible to formalize procedures of selection of the type and mode of the reactive power compensation at the design stage of electric power distribution systems.

*Key words: reactive power compensation, genetic algorithm, electric power distribution system.*

### Вступ. Постановка проблеми

Проблема компенсації реактивної потужності (КРП) належить до найвідповідальніших завдань процесу проектування електропостачальних систем (ЕПС) промислових і цивільних об'єктів. Оптимальне вирішення проблеми КРП забезпечує досягнення високих техніко-економічних показників проекту.

Задача КРП на етапі проектування полягає в одночасному виконанні завдань пошуку кількості, потужності та місць встановлення компенсувальних устав (КУ) [1]. В ЕПС із істотно змінними графіками навантаження електроприймачів (ЕП) додатково необхідно вибирати тип (керована, некерована) та режим (індивідуальна, групова, централізована) компенсації КУ.

З одного боку, необхідно забезпечити якомога більше використання КУ. Так, за незмінного навантаження найвигіднішою буде індивідуальна компенсація, а у разі змінного режиму ЕП – групова чи централізована компенсація. З іншого боку, необхідно прагнути до повного розвантаження ЕПС від потоків реактивної потужності. Це можна забезпечити розташуванням КУ ближче до потужних ЕП. Водночас необхідно вибирати оптимальну кількість ступенів компенсації КУ й оцінювати можливість встановлення некерованих КУ для зменшення капітальних вкладень на їхнє впровадження.

Через багатокритеріальність ці задачі важко піддаються формалізації та зумовлюють неоптимальне розміщення й вибір типу КУ на стадії проектування. Це зумовлює неефективне використання КУ під час експлуатації, що зменшує економічний ефект від їхнього впровадження. Тому актуальним є розроблення методів визначення оптимальних місць встановлення КУ, що враховують режими окремих електроприймачів, які задаються графіками індивідуальних навантажень.

### Аналіз останніх досягнень та публікацій

Для розв'язання задачі оптимального вибору потужності і місць встановлення КУ найчастіше застосовуються евристичні методи [2], що використовують загальні принципи оптимізації КРП. Досконалішими є методи, що ґрунтуються на засадах нелінійного й квадратичного програмування [3]. Найефективнішими для розв'язання задач КРП є сучасні методи [4], що орієнтовані на пошук глобального оптимуму: інтелектуально-орієнтовані методи, імітація відпалу, еволюційні алгоритми. Вони поєднують характеристики детермінованих і статистичних алгоритмів та можуть забезпечити пошук квазіоптимальних варіантів за прийнятний час. Слід зазначити, що із використанням вищезгаданих методів, задачу вибору типу та розміщення КУ в ЕПС промислових об'єктів із змінним навантаженням ЕП не розглядали.

### Мета роботи

Створити метод і алгоритм оптимального вибору та розташування КУ в ЕПС промислових об'єктів, що враховує режими електроприймачів для підвищення ефективності функціонування інтелектуальних автоматизованих систем проектування (АСП) електропостачальних систем.

### Виклад основного матеріалу

Під час розв'язання задач компенсації реактивної потужності критерієм оптимальності є забезпечення максимального економічного ефекту. Відтак значенню цільової функції повинні відповідати дисконтовані витрати на впровадження засобів КРП в електропостачальну систему об'єкта проектування:

$$B_{\partial} = \sum_{i=1}^m K_{ку,i} \left(1 + \frac{a_e}{E_{\partial}}\right) + \frac{\Delta W_{ВТР} \cdot c_o}{E_{\partial}}, \quad (1)$$

де  $K_{ку,i}$  – вартість встановлення  $i$ -ї КУ;  $a_e$  – норма експлуатаційних відрахувань КУ;  $\Delta W_{ВТР}$  – втрати електроенергії в мережі;  $E_{\partial}$  – норма дисконту;  $c_o$  – тариф електроенергії.

З урахуванням того, що електропостачальні системи, зазвичай, є розімкненими (рис. 1, а), заступну схему для вибору КУ можна зобразити в такому вигляді (рис 1, б):

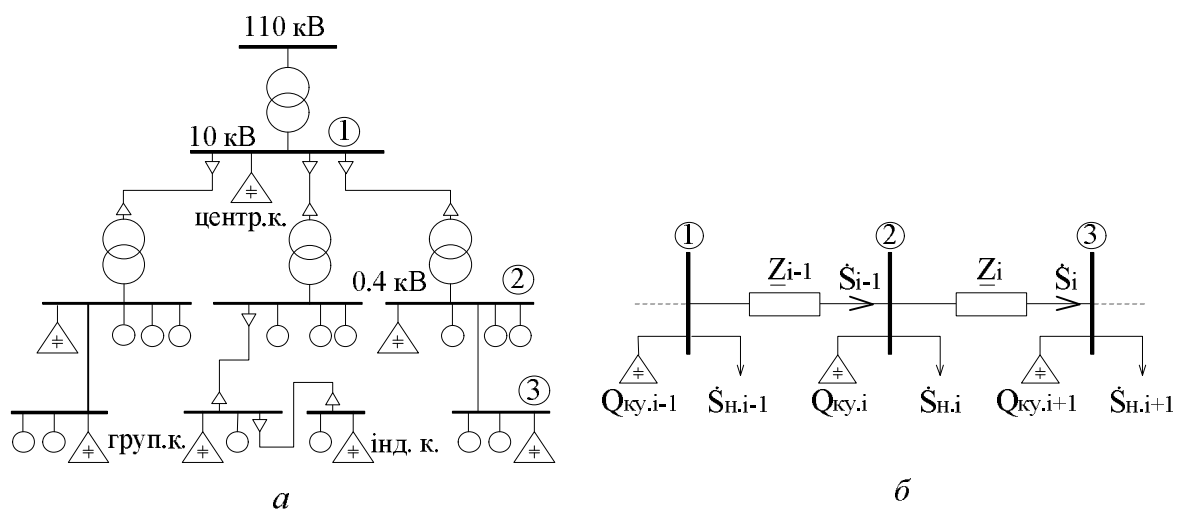


Рис 1. Розрахункова схема ЕПС промислового підприємства:  
а – однолінійна принципова схема; б – заступна схема ЕПС

Сумарну потужність втрат у ЕПС можна обчислити так:

$$W_{BTP} = \sum_{i=1}^n \int_0^T R_i \cdot \left( \frac{S_i(t)}{U_i(t)} \right)^2 dt, \quad (2)$$

де  $S_i(t)$  – повна потужність кінця  $i$ -ї вітки;  $U_i(t)$  – напруга на шинах кінця  $i$ -ї вітки,  $R_i$  – резистивний опір  $i$ -ї вітки,  $n$  – кількість віток.

Потужність кінця  $i$ -ї вітки мережі можна записати як:

$$\mathcal{S}_i^{(k)}(t) = \mathcal{S}_{i-1}^{(k)}(t) - \mathcal{S}_{n,i-1}^{(k)}(t) + jQ_{ку,i-1}(t) - \frac{\mathcal{U}_i^{(k)} * \mathcal{U}_i^{(k)}}{\underline{z}_i} U_i(t), \quad (3)$$

де  $\mathcal{S}_{n,i-1}^{(k)}(t)$  – навантаження на  $(i-1)$ -ту шину ЕПС,  $\mathcal{S}_{i-1}^{(k)}(t)$  – потужність кінця  $(i-1)$ -ї вітки,  $Q_{ку,i-1}(t)$  – потужність КУ на шинах кінця  $(i-1)$ -ї вітки,  $\underline{z}_i$  – повний опір  $i$ -ї вітки.  $k$  – номер ітерації.

Навантаження на  $i$ -ту шину ЕПС визначатиметься із такого виразу:

$$\mathcal{S}_{n,i}^{(k)}(t) = P_{n,i}^{(k)}(t) + jQ_{n,i}^{(k)}(t) = \sum_{j=1}^{b_i} \mathcal{S}_{en,ij}^{(k)}(t) + \sum_{j=1}^{m_i} \mathcal{S}_{ij}^{(k)}(t), \quad (4)$$

де  $b_i$  – кількість ЕП, що безпосередньо одержують живлення від  $i$ -ї шини,  $m_i$  – кількість відхідних ліній електропередавання  $i$ -ї шини до іншої шини ЕПС,  $\mathcal{S}_{en,ij}^{(k)}$  – потужність  $j$ -го ЕП  $i$ -ї шини,  $\mathcal{S}_{ij}^{(k)}$  – потужність  $j$ -ї відхідної лінії електропередавань  $i$ -ї шини.

Уточнене значення напруг обчислюється так:

$$\mathcal{U}_i^{(k)} = \begin{cases} U_n, & \text{якщо } k = 0; \\ \mathcal{U}_{i-1}^{(k)} - \underline{z}_i \frac{\mathcal{S}_i^{(k)}}{\mathcal{U}_i^{(k-1)}}, & \text{якщо } k \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Кількість ітерацій визначається необхідною точністю і, зазвичай, не перевищує десяти:

$$\forall i \in [1..n], (\mathcal{U}_{i-1}^{(k)} - \mathcal{U}_{i-1}^{(k-1)})^2 < \epsilon. \quad (6)$$

З метою отримання економічного режиму ЕПС зі змінним графіком реактивного навантаження використовують автоматичне керування потужністю КУ за допомогою вмикання чи вимикання її загалом або окремих частин:

$$|Q_{n,i}(t) - Q_{ку,i}(t)| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Вважаємо, що задана множина можливих КУ до встановлення:  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  з відомими номінальними потужностями:  $Q_{ку}^{\max} = \{Q_{ку,1}^{\max}, Q_{ку,2}^{\max}, \dots, Q_{ку,m}^{\max}\}$ , вартістю встановлення  $K_{ку} = \{K_{ку,1}, K_{ку,2}, \dots, K_{ку,m}\}$  і доступною кількістю ступенів регулювання  $n_{ку,i} = \{n_{ку,1}, n_{ку,2}, \dots, n_{ку,m}\} \in \{0, 1, \dots, 8\}$ .

Приймаємо, що керування КУ здійснюється за значенням коефіцієнта реактивної потужності. Тоді функцію регулятора компенсації реактивної потужності КУ із заданою потужністю секції КУ  $\Delta Q_{ку,c,i} = \frac{Q_{ку,i}^{\max}}{n_{ку,i}}$  можна записати в такому вигляді:

$$Q_{ку,i}(t) = f(Q_{n,i}(t)) = \begin{cases} \text{round}(Q_{n,i}(t) / \Delta Q_{ку,c,i}) \cdot \Delta Q_{ку,c,i}, & Q_{ку,i}^{\max} < Q_{n,i}(t) < 0; \\ Q_{ку,i}^{\max}, & Q_{ку,i}^{\max} < Q_{n,i}(t); \\ 0, & Q_{n,i}(t) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

На рис. 2 наведений варіант принципової схеми (рис. 2, а) автоматичного керування реактивною потужністю для вузла ЕПС зі встановленою КУ, що містить три ступені регулювання.

Ефект від роботи такої устави наочно можна зобразити на графіку реактивної потужності вузла ЕПС (рис. 2, б). На рисунку бачимо, що дійсне значення реактивної потужності визначається не площею графіка, а рівнями недокомпенсації чи перекомпенсації реактивної потужності за допомогою КУ (заштрихована ділянка).

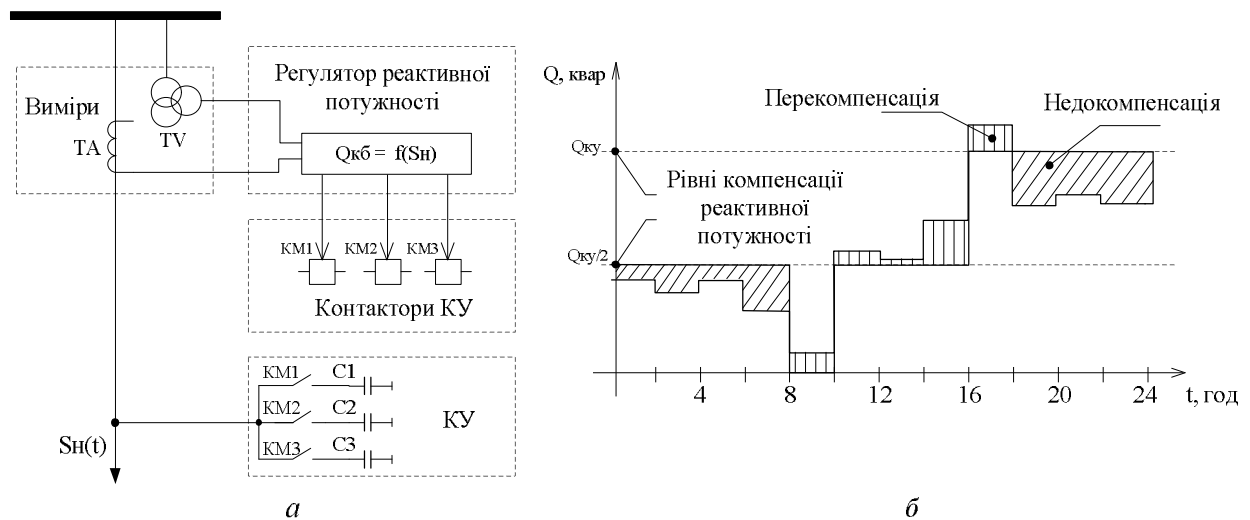


Рис. 2. Автоматичне регулювання реактивної потужності для вузла навантаження: а – принципова схема; б – ефект роботи регулятора реактивної потужності на графіку навантаження вузла ЕПС

Окрім мінімізації втрат електроенергії ЕПС також необхідно дотримуватися режимних обмежень. Зокрема рівні наруг на шинах повинні перебувати в допустимих межах, а сумарна потужність КУ має забезпечувати бажаний коефіцієнт реактивної потужності в точці балансового розмежування:

$$\forall i \in [1 \dots n], 0.95 \leq \frac{U_i}{U_{ном}} \leq 1.05; \sum_{i=1}^n Q_i = tgj \cdot P_{\Sigma}. \quad (9)$$

Для оптимізації цільової функції дискретних змінних (1) із дотриманням обмежень (9) застосований генетичний алгоритм (ГА). Зазначимо, що ГА використовувався в [5], але в задачі пошуку оптимальних місць встановлення КУ без врахування режимів електроприймачів.

Для забезпечення його функціонування необхідно здійснити кодування варіантів вибору типів і місць розміщення КУ в електропостачальній системі та реалізувати генетичні оператори селекції, схрещування й мутації. Загальна схема функціонування ГА показана на рис 3.

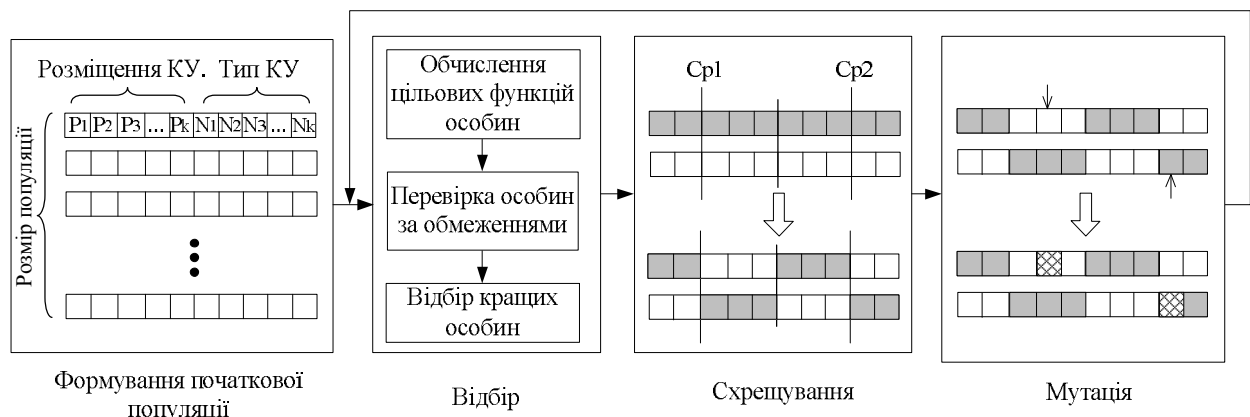


Рис. 3. Схема функціонування генетичного алгоритму для вибору типу й місць встановлення КУ в ЕПС

Кодують варіант КРП на підставі послідовності генів (хромосом), що описують тип (потужність і кількість секцій) і розміщення КУ (номер шини ЕПС).

Відбирають особини на основі моделювання режимів компенсації реактивної потужності з вибраними до встановлення КУ явним інтегруванням дискретної функції (2). Кращим особинам відповідають менші значення дисконтованих витрат (1), для яких виконується обмеження (9).

Операція схрещування реалізується за допомогою триточкового кросинговеру, а мутації – випадковою заміною значення гена в хромосомах особин із напередзаданим значенням коефіцієнта ймовірності.

Мовою С++ була здійснена програмна реалізація наведеного методу оптимізації КРП. На рис 3, а зображений приклад структури ЕПС, для якої здійснювався пошук оптимального варіанта вибору та встановлення КУ для різномісних режимів ЕПС (рис. 3, в). На рис. 3, б зображена структура хромосоми, що відповідає результату оптимізації.

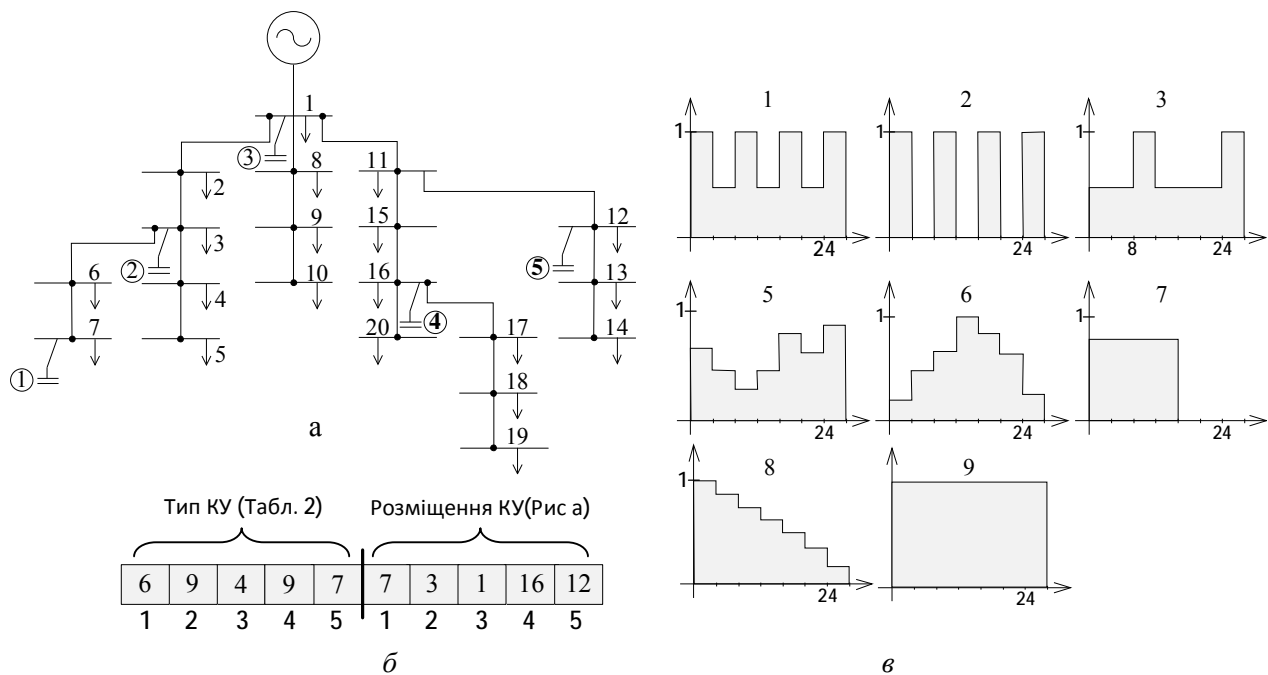


Рис 3. Приклад застосування алгоритму вибору КРП:

а – структура електропостачальної системи; б – структура хромосоми, що кодує вибір і варіант розміщення КУ; в – типові графіки електричних навантажень, що використовувались для моделювання режимів ЕП

Параметри віток ЕПС і режими електроприймачів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри навантажень і ЕПС (опори віток)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_m$ , кВт	350	100	40	100	40	300	250	125	45	75	20	245	170	20	100	30	40	80	120	15
$Q_m$ , квар	8	24	30	50	35	260	210	100	35	50	17	200	130	10	75	15	20	60	80	10
№ граф	2	1	3	4	5	7	6	8	2	1	3	4	5	7	6	8	2	1	3	4
$R_{(i,i-1)}$ , Ом	1,3	0,4	0,5	1,2	1,8	0,4	0,4	0,6	0,5	0,7	0,8	1,2	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,2	0,2	0,1
$X_{(i,i-1)}$ , Ом	3	1,2	1,4	3,5	4,5	1,2	1,2	1,5	1,3	2,0	2,5	3,7	0,9	1,6	2,1	1	1,3	0,5	0,6	0,2

Параметри множини КУ, з яких вибирали, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

### Параметри конденсаторних устав

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$Q_{ку}$ , квар	10	25	50	100	100	100	150	200	200	200	300	300	300	300	300
$n_{ку}$ , шт	0	0	1	0	2	4	4	1	2	3	0	1	2	3	4
$K_{ку}$ , тис у.о	5	8	12	20	22	25	32	28	32	36	32	35	36	38	43

Результати програмної реалізації запропонованого методу для різних конфігурацій структури ЕПС підтвердили ефективність його використання. Встановлена висока якість прийнятих проектних вирішень під час вибору потужності, кількості секцій і місць встановлення КУ залежно від потужності та режиму окремих ЕП.

Зазначимо, що в цьому разі була виконано не комплексне, а вужче завдання КРП, яке можна застосовувати в ЕПС із складною структурою й одним ступенем напруги. Однак воно доповнює загальне завдання КРП і може бути здійснене після визначення структури компенсації реактивної потужності: співвідношення потужностей батарей вищої та нижчої напруг і синхронних двигунів у мірі компенсації РП.

### Висновки

Із використанням генетичного алгоритму розроблено метод оптимізації компенсації реактивної потужності в електропостачальних системах промислових об'єктів, що містять електроприймачі зі змінним навантаженням. Особливістю методу є те, що математична модель розрахунку втрат електричної енергії враховує дію регуляторів реактивної потужності, за заданих графіків електричних навантажень електроприймачів і параметрів компенсувальних устав. Це дозволяє неявно враховувати міру використання устав під час експлуатації та формалізувати операції вибору режиму й типу компенсації реактивної потужності. Застосування методу забезпечує визначення для кожної компенсувальної устави потужності, кількості секцій регулювання та місця встановлення в електропостачальній системі.

1. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 200 с. 2. Оптимальная компенсация реактивной мощности в системах распределения электрической энергии: Монография / А. А. Герасименко, В. Б. Нешатаев. – М.: Проспект, 2015. – 219 с. 3. Ефременко В. М., Беляевский Р. В. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2012. – № 6. – С. 138–141. 4. Zhang W. Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms / W. Zhang, L. M. Tolbert, Fangxing Li // IEEE Trans. Power Syst. – 2007. – Vol. 3, No. 4. – P. 2177–2186. 5. Pires D.F. NSGA-II with local search for a multi-objective reactive power compensation problem / D. F. Pires, C. H. Antunes, A. G. Martins // IEEE Trans. Power Syst. – 2012. – Vol. 43, No. 1. – P. 313–324.