

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИБОРУ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА УМОВИ МІНІМАЛЬНИХ ЗВЕДЕНИХ ВИТРАТ

*Розроблено метод оптимального вибору варіанта розподілу потужності пристроїв компенсації реактивної потужності за умови мінімальних зведених витрат, який дозволяє знизити втрати електроенергії у трансформаторах комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) і розподільній внутрішньозаводській мережі електропостачання, а також забезпечує вибір оптимальної кількості і номінальної потужності трансформаторів КТП.*

**Ключові слова:** компенсація реактивної потужності, синхронний двигун, конденсаторна батарея, мінімальні зведені витрати, алгоритм, оптимізація.

Компенсація реактивної потужності є одним з найефективніших енергозберігаючих заходів, який дозволяє знизити втрати активної електроенергії при її передаванні, розподілу та перетворюванні у трансформаторах мережі електропостачання промислових підприємств за рахунок зниження величини реактивної потужності, що передається через елементи електричної мережі.

Встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності в мережах промислових підприємств стимулюється енергопостачальною організацією шляхом визначення оптимального коефіцієнта реактивної потужності ( $\text{tg}\varphi_{\text{опт}}$ ) в режимі максимального навантаження, який встановлюється в договорі на постачання електроенергії між енергосистемою та підприємством. У разі перевищення заданого коефіцієнта реактивної потужності в режимі максимальних навантажень збільшується величина тарифної ставки оплати електроенергії на величину пропорційну перевищенню заданого коефіцієнта реактивної потужності.

Загальна потужність пристроїв компенсації реактивної потужності  $Q_{\text{КУ}}$  визначається на основі забезпечення балансу реактивної потужності на границі балансової належності: енергопостачальна організація – підприємство, за умови забезпечення заданого коефіцієнта реактивної потужності в режимі максимального навантаження.

Для компенсації реактивної потужності у мережах підприємства найбільш ефективним є використання конденсаторних батарей (КБ) і синхронних двигунів (СД), які генерують реактивну потужність у режимі перезбудження. Конденсаторні батареї застосовують у мережах з напругою  $<1000$  В (низьковольтні конденсаторні установки (НКУ)) і у мережах з напругою  $>1000$  В (високовольтні конденсаторні установки (ВКУ)). Використання НКУ або ВКУ визначається контрольними умовами мережі електропостачання підприємства із метою найбільш ефективною компенсації реактивної потужності. При цьому перевагою ВКУ є менша питома вартість і менші питомі втрати електроенергії на генерацію реактивної потужності, а застосування НКУ дозволяє знизити втрати елек-

троенергії у трансформаторах КТП і розподільній мережі внутрішньозаводського електропостачання.

Можливість використання СД як джерела реактивної потужності обумовлюється коефіцієнтом завантаження за активною потужністю, в залежності від якого визначається величина реактивної потужності, яку можуть генерувати СД за умовами забезпечення динамічної стійкості. Незважаючи на те, що питомі втрати на одиницю генеруємої реактивної потужності у СД значно більше, ніж у конденсаторних батареях, якщо за умови технології на виробництві встановлені синхронні двигуни з коефіцієнтом завантаження, який допускає генерацію реактивної потужності, то для компенсації реактивної потужності рекомендуються синхронні двигуни [1].

Таким чином, при виборі пристроїв компенсації реактивної потужності визначається найбільш ефективний варіант розподілу сумарної потужності компенсуючих пристроїв, визначеною за умовами забезпечення балансу реактивної потужності на границі балансової належності, за видами джерел реактивної потужності (НКУ, ВКУ і СД). Ця задача ускладнюється, оскільки на ефективний вибір розподілу пристроїв компенсації реактивної потужності впливають багато інших чинників, які визначають ефективність системи електропостачання промислового підприємства (витрати на компенсаційні пристрої, на трансформатори КТП, кабельні лінії 6–10 кВ, втрати електроенергії в елементах мережі електропостачання, витрати на генерацію реактивної потужності і т. д.). Комплексне врахування усіх параметрів, які впливають на ефективність вибору варіанта компенсації реактивної потужності, є досить складним, оскільки зміна одного параметра, наприклад потужності НКУ, докорінним чином змінює інші параметри (капітальні втрати на НКУ і трансформатори КТП, втрати активної електроенергії у трансформаторах і елементах розподільної мережі) і, таким чином, визначення оптимального варіанта є трудомісткою задачею, пов'язаною з розрахунком достатньо великої кількості варіантів.

Розроблені різні підходи до вирішення задачі вибору виду, потужності і місця розміщення пристроїв компенсації реактивної потужності, які можна розділити за видом цільової функції, що потребує оптимізації.

Найбільше застосування знайшли такі методи визначення оптимального розподілу пристроїв компенсації реактивної потужності, як метод кусково-безперервної функції оптимальних зведених витрат [2] і метод визначення компенсації реактивної потужності за умови забезпечення пропускної здатності трансформаторів КТП за реактивною потужністю при забезпеченні оптимального коефіцієнта завантаження трансформаторів КТП. Суть першого метода полягає у розрахунку цільової функції оптимальних зведених витрат, яка визначається в залежності від вихідних даних системи електропостачання і характеристик пристроїв НКУ і ВКУ, визначених у вигляді відповідних критеріальних коефіцієнтів. Другий метод полягає у тому що, вибір НКУ для  $i$ -тої КТП здійснюється у вигляді двох складових. Основна частина обирається за умовою забезпечення оптимального коефіцієнта завантаження трансформатора у режимі максимального навантаження. Додаткова частина НКУ, яка визначається за умови забезпечення мінімальних витрат [3].

Визначення розподілу компенсації реактивної потужності за вищенаведеними методами має певні недоліки. В першому методі не враховуються втрати електроенергії у трансформаторах КТП і визначення оптимальних зведених витрат здійснюється з певними припущеннями.

У другому методі важко формалізувати процес визначення коефіцієнта  $\gamma$ , який визначає доцільність установки додаткових НКУ за умовами мінімальних зведених витрат. Тому для вибору оптимального варіанта розподілу потужності пристроїв компенсації доцільно розробити метод, який дозволяє формалізувати вибір оптимального варіанта розподілу пристроїв, які використовуються для компенсації реактивної потужності.

Тому, у статті представлено метод вибору оптимального варіанта розподілу КРП за умовою мінімальних зведених витрат. Розглянемо суть запропонованого метода.

Вибір пристроїв КРП проводиться в такій послідовності:

- для кожної КТП визначається оптимальний коефіцієнт завантаження;
- визначається потужність НКУ за умовою забезпечення пропускної здатності трансформатора за реактивною потужністю;
- визначається різниця приведених витрат для варіантів з використанням і без використання КБ на стороні НН трансформатора.

Алгоритм вибору компенсуючих пристроїв наведено на рис. 1.

Різниця в показниках характеристик НКУ і ВКУ визначається за допомогою відносних диференційних показників

$$\Delta K_{KV}^* = K_{NKU}^* - K_{VKU}^*, \quad \Delta C_{OKU} = C_{ONKU} - C_{OVKU}, \quad (1)$$

де  $K_{HKU}^*, K_{VKU}^*$  – питома вартість пристроїв НКУ і ВКУ відповідно, тис.грн./кВАр;  $C_{ONKU}, C_{OVKU}$  – питомі втрати потужності у пристроях НКУ і ВКУ відповідно, кВт/кВАр.

Розрахунок проводиться окремо для  $i$ -того вузла (КТП). Визначаються зведені втрати холостого ходу і короткого замикання трансформатора  $i$ -тої КТП, які враховують втрати активної потужності в елементах мережі від джерела живлення до трансформатора, обумовлені передаванням додаткової реактивної потужності, яка дорівнює втратам реактивної потужності у трансформаторі [2]

$$\begin{aligned} \Delta P_{Xi} &= \Delta P_X + \alpha \cdot \frac{I_X \cdot S_{НОМТ}}{100}, \\ \Delta P_{Ki} &= \Delta P_K + \alpha \cdot \frac{U_K \cdot S_{НОМТ}}{100}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\Delta P_{Xi}, \Delta P_{Ki}$  – втрати потужності холостого ходу і короткого замикання відповідно, кВт;  $I_X, U_K$  – струм холостого ходу і напруга короткого замикання відповідно, %;  $\alpha$  – еквівалент реактивної потужності, який визначається в залежності від віддаленості трансформатора від джерела живлення і задається у вихідних даних для розрахунку, кВт/кВАр;  $S_{НОМТ}$  – номінальна потужність трансформатора  $i$ -тої КТП, кВА.

За умовами мінімальних витрат електроенергії у трансформаторі визначається оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора

$$K_{3i}^{**} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Xi}}{\Delta P_K} \cdot \frac{8760}{\tau_M}}, \quad (3)$$

де  $\tau_M$  – число годин максимальних витрат, яке визначається в залежності від числа годин використання максимального навантаження  $T_M$ , год/рік.

$$\tau_M = \left( 0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot 8760. \quad (4)$$

Визначається розрахункова потужність пристроїв  $Q_{НКУрозрi}$

$$Q_{НКУрозрi} = Q_{розрi} + \Delta Q_{Ti} - Q_{Ti}, \quad (5)$$

де  $Q_{розрi}$  – розрахункова реактивна потужність  $i$ -тої КТП, кВАр;  $\Delta Q_{Ti}$  – втрати реактивної потужності у трансформаторі  $i$ -тої КТП, кВАр;  $Q_{Ti}$  – пропускна здатність трансформатора за реактивною потужністю, при забезпеченні оптимального коефіцієнта завантаження, кВАр, яка розраховується за формулою

$$\Delta Q_{Ti} = n_{Ti} \cdot \left( \frac{I_X \cdot S_{НОМТ}}{100} + (K_3^{**})^2 \frac{U_K \cdot S_{НОМ}}{100} \right), \quad (6)$$

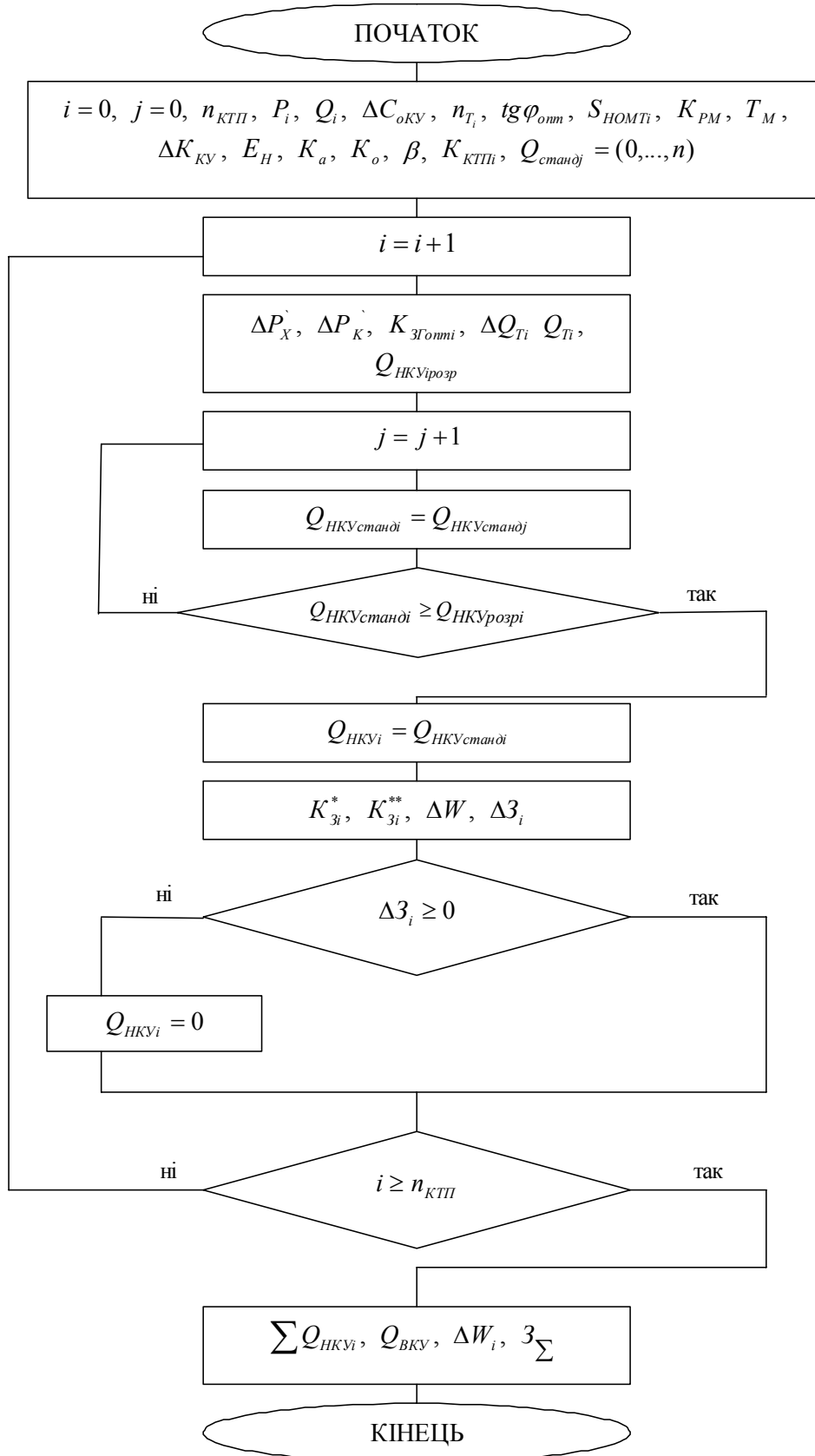


Рис. 1. Алгоритм вибору компенсуючих пристроїв: де  $K_{рм}$  – коефіцієнт різночасності максимумів навантаження;  $tg\varphi_{опт}$  – оптимальний коефіцієнт реактивної потужності, який задається енергопостачальною організацією;  $n_{КТП}$  – кількість КТП

$$Q_{Ti} = \sqrt{(n_T \cdot S_{НОМТi} \cdot K_3^{**})^2 - P_{розрi}^2}, \quad (7)$$

де  $n_{Ti}$  – число трансформаторів  $i$ -тої КТП;  $S_{НОМТi}$  – номінальна потужність трансформатора  $i$ -тої КТП, кВА;  $P_{розрi}, Q_{розрi}$  – розрахункові активна і реактивна потужність для  $i$ -тої КТП відповідно, кВт і кВАр.

Згідно визначеному за формулою (5) значенню  $Q_{НКУстанд} \geq Q_{НКУрозр}$  визначається доцільність встановлення компенсуючих пристроїв на боці нижчої напруги (НН) трансформатора з використанням диференційного коефіцієнта завантаження, який визначається за формулою:

$$\Delta K_{3i} = (K_{3i}^*)^2 - (K_{3i}^{**})^2, \quad (8)$$

де  $K_{3i}^*, K_{3i}^{**}$  – коефіцієнти завантаження трансформатора для умов без компенсації і з компенсацією реактивної потужності на боці НН трансформатора відповідно.

Коефіцієнт завантаження трансформатора ( $K_3^*$ ) визначається за формулою

$$K_3^* = \frac{S_{Pi}^*}{n_T \cdot S_{НОМТi}}, \quad (9)$$

де  $S_{Pi}^*$  – розрахункова повна потужність КТП за умови відсутності пристроїв НКУ, кВА:

$$S_{Pi}^* = \sqrt{P_{розрi}^2 + (Q_{розрi} + \Delta Q_{Ti})^2}, \quad (10)$$

Для  $i$ -того вузла визначається різниця у втратах електроенергії для варіантів без компенсації і з компенсацією реактивної потужності, МВт · год

$$\Delta W = (n_T \cdot \Delta K_{3i} \cdot \Delta P_{Ki}' \cdot \tau_m - \Delta C_{оКУ} \cdot Q_{НКУ} \cdot T_M) \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

де  $T_M$  – число годин використання максимального навантаження.

Далі визначаються диференційні зведені витрати, тис. грн.

$$\Delta Z = \left( E_H + \frac{K_a + K_o}{100} \right) \cdot \Delta K_{КУ}^* \cdot Q_{НКУ} - \Delta W \cdot \beta, \quad (12)$$

де  $E_H$  – коефіцієнт ефективності капіталовкладень;  $K_a, K_o$  – нормативні коефіцієнти відрахувань на амортизацію і обслуговування, %;  $\beta$  – вартість активної електроенергії, грн/кВтгод.

Якщо  $\Delta Z \leq 0$ , то установка НКУ на  $i$ -ому вузлі є недоцільною.

Потужність пристроїв у ВКУ визначається за формулою, кВАр

$$Q_{ВКУ} = Q_{КУ} - \sum Q_{НКУi}, \quad (13)$$

Для варіанта визначаємо сумарні зведені витрати, тис.грн.

$$Z_{\Sigma} = \left( E_H + \frac{K_a + K_o}{100} \right) \times \\ \times (\sum K_{КТПi} + C_{оНКУ} \cdot \sum Q_{НКУi} + C_{оВКУ} \cdot Q_{ВКУ}) + \\ + [(\sum (n_{Ti} \cdot \Delta P_{Xi}') \cdot 8760 + \sum (K_{3i}^2 \cdot \Delta P_{Ki}') \cdot \tau_m) \cdot 10^{-3} + \\ + (C_{оННК} \cdot \sum Q_{НКУi} + C_{оВКУ} \cdot Q_{ВКУ}) \cdot T_M \cdot 10^{-3}] \cdot \beta. \quad (14)$$

Вибір пристроїв компенсації реактивної потужності розглянемо на прикладі системи електропостачання машинобудівного заводу (вихідні дані наведені у табл. 1).

Техніко-економічні показники системи електропостачання машинобудівного заводу при використанні запропонованого метода вибору компенсуючих пристроїв (варіант 1) в порівнянні з варіантом вибору пристроїв компенсації за умов забезпечення пропускної здатності трансформаторів КТП (варіант 2) наведені в табл. 2.

Економічний ефект при використанні запропонованого метода (варіант 1) у порівнянні з відомим методом визначення розподілу компенсуючих пристроїв (варіант 2) становить 152,7 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

Як видно з табл. 2 варіант з вибором пристроїв компенсації реактивної потужності за методом мінімальних зведених витрат забезпечує значний економічний ефект.

Змінюючи у варіантах вихідні дані (число і потужність трансформаторів КТП, вартість електроенергії і так далі) можливо визначення оптимального варіанта вибору і розподілу компенсуючих пристроїв, що відповідає вимозі  $Z_{\Sigma} = Z_{\min}$ .

Запропонований метод вибору компенсуючих пристроїв дозволяє:

- визначити оптимальний варіант розподілу компенсації реактивної потужності на стороні НН і ВН трансформаторів КТП;
- визначити оптимальне число і номінальну потужність трансформаторів;
- визначити економічну ефективність від впровадження компенсації реактивної потужності;
- формалізувати розрахунок компенсації реактивної потужності в комплексі з вибором інших елементів електричної мережі.

Даний метод може бути використаний як на стадії проектування електропостачання, так і при оцінюванні ефективності електропостачання підприємства, яке знаходиться в експлуатації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Железко Ю. С. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.

Таблиця 1. Вихідні дані для вибору компенсуючих пристроїв в системі електропостачання машинобудівного заводу

№ КТП	Найменування цеху	$P_{розр}$ , кВт	$Q_{розр}$ , кВАр	Марка і переріз КЛ, $\frac{F(\text{мм}^2)}{I(\text{м})}$
КТП1	Термічний цех	3218,3	1790,6	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 150}{40}$
КТП2	Механічний цех	612,3	639,1	$\frac{ААШ\text{в}3 \cdot 35}{250}$
КТП3	Механоскладальний цех	714,2	810,3	$\frac{ААШ\text{в}3 \cdot 35}{150}$
КТП4	Інструментальний цех	845,1	875,2	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 35}{180}$
КТП5	Насосна станція	292,1	212,3	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 35}{180}$
КТП6	Ковальська-пресовий цех	1218,5	1132,1	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 50}{200}$
КТП7	Ливарний цех	1321,2	1076,2	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 50}{130}$
	Печі ЕШП 2 · 2500кВт	4000	2276	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 120}{130}$
	СД насосної станції 2 · 400кВт	640,9	260,9	$\frac{2 \cdot ААШ\text{в}3 \cdot 3}{200}$
	Сумарне розрахункове навантаження заводу	$\Sigma P = 12861,7$ кВт	$\Sigma Q = 8868,8$ кВАр	

Таблиця 2. Техніко-економічні показники варіантів вибору пристроїв компенсації реактивної потужності

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Варіант 1	Варіант 2
Сумарна реактивна потужність КУ	кВАр	кВАр	6050	6050
Реактивна потужність пристроїв НКУ	кВАр	кВАр	5150	2450
Реактивна потужність пристроїв ВКУ	кВАр	кВАр	900	3600
Капітальні витрати	К	тис. грн.	902,4	987,5
Втрати електроенергії	$\Delta W$	МВт год	539,4	656,3
Експлуатаційні витрати	И	тис. грн.	705,1	847,6
Зведені витрати	З	тис. грн.	813,4	966,1

- Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1 Электроснабжение / Под. общ. ред. А. А. Федорова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 586 с.
- Демов О. Д. Управление мощностью компенсируемых установок в электрических сетях промышленных

предприятий с учетом новых экономических условий / О. Д. Демов, Хинди Айман Тахер, С. М. Мельничук // Вісн. Вінниц. Політехн. Ін.-ту. – 2001. – № 6. – С. 98–101.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2013.  
Після доробки 25.01.2013.

Попов В. В.<sup>1</sup>, Комаричина Д. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина

<sup>2</sup>Магистрантка, Запорожский национальный технический университет, Украина

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО УСЛОВИЮ МИНИМАЛЬНЫХ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ**

*Разработан алгоритм оптимального выбора варианта распределения мощности устройств компенсации реактивной мощности по условию минимальных приведенных затрат, который позволяет снизить потери электроэнергии в трансформаторах КТП и распределительной внутризаводской сети электроснабжения, а также обеспечивает выбор оптимального количества и номинальной мощности трансформаторов КТП.*

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, синхронный двигатель, конденсаторная батарея, минимальные приведенные затраты, алгоритм, оптимизация.

Popov V. V.<sup>1</sup>, Komarichina D. I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Associate Professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

<sup>2</sup>Undergraduate, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

#### **DEVELOPMENT OF OF REACTIVE POWER COMPENSATION SELECTION BY THE TERMS OF MINIMUM REDUCED COSTS**

*Reactive power compensation (RPC) is one of the most effective energy saving measures that can reduce active power losses during its transmission. Determination of the reactive power compensation distribution for the existing methods has certain disadvantages. Therefore, the method of selection of the optimal way to allocate the RPC by the minimum reduced cost is proposed. The algorithm choice allows compensating devices:*

*– to determine the best way to allocate the RPC on the low voltage (LV) side and high voltage (HV) transformer complete transformer substations;*

*– to determine the optimal number and nominal power transformers;*

*– to determine the cost-effectiveness of the introduction of reactive power compensation;*

*– to formalize the calculation of RPC in combination with a selection of other items mains.*

*This method can be used as a power supply designing step, and evaluation of the effectiveness of power supply company which is operating.*

**Keywords:** reactive power compensation, synchronous motor, capacitor bank, minimum discounted costs, algorithm, optimization.

#### **REFERENCES**

1. Zhelezko Yu. S. Kompensaciya reaktivnoj moshhnosti i povыshenie kachestva e'lektroe'nergii. Moscow, E'nergoatomizdat, 1985, 224 p.
2. Spravochnik po e'lektrosnabzheniyu i e'lektrooborudovaniyu. Ed. By A. A. Fedorova. Moscow, E'nergoatomizdat, 1986, 568 p.
3. Demov O. D. Upravlinnya potuzhnistyu kompensoval'nykh ustanovok v elektrychnykh merzhakh promyslovyzh pidpriemstv, *Visn. Vinnyts. Politekhn.*, 2001, No. 6, pp. 98–101.