

COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL AND CIVIL FACILITIES

S. Baluta, V. Jovbak, L. Kopilova, Iu. Kuievda

National University of Food Technologies

Key words:

Coefficient of reactive power
Compensation of reactive power
Electrical supply of industrial and civil objects
Optimization methods
Algorithm of rotation of particles with adaptation

Article history:

Received 05.07.2021
Received in revised form 19.07.2021
Accepted 02.08.2021

Corresponding author:

S. Baluta

E-mail:

epem2011@ukr.net

ABSTRACT

Compensation of reactive power in electrical systems of industrial and civil facilities is an up-to-date problem, since it allows to reduce the consumption and loss of electric energy, provide normalized values of voltage levels in consumers, reduce expenditures on electrical equipment of electricity supply.

The article presents the results of the study of energy efficiency of the regimes of electrical safety of industrial and civil facilities at different degrees of depth of compensation of reactive power at the level of electrical receivers. In order to obtain the maximum economic effect of the CRP, a single-criticism of optimization is solved — minimizing financial expenses for payment of electricity losses and installation of CRP devices. This statement of the problem provides interaction between the “model of the electricity supply system” and used by the “optimization method”. In this case, the proposed approach allows to use different optimization methods, since changes in the electrical circuit do not lead to need to change anything in the implementation of the optimization method. So, there is a lack of close relationship between the problem of optimization and the method of its decision, the flexibility of the approach increases.

The method of determining the optimal placement of sources of reactive power and its capacity in the system of electrical supply of industrial and civil objects based on the use of algorithm of rotation of particles with adaptation is proposed. When solving optimization problems using the particles algorithm for setting parameters, a genetic optimization algorithm was used. As a result of settlement studies for the electricity supply system of industrial and civil facilities, energy-efficient degrees of reactive power compensation, minimum lengths of cables and the values of reactive power coefficients are determined for which it is necessary to compensate for reactive power. A technical and economic assessment of the effectiveness of increasing the degree of compensation of reactive power at the level of electrical receivers was provided: changes in the losses of active power in the elements of the electrical supply of industrial and civil facilities, the possibility of using less sectional cables, reducing expenditures for payment of electric energy losses and the cost of conductive material.

DOI: 10.24263/2225-2924-2021-27-4-13

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ І ЦИВІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

С. М. Балюта, В. Д. Йовбак, Л. О. Копилова, Ю. В. Куєвда

Національний університет харчових технологій

Компенсація реактивної потужності в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів є актуальним завданням, оскільки дає змогу зменшити споживання та втрати електричної енергії, видатки на електротехнічне обладнання системи електрозабезпечення, забезпечити нормовані значення рівнів напруги у споживачів.

У статті представлені результати дослідження енергоефективності режимів систем електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів при різних ступенях глибини компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів. Для отримання максимального економічного ефекту при КРП вирішується однокритеріальна задача оптимізації — мінімізації фінансових витрат на оплату втрат електричної енергії і на установку пристроїв КРП. Така постановка задачі забезпечує взаємодію між «моделлю системи електрозабезпечення» і використаним «методом оптимізації». При цьому запропонований підхід надає можливість використовувати різні методи оптимізації, оскільки зміни в електричній схемі не призводять до необхідності змінювати будь-що в реалізації оптимізаційного методу. Іншими словами, забезпечується відсутність тісної залежності між задачею оптимізації і методом її розв'язку, підвищується гнучкість підходу.

Запропоновано метод визначення місць оптимального розміщення джерел реактивної потужності і величини їх потужності в системі електрозабезпечення промислових та цивільних об'єктів, що базується на використанні алгоритму рою частинок з адаптацією. При розв'язанні задач оптимізації за допомогою алгоритму рою частинок для настройки параметрів був використаний генетичний алгоритм оптимізації. В результаті розрахункових досліджень для системи електрозабезпечення промислового та цивільного об'єктів визначені енергоефективні ступені компенсації реактивної потужності, мінімальні довжини кабелів і величини коефіцієнтів реактивної потужності, для яких необхідно проводити компенсацію реактивної потужності. Проведено техніко-економічну оцінку ефективності підвищення ступеня глибини компенсації реактивної потужності на рівні електроприймачів: визначено зміни втрат активної потужності в елементах системи електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів, можливість використання кабелів меншого перерізу, зменшення видатків на оплату втрат електричної енергії та вартість провідникового матеріалу.

Ключові слова: коефіцієнт реактивної потужності, компенсація реактивної потужності, системи електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів, методи оптимізації, алгоритм рою частинок з адаптацією.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності передавання та споживання електричної енергії є актуальним для промисловості і цивільної сфери, оскільки дає змогу підвищити ефективність використання генеруючих потужностей, зменшити енергоємність продукції, що випускається підприємствами, а також зменшити викиди CO_2 . Для забезпечення високої енергоефективності систем електрозабезпечення доцільно підтримувати раціональні рівні напруги у вузлових точках електричних мереж міст і промислових підприємств шляхом компенсації реактивної потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням компенсації реактивної потужності в системах електрозабезпечення присвячено низку досліджень. Так, у праці (Лоскутов, 2006) представлено метод багатоцільової оптимізації компенсації реактивної потужності (КРП) в системі електропостачання промислового підприємства з використанням еволюційних алгоритмів.

У статті (Демов, Демов, Войнаровський & Паламарчук, 2006) розглянуто питання КРП в електричній мережі споживачів у сучасних економічних умовах. Автори роблять висновок, що в сучасних умовах підприємству економічно доцільно вкладати кошти в засоби компенсації реактивної потужності, що забезпечить більшу економічну ефективність порівняно з їх вкладенням в інші виробничі та комерційні операції

У праці (Лазуренко & Прохоренко, 2011) розглянуто питання компенсації реактивної потужності в міських електричних мережах з використанням централізованої (загальної) компенсація РП на підстанціях у системах електрозабезпечення побутових електроспоживачів та індивідуальної компенсації реактивної потужності на рівні кожної квартири або стояка шляхом підключення установок компенсації реактивної потужності (косинусного конденсатора невеликої ємності).

У статті (Шестеренко & Изволенський, 2017) розглянуто питання оптимального розподілу джерел реактивної потужності в системі електропостачання з використанням спеціальних оптимізаційних програм. У праці (Зорин & Буслова, 1971) представлено метод визначення місць установки і розрахунку оптимальної потужності конденсаторних батарей у розподільній мережі 0,4 кВ, що дасть змогу забезпечити нормовані відхилення напруги у споживачів.

Питанням розміщення конденсаторів і визначення їх оптимальної потужності для розподільних систем електропостачання присвячена праця (Ching-Tzong Su, Cheng-Yi Lin & Ji-Jen Wong, 2008). Автори представили метод оптимізації режимів роботи радіальної та замкненої електричної мережі, а також метод оптимізації розміщення конденсаторів з використанням еволюційно-імітаційного моделювання.

У праці (Akash, Himnay, Pratap Singh & Avinas Kumar Chauhan, 2014) розглядаються питання компенсації реактивної потужності в системах розподіленої генерації. Авторами показано, що КРП потужності поблизу навантаження забезпечує покращення якості напруги, покращення $\cos \phi$, зменшення загальної вартості системи.

У дослідженні (Mekhamer, El-Hawary, Soliman, Moustafa & Mansour, 2002) представлені евристичні стратегії вибору джерел реактивної потужності в радіа-

льних розподільних систем з трьома джерелами живлення, що базуються на варіаційних методах.

Представлений аналіз літератури показав, що за останнє десятиліття більшість праць, в яких розглядаються проблеми компенсації реактивної потужності, присвячені теоретичним методам розрахунків втрат і регулювання напруги або методів визначення оптимального розміщення засобів компенсації реактивної потужності (Герасименко, 2014; Тульский, Ванин & Толба Мохамед, 2020). Однак не вирішеним залишається питання обґрунтування ступеня глибини компенсації реактивної потужності на рівні приймачів у системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів, визначення місця розташування джерел реактивної потужності та їх потужності.

Метою статті є визначення обґрунтованого ступеня глибини компенсації реактивної потужності на рівні приймачів електричної енергії, розробка алгоритму оптимізації розміщення і потужності джерел реактивної потужності в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів на основі генетичних методів оптимізації, оцінка енергоефективності підвищення ступеню компенсації реактивної потужності на рівня приймачів електричної енергії.

Матеріали і методи. В основу дослідження покладені методи розрахунку ustalених режимів електричних мереж на основі лінійних алгебраїчних рівнянь ітераційними методами. Для визначення оптимального місця розташування та потужності конденсаторних батарей використовуються алгоритм рою частинок з адаптацією та генетичний алгоритм оптимізації.

Викладення основних результатів дослідження. В системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів при роботі більшості електроприймачів, що включають в себе, зазвичай, електричні машини та апарати, через дефіцит реактивної потужності виникає проблема її генерації поруч зі споживачем. Питання оптимізації генерації реактивної потужності (компенсації реактивної потужності) загалом зводиться до рішення двокритеріальної задачі пошуку найкращого рішення, оптимального за мінімумом сумарних втрат активної потужності в елементах електричної мережі і за мінімумом фінансових витрат на пристрої КРП.

Для отримання максимального економічного ефекту при КРП доцільно від двокритеріальної задачі перейти до однокритеріального завдання — мінімізації фінансових витрат на оплату втрат електричної енергії і на установку пристроїв КРП.

У результаті оптимізаційна задача може бути сформульована у вигляді:

$$\begin{aligned} B &= c_P \tau \Delta P(Q) + 0,12 c_Q \sum_{i=1}^n Q_i = \\ &= B_{\Delta P} + B_{Q_k} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1)$$

за таких обмежень

$$\begin{aligned} 0 < Q_i < Q_{\max i}, i = 1, \dots, n; \\ Q_k &= \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}; \\ 0,1 \leq \operatorname{tg}(\varphi) &\leq 0,6, \end{aligned} \quad (2)$$

де c_P — тариф на електроенергію за 1 кВт·год, грн/кВт·год; τ — час максимальних втрат для електричної мережі, год; $\Delta P(Q)$ — втрати активної потужності, кВт; n — кількість вузлів, в яких можна встановити КУ; Q_i — реактивна потужність конденсаторної установки в i -му вузлі; $Q_{\max i}$ — максимально допустимий рівень реактивної потужності КУ в i -му вузлі, який обмежується споживаною реактивною потужністю вузла; Q_k — вектор потужностей КУ; c_Q — питома ціна КУ, що встановлюються, грн/кВАр.

Постановка задачі у вигляді (1) забезпечує взаємодію між «моделлю системи електрозабезпечення» і використанням «методом оптимізації». Така взаємодія може бути реалізована таким чином:

1) з використанням «методу оптимізації» формується певний варіант розв'язання задачі (вектор Q_k);

2) за допомогою «моделі системи електрозабезпечення» виконується розрахунок режиму електричної мережі, визначається критерій, перевіряються обмеження і результати передаються до «методу оптимізації»;

3) на основі отриманої оцінки поточного варіанта розв'язання задачі з використанням «методу оптимізації» формується новий варіант розв'язання задачі оптимізації з використанням отриманих даних, після чого повторюється перехід до пункту 2, поки не буде виконана умова оптимізації.

Розрахунок електричної мережі виконується за способом розрахунку потоко-розподілу (Сегеда, 2009). Як «методу оптимізації» використовується алгоритм рою частинок з адаптацією, іменований в англійській літературі PSO (Particle Swarm Optimization) (Kennedy & Eberhart, 1995).

PSO широко висвітлений у літературі, але не існує єдиної схеми його опису і єдиної системи позначень, тому наведемо короткий опис за схемою, представленою у (Матренин & Секаев, 2013).

Введемо такі позначення (Матренин & Секаев, 2013): $f(X)$ — скалярна цільова функція (фітнес-функція), для якої потрібно знайти екстремальне значення; X — вектор змінних параметрів; D — область допустимих значень D , X , $D \in R[X]$; $L(X)$ — функція, що задає обмеження на X ; $|K|$ — кількість агентів популяції; $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{|K|}\}$ — множина всіх агентів; X_{ij} — i -й агент на j -й ітерації алгоритму; X^{best} — оптимальне значення вектора змінних параметрів; f^{best} — оптимальне значення цільової функції; $\varphi(X) = f(X)$ — значення фітнес-функції в положенні X (фітнес агента).

Розв'язується задача знаходження мінімуму функції пошуку:

$$f^{\text{best}} = f(X^{\text{best}}) = \min_{X \in D} f(X). \quad (3)$$

Вектор змінних параметрів X може набувати значення з певної області D . На початку частинки розкидані випадковим чином по всій області пошуку, при

цьому кожна частинка має випадковий вектор швидкості V_{ij} . Кожна частинка в кожен момент часу характеризується значенням параметрів X з області D (координатами точки в просторі рішень) і значенням функції оптимізації $f(X)$ (привабливістю даної точки). При цьому частинка «пам'ятає» найкращу точку в просторі рішень, в якій була, і прагне до неї повернутися, але підпорядковується також закону інерції і має схильність до невеликої стохастичної зміни напрямку руху. Для зв'язку між частинками використовується так звана спільна пам'ять, завдяки якій кожна частка знає координати найкращої точки серед усіх, в яких була будь-яка частинка рою. У підсумку на рух частинки впливають такі чинники: прагнення до свого найкращого стану; прагнення до найкращого серед усіх частинок положення; інерційність; випадкові відхилення.

Робота алгоритму завершується за таких умов: при досягненні заданого числа ітерацій; при досягненні задовільного рішення; після закінчення відведеного на роботу часу.

Взаємодію рою частинок можна описати таким кортежем:

$$\{K, M, A, P, I, O\}, \quad (4)$$

де K — множина агентів (частинок); M — засіб непрямого обміну інформацією між частинками; A — правила переміщення агентів; P — параметри алгоритму; I та O — вхід і вихід рою для взаємодії із зовнішнім середовищем.

Спосіб розрахунку показників економічної ефективності $B_{\Delta P}$ та B_{Q_k} може бути будь-яким, оскільки він не залежить від використаного алгоритму оптимізації. Так само, і алгоритм оптимізації не залежить від розрахунків показників системи електрозабезпечення. Такій підхід дає змогу легко використовувати різні методи оптимізації, оскільки зміни в електричній схемі не призведуть до необхідності змінювати будь-що в реалізації оптимізаційного методу. Іншими словами, забезпечується відсутність тісної залежності між задачею оптимізації і методом її розв'язку, підвищується гнучкість підходу.

Модель для алгоритму оптимізації можна представити у вигляді чорного ящика з визначеним інтерфейсом. На вхід моделі подається вектор-стовпець Q_k , а на виході отримуються критерії $B_{\Delta P}$ та B_{Q_k} , значення $\text{tg}(\varphi)$ та B . Необхідно встановити відповідність між позицією частинки x і вектором, що задає розміщення компенсувальних пристроїв у мережі Q_k . Найпростіший спосіб — прийняти, що $x_i = Q_i$, але максимально допустиме значення потужності КУ у кожному з вузлів заздалегідь невідоме, тому неможливо попередньо визначити межі простору пошуку рішень $d_{\min 1}, d_{\max 1}, \dots, d_{\min m}, d_{\max m}$, що призводить до залежності реалізації методу оптимізації від умови задачі.

При реалізації методу розрахунку доцільно уникати тісних залежностей задачі оптимізації і методу оптимізації, щоб забезпечити гнучкість та універсальність підходу. Тому була використана така техніка: вектор X використаний не як вектор потужностей КУ, а як вектор коефіцієнтів, тож потужність кожної КУ визначалась як добуток елемента вектора X на визначену під час розрахунку максимально допустиму потужність КУ у відповідному вузлі:

$$Q_i = X \cdot Q_{i \max}. \quad (5)$$

Якщо значення X_i є близьким до нуля, тоді приймається, що КУ в i -му вузлі не буде встановлена. В результаті при описі алгоритму рою частинок можна виключити залежність межі $d_{\min 1}, d_{\max 1}, \dots, d_{\min m}, d_{\max m}$ від особливостей схеми, що оптимізується. При цьому величини набувають значення ($d_{\min i} = 0, d_{\max i} = 1, i = 1, \dots, m$). Оскільки розмірність простору пошуку рішень дорівнює кількості вузлів, що розглядаються як потенціальні місця установки, тоді n дорівнює m .

Отже, позиція кожної частинки алгоритму рою частинок визначає певний варіант розміщення КУ і їх потужності. Для кожної позиції з використанням моделі обчислюється критерій B і значення $\text{tg}(\varphi)$. Обмеження на $\text{tg}(\varphi)$ не враховуються у векторах $D_{\min}$, і $D_{\max}$, але якщо для цього варіанта розміщення КУ величина $\text{tg}(\varphi)$ не підходить під обмеження, тоді використовується метод штрафних функцій.

При цьому в описі алгоритму рою частинок не міститься залежностей від моделі задачі (1), а розрахунок за моделлю (3) не залежить від реалізації алгоритму. Врахування особливостей задачі виконується безпосередньо в процесі роботи алгоритму рою частинок завдяки його здатності досліджувати простір пошуку рішення.

Для розв'язання задач оптимізації за допомогою алгоритму рою частинок необхідна настройка параметрів. Для цього був вибраний генетичний алгоритм (ГА) (Кононюк, 2008).

Параметри алгоритму рою частинок $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$ використовуються як гени ГА, а якість отриманого на цьому наборі параметрів розв'язку задачі (6) приймається за значення функції пристосованості.

Порядок роботи отриманого адаптивного алгоритму можна представити у вигляді сукупності таких пунктів:

1. Генерація початкової популяції як набір векторів $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$, які знаходяться у межах:

$$0 < \alpha_1 < 2; 0 < \alpha_2 < 2; 0 < \omega < 1; 0 < \beta < 1.$$

2. Розв'язок задачі (6) алгоритмом рою частинок з використанням кожного з наборів параметрів. Якщо отримане рішення (варіант розміщення КУ) краще за попереднє, тоді воно зберігається в пам'яті.

3. Вибір векторів параметрів з урахуванням їх пристосованості і схрещування для отримання нової популяції (векторів). У цій задачі використовувався одноточковий кросингвер.

4. Випадкові змінювання в значеннях параметрів. Імовірність зміни одного вектора становить 15%.

5. Якщо умова завершення виконана, тоді завершення роботи, інакше перехід до пункту 2.

Найкраще рішення, збережене в пункті 2, буде розв'язком задачі оптимізації. Як умова завершення використовувалось досягнення певної кількості ітерацій ГА. В розрахунках використовувалось 40 хромосом і 100 ітерацій ГА.

Адаптація дала змогу отримати набір ефективних параметрів:

$$\{\alpha_1 = 1,2546; \alpha_2 = 1,8135; \omega = 0,71456, \beta = 0,74235\}.$$

Потім ці параметри були використані у звичайному алгоритмі рою частинок для розв'язку задачі (5).

Розрахунок компенсації реактивної потужності був виконаний для підприємства харчової промисловості. В цеху встановлені два трансформатори 10/0,4 кВ потужністю 1000 кВА. Основними споживачами є асинхронні двигуни номінальною потужністю від 0,4 кВт до 132 кВт. Живлення споживачів цеху на напрузі 0,4 кВ виконано за радіально магістральною схемою. Розрахункова схема містить 96 вузлів і 88 гілок. Розрахунок показав, що при максимальному навантаженні найбільш потужних двигунів коефіцієнт реактивної потужності становить $\text{tg}(\varphi) = 0,54$, а втрати активної потужності — $\Delta P(Q) = 55,19$ кВт. При цьому щорічні витрати на оплату втрат електричної енергії становлять $B_{\Delta P} = 0,44$ млн грн.

Розрахункові дослідження оптимальної компенсації реактивної потужності проводилися для різних поєднань значень c_P і c_Q . З точки зору окупності найгірший варіант — низький тариф на електроенергію і висока питома вартість КУ. Для цього прикладу $c_P = 3,34$ грн/кВт·год, $c_Q = 178$ грн/кВАр. Результати досліджень показали, що при розв'язанні задачі КРП оптимально виконувати глибоку компенсацію до значення коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}(\varphi) = 0,10$.

Для порівняння результатів глибокої компенсації і нормальної компенсації реактивної потужності був виконаний розрахунок оптимізаційної задачі (1) при обмеженнях значення коефіцієнта реактивної потужності до 0,35. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розв'язання оптимізаційної задачі (5) для різних ступенів компенсації реактивної потужності

Глибина компенсації РП	Порівняльні параметри			
	ΔP , кВт	Витрати на оплату втрат ЕЕ $B_{\Delta P}$, млн грн	Q_k , кВАр	Витрати на КУ B_{Q_k} , тис. грн
без компенсації	58,22	0,42		
$\text{tg}(\varphi) = 0,35$	46,72	0,329	187,25	33,330
$\text{tg}(\varphi) = 0,10$	35,70	0,254	418,88	74,560

За умови компенсації реактивної потужності до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,35$ втрати активної потужності знижуються на 21%, а при виконанні глибокої компенсацію до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,10$, втрати зменшуються на 39%. (Найменше значення $\text{tg}(\varphi) = 0,10$ прийнято за умови стійкості роботи асинхронних двигунів). Однак у цьому разі необхідно збільшити потужність компенсувальних пристроїв удвічі. Відомо, що для установки компенсувальних пристроїв необхідними є додаткові площі. Витрати на монтажні роботи будуть практично однаковими, (як для установки КУ потужністю 185 кВАр, так і для КУ потужністю 415 кВАр). Отже, очевидним є те, що вирішуючи питання компенсації реактивної потужності за допомогою конденсаторних батарей, доцільно виконувати глибоку компенсацію реактивної потужності.

Виконані розрахункові дослідження оптимізації реактивної потужності в системі електрозабезпечення району міста. Для розв'язання оптимізаційної задачі

й аналізу глибокої компенсації був обраний фрагмент електричної мережі, що складається з 42 вузлів і 56 гілок. Усі розрахунки виконувалися на рівні напруги 10 кВ.

Для мереж напругою 10 кВ максимальне значення $\operatorname{tg}(\varphi)$ обмежується величиною 0,4. Значення цієї величини не має обґрунтування, тому при дослідженні верхнє значення коефіцієнта реактивної потужності обмежувалося величиною рівною 0,6. Для міських електричних мереж серед споживачів електроенергії частка потужних трифазних асинхронних і двигунів є малою порівняно з промисловими підприємствами, тому нижнє обмеження дорівнює нулю. Тому необхідно було розв'язати оптимізаційну задачу (1), в якій встановлені обмеження за коефіцієнтом реактивної потужності:

$$0 \leq \operatorname{tg}(\varphi) \leq 0,6. \quad (6)$$

Розв'язання оптимізаційної задачі (1) показало, що практично у всіх вузлах схеми оптимально виконувати компенсацію до значення $\operatorname{tg}(\varphi) = 0$, при цьому втрати активної потужності зменшуються на 18%.

Отже, встановлено, що глибока компенсація до значення коефіцієнта реактивної потужності від 0 до 0,1 дає змогу на промислових підприємствах і в міських електричних мережах досягти найбільшого енергозбереження, що сприяє ефективно вирішувати проблему економічного зростання виробництва.

Компенсація реактивної потужності зменшує величину повної потужності, що передається елементами системи електрозабезпечення. Це дає змогу зменшити перерізи кабелів у системи електрозабезпечення. Для оцінки впливу КРП на елементи системи електрозабезпечення були виконані дослідження ступенів компенсації реактивної потужності, що забезпечують мінімізацію фінансових видатків на кабельну продукцію. В цьому випадку математична модель задачі оптимізації формується таким чином:

$$\begin{aligned} B &= c_P \tau \Delta P(Q) + c_v F \cdot L_k \cdot 10^3 + 0,12 c_Q \sum_{i=1}^n Q_i = \\ &= B_{\Delta P} + B_{\Delta K} + B_{Q_k} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

і при обмеженнях (2), де c_v — питома ціна кабельної продукції, грн/мм; F — перетин струмоведучих частини лінії, мм²; L_k — довжина лінії, м.

Аналіз перетинів кабельних ліній схеми електрозабезпечення досліджуваного цеху показав, що вони завищені на один або два рівні від їх значень за тривало допустимим струмом для забезпечення нормованого розміру втрат напруги.

Питома ціна погонного метра кабельної продукції залежить від перетину жили кабелю, яка є дискретною величиною. При проведенні досліджень питома ціна за один погонний метр кабельної лінії замінювалася питомою ціною за об'єм.

Для вирішення використовувалася багатоетапна процедура, що складалася з таких етапів:

- розрахунок струмів, напруг і втрат у мережі для аналізованого варіанта розстановки джерел реактивної потужності Q_k ;

- визначення допустимих перетинів за довготривалим допустимим струмом протікання в провіднику і розрахунок витрат на кабельну продукцію B_{AK} ;
- перевірка вибраних перетинів кабельних ліній на допустиму втрату напруги;
- перерахунок витрат на оплату втрат активної потужності B_{AP} з урахуванням нових перетинів кабелів.

Вирішення завдання проводилося для різних варіантів значень c_P і c_Q . У всіх дослідженнях при вирішенні завдання (7) визначалися оптимальні значення коефіцієнта реактивної потужності $\epsilon k_{ij} = \{X_{ij}, V_{ij}, X_{ij}^{best}\}$. У табл. 2 наведені результати розв'язку задачі (8) для найгіршого варіанта з точки зору окупності: висока питома ціна конденсаторної установки і низький тариф на електроенергію. У нашому випадку $c_Q = 178$ грн/кВАр, $c_P = 2,34$ грн/кВт·год.

Таблиця 2. Результати оптимізації значення

Глибина компенсації РП	Значення критерію (8) (B) , (млн грн)	Втрати активної потужності $\Delta P (B_{AP})$, кВт	Сумарні витрати на кабельні лінії B_{AK} , млн грн	Сумарна потужність КУ B_{Qk} , кВАр	$\text{tg}(\varphi)$
без компенсації	5,37	56,20	1,54	0	0,54
$\text{tg}(\varphi) = 0,35$	4,71	45,23	1,28	178	0,35
$0,1 \leq \text{tg}(\varphi) \leq 0,6$	4,01	34,18	1,09	428	0,10

На основі виконаних розрахунків можна зробити висновок, що глибока компенсація реактивної потужності дає змогу зменшити передану потужність, зменшуючи таким чином втрати напруги, і не збільшувати поперечні перерізи проводів живлення.

Фінансові витрати на кабельну продукцію при компенсації до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,35$ зменшуються на 19%, а при компенсації до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,10$ — на 29%. При компенсації до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,10$ маса міді зменшується на 33,6%, маса алюмінію на 13,8%, а при компенсації до значення $\text{tg}(\varphi) = 0,10$ — міді на 37,4%, алюмінію на 21,2%.

При використанні кабелів меншого перетину за рахунок глибокої компенсації реактивної потужності тільки для однієї секції підстанції в атмосферу не буде викидатися 26,5 тис. кг CO_2 .

Очевидним є те, що термін окупності КРП залежить від тарифу на електроенергію, питомої вартості реактивної потужності компенсувального пристрою, початкового значення коефіцієнта реактивної потужності ($\text{tg}(\varphi)$) і вартості кабелю. В результаті проведених досліджень встановлено, що при вищих початкових значеннях $\text{tg}(\varphi)$ меншою є довжина кабельною лінії живлення, при якій вигідно виконувати глибоку компенсацію.

Оптимальні рішення, отримані з використанням алгоритму рою частинок для електроспоживачів з коефіцієнтом реактивної потужності $\text{tg}(\varphi) = 0,46$, зведені в табл. 3, при $c_P = 2,34$ грн/кВт·год.

Таблиця 3. Мінімальна довжина кабельних ліній, при яких доцільна глибока компенсація

c_Q , грн/кВАр	L_{Π} , м	$\text{tg}(\varphi)$ при L_{Π}	Термін окупності при L_{Π} , рік	$L_{ГК}$, м	$\text{tg}(\varphi)$ при $L_{ГК}$	Термін окупності при $L_{ГК}$, рік
Для кабельної лінії з алюмінієвими жилами (Al)						
160	40	0,25	4,7	70	0,10	2,7
225	45	0,30	4,7	105	0,10	2,7
340	35	0,39	4,6	300	0,15	2,3
Для кабельної лінії з мідними жилами (Cu)						
160	55	0,25	4,6	120	0,10	2,3
225	60	0,29	4,6	135	0,10	2,3
750	50	0,39	4,4	300	0,21	2,5

У табл. 3 використані такі позначення: L_{Π} — початкова довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення компенсації реактивної потужності, а $L_{ГК}$ — довжина, при якій знаходиться оптимальне рішення глибокої компенсації до значення коефіцієнта реактивної потужності від 0,15 до 0,10. Розрахунки виконані для кабелів з алюмінієвими і мідними жилами.

Дослідження показали, що при довжині лінії 50 м і більше, для ефективного використання електричної енергії необхідно проводити компенсацію реактивної потужності. При довжині лінії живлення 100 м і більше, залежно від вартості КУ, слід проводити глибоку компенсацію реактивної потужності — від $\text{tg}(\varphi) = 0,15$ до $\text{tg}(\varphi) = 0,10$.

Висновки

Шляхом розрахункових досліджень встановлено, що для забезпечення енергоефективності та енергозбереження в системах електрозабезпечення промислових підприємств необхідно виконувати глибоку компенсацію реактивної потужності на рівні електроприймача до значення $\text{tg}(\varphi) = 0 \dots 0,1$ замість рекомендованого нормативним документом $\text{tg}(\varphi) = 0,34 \dots 0,4$. При такому рівні коефіцієнта реактивної потужності можна зменшити перетини кабелів.

Завдання компенсації реактивної потужності в системах електропостачання відрізняються дискретністю параметрів компенсувальних пристроїв і перетинів кабельних ліній, тому застосування традиційних градієнтних методів оптимізації ускладнено. Генетичний алгоритм не використовує структури даних, специфічних для досліджуваної задачі, тому робить велику кількість обчислень цільової функції для низькоефективних рішень. Для вирішення оптимізаційного завдання вибору джерел реактивної потужності доцільно використовувати модернізований алгоритм рою частинок, який дає змогу шукати глобальний мінімум на всій множині можливих значень цільової функції. При цьому вибір оптимальних значень параметрів алгоритму рою частинок і їх адаптацію для умов завдання необхідно проводити за допомогою генетичного алгоритму.

Оптимальне розміщення джерел реактивної потужності у вузлах міської електричної мережі напругою 10 кВ доцільно виконувати з використанням комбінованого методу, який об'єднує алгоритм рою частинок і розрахунок усталеного режиму мережі електрозабезпечення. Глибока компенсація реактивної

потужності на рівні електроприймачів дає змогу знизити втрати активної потужності і покращити якість електропостачання міської інфраструктури. Енергоефективність заходів глибокої компенсації реактивної потужності в системах електрозабезпечення цивільних об'єктів нижча, ніж на промислових підприємствах, що пояснюється більш розподіленням навантажень.

Література

Лоскутов, А. Б., Еремін, О. И. (2006). Компенсация реактивной мощности. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях. *Промышленная энергетика*, 6, 39—41.

Демов, А. О., Демов, О. Д., Войнаровский, А. Ж., Паламарчук, О. П. (2006). Особливості впровадження компенсувальних установок у електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах. *Енергетика та електрифікація*, 2, 12—15.

Лазуренко, А. П., Прохоренко, Ю. В. (2011). Современные методы и устройства компенсации реактивной мощности в бытовых системах электропотребления. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, 41, 83—87.

Шестеренко, В. Є., Изволенський, І. Є. (2017). Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в системах електропостачання. *Наукові праці НУХТ*, 23(2), 140—146.

Зорин, В. В., Буслова, Н. В. (1971). Оптимизация конденсаторных батарей в распределительных сетях по условиям режима напряжения. *Электрические сети и системы*, 8, 62—69.

Ching-Tzong Su, Cheng-Yi Lin, Ji-Jen Wong (2008). Optimal size and location of capacitors placed on a distribution system. *Wseas transactions on power systems*, 4, 247—256.

Akash, Gaurav Shah, Himnay Pratap Singh, Avinas Kumar Chauhan (2014). Importance of reactive power for distributed generation. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 1, 84—88.

Mekhamer, S. F., El-Hawary, M. E., Soliman, S. A., Moustafa, M. A., Mansour, M. M. (2002). New heuristic strategies for reactive power compensation of radial distribution feeders. *IEEE Transactions on power delivery*, 4, 1128—1135.

Герасименко, А. А. (2014). Выбор компенсирующих устройств в распределительных сетях электроэнергетических систем. *Электричество*, 4, 4—16.

Тульский, В. Н., Ванин, А. С., Толба Мохамед А. (2020). Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети. *Электричество*, 6, 16—21.

Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization In Proceedings of IEEE. *International Conference on Neural Networks*, IV, 1942—1948.

Матренин, П. В., Секаев, В. Г. (2013). Системное описание алгоритмов роевого интеллекта. *Программная инженерия*, 1, 39—45.

Кононюк, А. Ю. (2008). Нейронні мережі і генетичні алгоритми: навч. посібник. Київ: вид-во: «Корнійчук».

Сегеда, М. С. (2009). Електричні мережі та системи: підручник. Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка».