

УДК 621.31

*В.Д.Трифонов, Д.В.Трифонов, канд-ти техн. наук, О.Р.Ковальов, І.Б.Кольцов, В.В.Бердник
(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")*

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Анотація. Підвищення енергоефективності на вугільних шахтах можливо за рахунок удосконалення технологічних процесів, а також завдяки застосуванню спеціальних засобів, серед яких найбільш ефективним є зниження втрат електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності. З цією метою у споживачів електричної енергії встановлюють пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП). Коректний вибір та техніко-економічне обґрунтування раціонального розподілу ПКРП в РПП–6 кВ значно розвантажує усю електричну мережу. Запропонована економіко-математична модель визначення раціональних значень потужності ПКРП на підземних розподільчих пунктах 6 кВ з урахуванням однакових потужностей вибухобезпечних ПКРП.

Ключові слова: економіко-математична модель, компенсації реактивної потужності, підземні розподільчі пункти.

Аннотация. Повышение энергоэффективности угольных шахт возможно за счет усовершенствования технологических процессов, а также благодаря применению специальных мероприятий, среди которых наиболее эффективным является снижение потерь электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности. С этой целью у потребителя электрической энергии устанавливаются устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ). Корректный выбор и технико-экономическое обоснование рационального распределения УКРМ в РПП–6 кВ существенно разгружает всю электрическую сеть. Предложена экономико-математическая модель определения рациональных значений мощности УКРМ на подземных распределительных пунктах 6 кВ с учетом одинаковых мощностей взрывобезопасных УКРМ.

Ключевые слова: экономико-математическая модель, компенсация реактивной мощности, подземные распределительные пункты.

Abstract: Energy efficiency optimization of coal mines, as a result of technological advance and of special measures being taken, among which the most effective is the reduction of power losses by compensating the reactive power, is considered. For this purpose, a reactive power compensation device (RPCD) is installed at the electrical energy consumer. The correct choice and feasibility study of rational distribution of RPCD in the 6 kV PDC significantly help un load the entire network. To determine the rational values of power RPCD at underground distribution centers of 6 kV, with respect to the identical power of explosion-proof RPCD, an economical and mathematical model is proposed.

Keywords: economical and mathematical model, reactive power compensation, underground distribution centers

Стан питання. Сучасні вугільні шахти – потужні високо механізовані гірничодобувні підприємства зі складним електротехнічним господарством. Вони характеризуються значним різноманіттям технологічних процесів, які істотно впливають на ефективність використання електроенергії. Підвищення енергоефективності на вугільних шахтах можливо за рахунок удосконалення технологічних процесів, а також завдяки застосування спеціальних засобів, серед яких найбільш ефективним є зниження втрат електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності. З цією метою у споживачів електричної енергії встановлюють пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП). Це значно розвантажує усю електричну мережу від цієї складової. Однак такі пристрої мало використовуються за часом.

Для умов вугільних шахт підвищення ефективності підземних електричних мереж, якщо припустити їх коректний вибір, можливо тільки завдяки більш високого коефіцієнта використання за часом, який за ствердженнями багатьох науковців становить нині 0.6...0.75 [1]. Більш високий коефіцієнт використання мають ПКРП напругою 6 кВ, що підключають у розподільних пунктах 6 кВ (РПП – 6 кВ). Однак застосування рудникових вибухобезпечних високовольтних конденсаторних батарей у схемах електропостачання вугільних шахт з установленням їх в РПП – 6 кВ потребує техніко-економічного обґрунтування.

Мета статті. Техніко-економічне обґрунтування раціонального розподілу ПКРП в РПП–6 кВ з урахуванням їх однакових потужностей.

Основна частина. Відомо, що підвищення енергоефективності вугільних шахт можливо шляхом використання ПКРП у підземних електричних мережах. Але встановлення їх в РПП – 6 кВ буде економічно доцільне, якщо розрахунковий коефіцієнт ефективності E_p перевищує величину банківської кредитної ставки $N_{кр}$, %, і річний рівень інфляції $N_{інф}$, %, тобто

$$E_p \geq (N_{кр} + N_{інф}) = N/100, \quad (1)$$

де $N = N_{кр} + N_{інф}$.

З другого боку, коефіцієнт ефективності E_p можна визначити як

$$E_p = E_k / K, \quad (2)$$

де E_k – річна економія від встановлення ПКРП; K – капітальні вкладення при застосуванні ПКРП,

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн} + K_{пл}, \quad (3)$$

де $K_{об}$ – вартість обладнання без ПДВ;

$K_{тз}$ – транспортно-заготовельні витрати, $K_{тз} = a_{тр} K_{об}$;

$K_{мн}$ – витрати на монтаж і налагоджування обладнання, $K_{мн} = a_{мн} K_{об}$;

$K_{пл}$ – планові накопичення, $K_{пл} = a_{пл} K_{мн} = a_{пл} a_{мн} K_{об}$;

$a_{тр}$, $a_{мн}$, $a_{пл}$ – нормативні значення коефіцієнтів на транспортно-заготовлені витрати, на монтаж і налагодження обладнання та планові накопичення, тобто

$$K_{об} = K_{об} + a_{тр} K_{об} + a_{мн} K_{об} + K_{пл} + a_{пл} a_{мн} K_{об} = (1 + a_{тр} + a_{мн} + a_{пл} a_{мн}) K_{об} \quad (4)$$

За відомим методом [2] визначають потужність ПКРП за окремим розподільним пунктом. Величина, на яку зменшуються втрати активної потужності на одному РПП-6 кВ після компенсації записується так:

$$\Delta P_i = \frac{Q_i^2 - (Q_i - Q_{кі})^2}{U^2} \cdot R_i \cdot 10^{-3} = \frac{2Q_i Q_{кі} - Q_{кі}^2}{U^2} \cdot R_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (5)$$

Після перетворення відразу отримуємо

$$\Delta P_i = \frac{\left[(2k_{рм} P_i^2 - K_{рм}^2 P_i^2) tg \gamma_i^2 - K_{рм}^2 P_i^2 tg \gamma_p^2 + (2K_{рм}^2 P_i^2 tg \gamma_i^2 - 2K_{рм} P_i^2 tg \gamma_i) tg \gamma_p \right] L_i}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де γ – питомий опір шахтних мідних кабелів, $\gamma=50$ м/Ом мм²; $K_{рм}$ – коефіцієнт різномасової частки в максимумі навантаження підземних дільниць [2]; S – переріз кабельної лінії, мм²; L – довжина кабельної лінії, м; $tg \gamma_i$, $tg \gamma_p$ – коефіцієнт кабельної потужності до та після компенсації, відповідно; P_i – розрахункова потужність розподільчого пункту, кВт.

Річна економія на зменшенні втрат активної енергії

$$E_{рзвi} = \frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i}, \text{ грн.,} \quad (7)$$

де b – вартість 1 кВт·год. електроенергії, грн./кВт·год., T_p – річна кількість годин роботи підземних приймачів [1].

Вітчизняна промисловість виготовляє достатню кількість та різноманітність ПКРП напругою 6 кВ. Річні експлуатаційні витрати на РПП–6 кВ

$$C_i = (K_a + K_m) C_{обi} + 3_i (I + K_z), \quad (8)$$

де $K_a + K_m$ – коефіцієнт на амортизацію та витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання, мереж відповідно; K_3 – коефіцієнт відрахувань на соціальні заходи; Z_i – заробітна плата обслуговуючого персоналу.

Вартість обладнання для i -го РПП – 6 кВ запишемо у вигляді виразу з двох змінних: відома кількість і тип прийнятих ПКРП та їх вартість. Тоді методом найменших квадратів отримуємо:

$$C_{обі} = a + b Q_{ki}, \quad (9)$$

де Q_{ki} – сумарна прийнята потужність ПКРП на РПП – 6 кВ.

Річна економія коштів при встановленні ПКРП в i -му розподільчому пункті

$$E_{pi} = E_{pзи} - C_i. \quad (10)$$

Варіант буде прийнятний для однакових РПП – 6 кВ, якщо виконується умова

$$E_{pi} = \frac{\frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} - (K_a + K_t) \cdot K_{обі} - Z_i \cdot (1 + K_3)}{K_{обі}} \geq N / 100. \quad (11)$$

Для підземного навантаження шахти

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p - (K_a + K_t) \cdot K_{обі} - Z_i \cdot (1 + K_3)}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} \right]}{\sum_{i=1}^n K_{обі}} \geq N / 100. \quad (12)$$

Приклад розрахунку.

1. Визначають струм у кабелях, що живлять РПП – 6 кВ. Задають значення P_p почергово від 500 до 2500 кВт з кроком 500 кВт. Для цього значення P_p змінюють величину $\cos \varphi$ від 0,45 до 0,97 з кроком

0,2. Визначають струми в кабелях за формулою $I_p = \frac{0,85 P_p}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$ і приймають переріз згідно з умовами

таблиці.

Таблиця 1

Вибір перерізу кабелю	
Струм, А	Переріз, мм ²
$I_p \leq 110$	35
$110 < I_p \leq 145$	50
$145 < I_p \leq 175$	70
$175 < I_p \leq 215$	95
$215 < I_p \leq 250$	120

2. Визначають потрібну реактивну потужність для вузла приєднання підземних споживачів всієї шахти

$$Q_k = 0,625 P_{pi} (tg \varphi_i - 0,25)$$

у такій послідовності:

- задаються почергово P_{pi} від 6000 до 10000 кВт з кроком 1000 кВт;

- для заданого значення P_{pi} змінюють значення $tg \varphi$ від 0,25 до 1,7320 з кроком 0,25.

3. Для конкретно прийнятого варіанта підземного навантаження шахти приймають відповідну кількість РПП – 6 кВ, потужність яких дорівнює сумі потужностей усіх підземних споживачів (умови п.1) з визначеним перерізом кабелю.

4. Розраховують оптимальну потужність ПКРП Q_{ki} для кожного РПП – 6 кВ за формулою

$$Q_{ki} = Q_i - \frac{(Q - Q_k) \cdot r_e}{r_i}$$

де r_i – опір живильної кабельної лінії РПП – 6 кВ, для якого визначають Q_{ki} ,

$$r_i = \frac{L_i (M)}{50S},$$

L_i – довжина лінії, яка змінюється від 1000 до 2500 м з кроком 500 м;

Q_i – реактивна потужність РПП – 6 кВ, для якого визначають Q_{ki} , тобто

$$Q_i = P_{pi} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i$$

для значень $\operatorname{tg}\varphi$ від 0,25 до 1,7320;

$P_{pi} \Rightarrow 500 - 2500$ кВт з кроком 500 кВт;

r_e – еквівалентний опір ліній, що живлять усі РПП – 6 кВ

$$r_e = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}};$$

Q – загальна реактивна потужність підземних споживачів

$$Q = 0,625P_{pi} \cdot \operatorname{tg}\phi$$

(використати значення P_{pi} п.2 за відрахуванням $Q_j = 500$ квар водовідливу та споживачів біля стовбурного двору).

Якщо $200 < Q_{ki} \leq 250$, то приймають $Q_{ki} = 250$ квар;
 $250 < Q_{ki} \leq 300$, то приймають $Q_{ki} = 300$ квар;
 $300 < Q_{ki} \leq 350$, то приймають $Q_{ki} = 350$ квар;
 $350 < Q_{ki} \leq 400$, то приймають $Q_{ki} = 400$ квар;
 $400 < Q_{ki} \leq 450$, то приймають $Q_{ki} = 450$ квар;
 $450 < Q_{ki} \leq 500$, то приймають $Q_{ki} = 500$ квар.

При $Q_{ki} < 200$ квар Q_{ki} приймають таким, що дорівнює нулю, тобто $Q_{ki} = 0$.

У даному випадку це вказує, що ПКРП не встановлюються в розрахунковому РПП – 6 кВ. Умова розподілу потужності для інших РПП – 6 кВ порушується. Необхідно змінити розрахункову сумарну реактивну потужність на потужність розрахованого РПП – 6 кВ Q_i , тобто $Q' = Q - Q_i$, і розрахунок повторити для інших РПП – 6 кВ без розглянутого. Опір цієї лінії також не враховується.

$$r_e' = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{r_i}}; \quad Q_{kj} = Q_j - \frac{(Q' - Q_k) r_e'}{r_j}.$$

Отримаємо оптимальний розподіл потужностей ПКРП на підземних розподільних пунктах 6 кВ (рис. 1).

З урахуванням рекомендацій роботи [1] будемо економіко-математичну модель за такими припущеннями:

- значення коефіцієнтів реактивної потужності всіх РПП – 6 кВ однакові;
- якщо потрібна потужність ПКРП в i -му РПП – 6 кВ менша за 200 квар, то вона приймається такою, що дорівнює нулю.

Після оптимального розподілу реактивної потужності, що буде скомпенсована, формується економіко-математична модель, яка дозволяє визначити доцільність розміщення ПКРП на підземних РПП – 6 кВ за формулою

$$\frac{\sum_{i=1}^n 1.1441 P_{pi} H_i L_i 10^{-3}}{16138 + 5.0356 Q_{ki}} - 0.16 > 0.25,$$

де $H_i = 0,8594 \operatorname{tg}^2 \phi_i - 0,1171 \operatorname{tg} \phi_i - 0,0244$; $L_i = 1000 \dots 2500$ м через кожні 500 м;
 $\operatorname{tg} \phi_i = 0,25 \dots 1,7320$ через кожні 0,25; $Q_{ki} = 200 \dots 500$ через кожні 50 квар;
 $P_{pi} = 500 \dots 2500$ кВт через 500 кВт; $N = 0,25$.

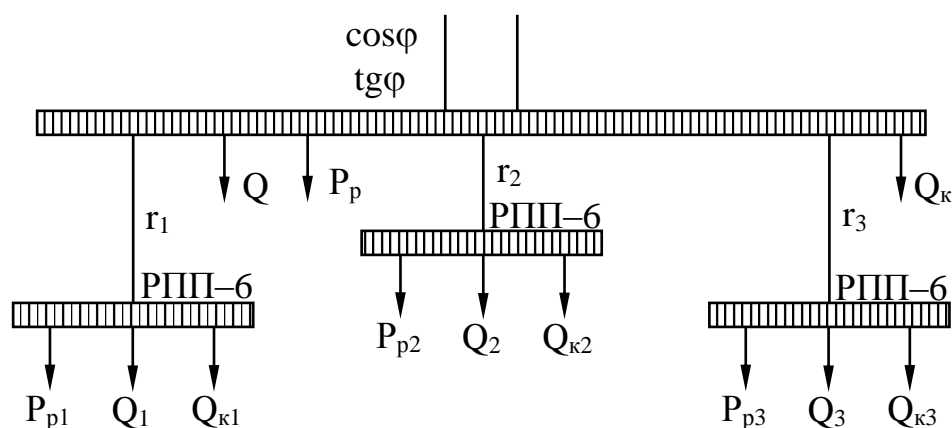


Рис.1- Схема розподілу потужностей ПКРП на підземних пунктах

Таким чином, отримана економіко-математична модель, яка дозволяє визначати доцільність розміщення ПКРП у РПП 6 кВ.

Висновок. Запропонована економіко-математична модель визначення раціональних значень потужності ПКРП на підземних розподільних пунктах 6 кВ з урахуванням однакових потужностей вибухобезпечних ПКРП, що застосовуються.

Список літератури

1. Трифонов Д.В. Підвищення ефективності використання електроенергії у виробничих системах / Трифонов Д.В., Ковальов О.Р.; Кумпін О.О. //; Наук.-техн. збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”. – Д.: РВК НГУ. – 2015. – № 94. – С. 135-139.
2. Півняк Г.Г. Електропостачання гірничих підприємств / Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. / Довідковий посібник. – Д.: РВК ДНУ. – 2008. – 550 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.311

Д.В. Цыпленков, канд. техн. наук., А.А. Суворкин

(Україна, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Анотація. Необхідність використання інтелектуальних електричних систем з мінімальними технічними втратами і впливом на навколишнє середовище є поштовх для систем з розподіленою генерацією, які можуть запропонувати такі переваги як зниження ресурсів системи передачі і розподілу, підвищення надійності, поліпшення якості електроенергії і т.п. В залежності від конфігурації системи та управління нею, ці переваги можуть бути позначитися і негативним чином.