



УДК 622.012.2:621.31

© 2007

Академік НАН України Г. Г. Півняк, В. Т. Заїка, В. В. Самойленко

### Обґрунтування рівня компенсації реактивної потужності для систем підземного електропостачання шахт

*The energy-saving potential from the reduction of reactive energy flows in all electrical energy distribution steps in a mining underground power-supply system is estimated. A technical economic model is worked out, and the criterion of estimating the reactive power compensation efficiency and the compensation level under service conditions are grounded. The model stability to the variation of the objective compensative plant capacity is investigated. The sensitivity of the model to the basic data error is analyzed.*

**Стан проблеми.** Вугільна промисловість — одна з енергоємних галузей України. Вона витрачає близько 8% від загального споживання електроенергії (ЕЕ) країною, а оплата за всі складові енергоресурсів (електроенергію, вугілля на власні потреби, газ і ін.) оцінюється в 1,5 млрд грн. на рік [1]. З них частка витрат на електроенергію досягає 80–85%, що в собівартості вугілля, яке видобувається, складає в окремих випадках близько 30%.

Незважаючи на оснащеність шахт досить сучасною та високопродуктивною гірничою технікою та обладнанням, в галузі спостерігаються великі втрати і нераціональне витрачання енергії. Досвід енергетичних обстежень, виконаних НДІГМ ім. М. М. Федорова і авторами на ряді підприємств вугільної промисловості (в основному на вугільних шахтах), показав, що працівники шахт не завжди знають істинні значення втрат енергії, в тому числі в різного роду електроустановках і обладнанні, часто не мають точного уявлення про джерела і причини їх виникнення.

Однією з добре відомих причин появи додаткових втрат електроенергії в елементах систем електропостачання є потоки реактивної потужності, результатом яких є також погіршення якості напруги, зниження пропускну здатності елементів мережі, передчасний вихід з ладу перенавантаженого електрообладнання. Проте для систем підземного електропостачання (СПЕП), елементи і установки яких мають спеціальне виконання і експлуатуються в специфічних умовах, невирішеними дотепер залишаються питання про доцільний рівень компенсації реактивної потужності для різних ступенів розподілу ЕЕ та визначення вузлів їх підключення. Актуальність цього питання зростає також у зв'язку з безперервним підвищенням вартості енергоресурсів.

**Визначення потенціалу електрозбереження від компенсації реактивної потужності.** Для розробки і обґрунтування заходів щодо підвищення рівня електровикористання оцінимо завантаженість розподільних мереж реактивною потужністю і викликані цим втрати електроенергії в підземній частині системи електропостачання шахти.

В теперішній час компенсувальні установки (зазвичай це конденсаторні установки) на шахтах встановлюються тільки на поверхні. Підключаються вони звичайно до шин головної знижувальної підстанції (ГЗП) або центрального розподільного пункту (ЦРП), тим самим забезпечується коефіцієнт потужності в цілому по шахті в межах 0,92–0,98. В той же час коефіцієнт потужності підземних електроприймачів (ЕП) залишається дуже низьким. В табл. 1 наведені його значення на різних рівнях узагальнення електричних навантажень в системі підземного електропостачання типової шахти Західного Донбасу.

З наведених за видобувні зміни і плановій продуктивності виробничих дільниць даних (табл. 1) видно, що середні значення природного коефіцієнта потужності для підземних електроустановок знаходяться в межах від 0,52 (електроприймачі видобувних дільниць) до 0,9 (насоси головного водовідливу). Мають місце випадки, коли він знижується до 0,3 (видобувні дільниці), що свідчить про вкрай низький рівень використання гірничої техніки з активної потужності і значне (більш ніж в три рази по відношенню до активної) завантаження підземної мережі реактивною потужністю, внаслідок чого виникають додаткові втрати активної потужності та ЕЕ.

Втрати ЕЕ в елементах мережі СПЕП (рис. 1), які викликані потоками реактивної енергії, визначимо за умови загальновідомих, а також додаткових припущень:

на шинах ГЗП підтримується постійний рівень напруги ( $\delta U = +5\%$ );

у схемі заміщення кабельної лінії (КЛ) напругою 6 кВ враховується активний і реактивний опори, а також зарядна потужність лінії, а для КЛ–0,66 кВ враховується тільки активний опір;

протягом розрахункового періоду припускається стабільний рівень продуктивності шахти та відносна незмінність за формою добового графіка навантажень ЕП підземних дільниць і установок.

Розрахункові дані щодо втрат ЕЕ в елементах СПЕП за ступеневим принципом опису СПЕП [2] зведені в табл. 2, звідки видно, що близько 75% всіх втрат ЕЕ в підземній частині системи електроспоживання шахти припадає на III та IV ступені розподілу ЕЕ і лише 25% — на інші.

Враховуючи досить низький рівень коефіцієнта потужності підземних електроприймачів (див. табл. 1), різний характер навантажень на рівнях їх узагальнення, а також структу-

Таблиця 1. Природний коефіцієнт потужності підземних електроприймачів по рівнях узагальнення електричних навантажень

Рівень узагальнення навантажень	Коефіцієнт потужності
ГЗП або ЦРП	0,95/(0,9–0,98)
ЦПП (центральна підземна підстанція)	0,81/(0,78–0,87)
РПП-6 кВ (розподільний підземний високовольтний пункт)	0,65/(0,5–0,8)
у тому числі:	
видобувні дільниці	0,52/(0,3–0,73)
підготовчі дільниці	0,65/(0,53–0,77)
конвейерний транспорт	0,56/(0,4–0,67)
головний водовідлив	0,86/(0,84–0,9)

Примітка. Чисельник дробів — середні значення, знаменник — межі змін шуканих величин.

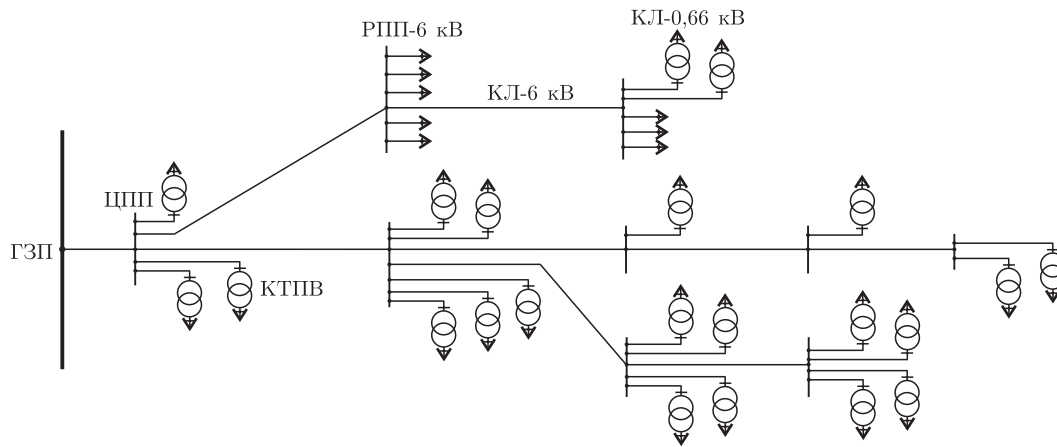


Рис. 1. Фрагмент схеми підземного електропостачання шахти КТПВ (комплектна трансформаторна підстанція)

ру втрат ЕЕ по розподільних ступенях СПЕП (див. табл. 2), доцільно оцінити потенціал енергозбереження від зниження потоків реактивної енергії по всіх ступенях розподілу ЕЕ за прийнятий розрахунковий період.

Під потенціалом електрозбереження  $\Omega$  далі розумітимемо різницю між існуючими втратами ЕЕ ( $\Delta A_f$ ) на певному ступені розподілу ЕЕ і втратами ( $\Delta A_{\min}$ ) за умови повної компенсації реактивної потужності на відповідному рівні узагальнення навантажень, яка у відсотках від загального об'єму втрат ЕЕ ( $\Delta A_{\Sigma}$ ) у підземній мережі шахти дорівнює:

$$\Omega = \frac{\Delta A_f - \Delta A_{\min}}{\Delta A_{\Sigma}} \cdot 100.$$

В табл. 3 наведені дані розрахунку фактичного потенціалу електрозбереження для СПЕП діючої шахти, одержані шляхом моделювання графіків навантажень для відповідних рівнів узагальнення навантажень.

За отриманими результатами можна зробити такі висновки:

потенціал енергозбереження від зниження потоків реактивної енергії в цілому з урахуванням ремонтної і видобувних змін складає близько 55–57% відносно загального об'єму втрат ЕЕ в підземній мережі шахти, що свідчить про значну частку втрат ЕЕ, зумовлених перетіканнями реактивної потужності внаслідок низького рівня електровикористання обладнання;

Таблиця 2. Добові втрати активної електроенергії в елементах СПЕП типової шахти

Ступінь розподілу ЕЕ	Видобувна зміна			Ремонтна зміна		
	Втрати ЕЕ					
	в СПЕП, кВт·год	від загальних втрат ЕЕ в СПЕП, %	від загального споживання ЕЕ підземними ЕП, %	в СПЕП, кВт·год	від загальних втрат ЕЕ в СПЕП, %	від загального споживання ЕЕ підземними ЕП, %
I	524,4	12,45	0,29	84,2	11,10	0,21
II	490,2	11,64	0,27	95,4	12,58	0,24
III	1582,4	37,58	0,89	329,4	43,43	0,82
IV	1613,9	38,33	0,90	249,5	32,90	0,62
Усього	4210,9	100,00	2,36	758,5	100,00	1,88

у ремонтні зміни потенціал енергозбереження значно нижчий за його значення у видобувній зміні, особливо на перших двох ступенях розподілу ЕЕ, але більшу частину цього потенціалу можна використати за умови компенсації реактивних навантажень в розподільній мережі 6 кВ; тому цілодобова робота компенсувальних пристроїв доцільна саме на рівні РПП-6 кВ і ЦПП, але у ремонтні зміни компенсована потужність має бути нижчою, ніж у видобувній;

найбільший потенціал енергозбереження має місце на III та IV ступені розподілу ЕЕ, який загалом складає 43% від загальних втрат ЕЕ; при цьому до 37% загальних втрат можна ліквідувати за умови компенсації реактивних навантажень на рівні РПП-6 кВ.

Таким чином, з огляду на структуру втрат за ступенями розподілу ЕЕ і відповідний потенціал енергозбереження є доцільним першочергово вирішувати питання щодо зниження потоків реактивної енергії в розподільній мережі шахт напругою 6 кВ.

**Обґрунтування рівня компенсації реактивних навантажень.** Для визначення економічно обґрунтованого рівня компенсації реактивних навантажень в СПЕП необхідно вибрати критерій оцінки ефективності запровадження цього заходу.

В умовах сучасної ринкової економіки інтегральним економічним показником доцільності реалізації інвестиційного проекту є чистий зведений дохід (Net Present Value, або NPV), який дозволяє отримати найбільш узагальнену характеристику результату інвестування, тобто дає пряме вимірювання грошового прибутку на основі сьогоденної вартості проекту. При оцінці ефективності компенсації реактивних навантажень в умовах функціонуючої системи електроспоживання чистим грошовим потоком є зниження плати за споживану ЕЕ за рахунок зменшення складової втрат активної енергії від компенсації реактивної потужності, а інвестиційними витратами на реалізацію проекту є витрати на придбання, встановлення та експлуатацію компенсувальних установок (КУ). В основу відповідної техніко-економічної моделі покладено такі припущення.

1. Напруга у всіх вузлах мережі є незмінною і відсутні фазові зсуви між напругою у різних вузлах.

2. Компенсація реактивної потужності здійснюється нерегульованими конденсаторними батареями, потужність яких визначається середнім значенням  $Q_c$  її споживання у вузлі навантаження [3].

3. Шкала потужностей КУ приймається безперервною.

Таблиця 3. Потенціал енергозбереження від компенсації потоків реактивної енергії в елементах СПЕП шахти

Ступінь розподілу ЕЕ	Видобувна зміна					Ремонтна зміна				
	Потенціал енергозбереження, %									
	максимальний*	Рівень узагальнення навантажень				максимальний*	Рівень узагальнення навантажень			
РП-0,66 кВ		КТПВ (шини 0,69 кВ)	РПП-6 кВ	ЦПП	РП-0,66 кВ		КТПВ (шини 0,66 кВ)	РПП-6 кВ	ЦПП	
I	5,09	5,09	0,21			0,84	0,84	0,03		
II	6,28	6,27	6,24			1,26	1,25	1,25		
III	20,95	20,86	20,77	20,68	0,25	4,37	4,37	4,35	4,34	0,05
IV	15,32	10,93	10,86	10,93	15,05	2,34	1,83	1,82	1,87	2,29
Усього	47,64	43,15	38,08	31,61	15,30	8,80	8,30	7,45	6,21	2,33

\* за умови повного усунення потоків реактивної енергії в елементах СПЕП.

4. Вартість КУ  $C_{\text{ку}}$  є такою, що лінійно залежить від потужності  $Q_{\text{ку}}$ , тобто  $C_{\text{ку}} = c_{\text{ку}} Q_{\text{ку}}$ , де  $c_{\text{ку}}$  — питомі капітальні витрати, грн/квар.

5. Встановлення КУ здійснюється в першому році розрахункового періоду ( $T_{\text{спор}} = 1$  рік), після чого починається нормальна експлуатація, протягом якої до моменту закінчення розрахункового періоду ( $T_e = T_p - T_{\text{спор}}$ ) щорічні витрати і вартість ЕЕ ( $c_e$ ) не змінюються.

За таких припущень функція  $NPV$ , аргументом якої є оптимальна реактивна потужність  $Q_o = Q_c - Q_{\text{ку}}$ , споживання якої з мережі енергосистеми дешевше подальшого зниження її рівня за рахунок компенсації, має вигляд:

$$NPV = \sum_{t=2}^{T_p} \frac{c_e T r \cdot 10^{-3}}{U^2} (Q_c^2 - Q_o^2) - \sum_{t=2}^{T_p} \frac{c_e T \Delta p_{\text{ку}} (Q_c - Q_o) + (\alpha_a + \alpha_o) (Q_c - Q_o) c_{\text{ку}}}{(1 + \alpha)^t} - \frac{(Q_c - Q_o) c_{\text{ку}}}{(1 + \alpha)}, \quad (1)$$

де  $r$  — активний опір ділянки мережі до вузла, де встановлюється КУ, Ом;  $T$  — тривалість роботи КУ, год/рік;  $U$  — напруга живлення вузла, де встановлюється КУ, кВ;  $\alpha$  — норматив дисконтування, в. о.;  $\alpha_a, \alpha_o$  — коефіцієнти відрахувань від капітальних вкладень відповідно на реновацію та ремонт і обслуговування, в. о.;  $\Delta p_{\text{ку}}$  — питомі втрати активної потужності в КУ, кВт/квар.

Якщо  $NPV$  дає пряме вимірювання економічного ефекту, то критерієм визначення оптимальної потужності КУ має бути максимум  $NPV$ .

В результаті диференціювання рівняння (1) за  $Q_o$  і прирівнювання похідної до нуля визначається значення реактивної потужності  $Q_o$ , яке відповідає максимуму  $NPV$ :

$$Q_o = \frac{\lambda}{r}, \quad (2)$$

де

$$\lambda = \frac{500 U^2 \left[ (c_{\text{ку}} (\alpha_a + \alpha_o) + c_e T \Delta p_{\text{ку}}) \left( \frac{1 - (1 + \alpha)^{T_p - 1}}{\alpha (1 + \alpha)^{T_p}} \right) - \frac{c_{\text{ку}}}{1 + \alpha} \right]}{c_e T \left( \frac{1 - (1 + \alpha)^{T_p - 1}}{\alpha (1 + \alpha)^{T_p}} \right)}. \quad (3)$$

З огляду на вирази (2) і (3) можна зауважити, що величина  $\lambda$  визначає оптимальне співвідношення між реактивною потужністю в будь-якій точці мережі та опором її ділянки до цієї точки. Тоді для будь-якого вузла, якщо існуючий добуток  $Q \times r$  більше оптимального, встановлення КУ доцільне в цьому вузлі у такому обсязі, щоб забезпечити його значення не більше оптимального. Тобто величина  $\lambda$  за своєю суттю є економічно обґрунтованим оптимальним рівнем компенсації реактивного навантаження, який визначається співвідношенням вартісних показників ЕЕ і КУ при заданому значенні розрахункового періоду і нормативу дисконтування.

**Аналіз стійкості моделі та чутливості рішення.** Варіювання вихідних даних, а отже можливість відступу від істинних економічно доцільних параметрів, що оптимізуються,

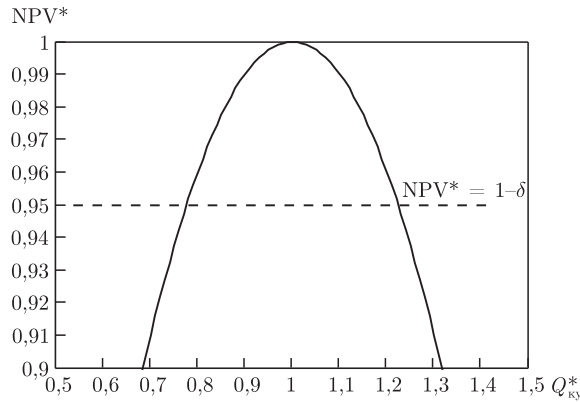


Рис. 2. Відносне зниження  $NPV$  при відхиленні потужності КУ від економічно доцільних значень

може призвести до неприйнятних відхилень значень цільової функції. Тому необхідно знаходити не один формально оптимальний варіант, а дослідити економічну стійкість економіко-математичної моделі (1), тобто визначити область припустимих змін параметрів, в межах якої варіанти досліджуваного об'єкту будуть економічно приблизно рівнозначні, а досліджуваний об'єкт економічно стійкий до зміни цих параметрів. Цій області відповідає певне відхилення цільової функції від екстремуму. За таке відхилення прийемо похибку розрахунків, яка в електроенергетиці складає  $\delta = 0,05$ .

Для розв'язання даної задачі представимо цільову функцію (1), записану як  $NPV = f(Q_{ky})$ , у безрозмірному вигляді [4]:

$$NPV^* = 2Q_{ky}^* - Q_{ky}^{*2}. \quad (4)$$

Розрахунок економічної стійкості функції  $NPV^*$  (рис. 2) за рівнянням (4) показує: рішення є рівноеконічними, якщо  $Q_{ky}$  знаходиться в межах  $\pm 22,3\%$  від оптимального, що збігається також з висновками за результатами досліджень електроспоживання гірничих машин і комплексів [3].

При практичних розрахунках це дозволить врахувати дискретність змінювання параметрів і в той же час здійснити варіант, рівноеконічний оптимальному, а також за потреби визначити доцільну щільність шкали, виходячи із необхідної точності розрахунків.

Вихідна інформація для визначення доцільного рівня компенсації реактивних навантажень має певну невизначеність або ж може визначатися з певною похибкою і за певних припущень. Тому виникає необхідність дослідження чутливості економіко-математичної моделі, що дозволяє економічно обґрунтувати точність, з якою мають бути задані вихідні дані.

Спираючись на стратегію розвитку паливно-енергетичного комплексу, тарифну політику в електроенергетиці, умови та параметри технологій видобутку вугілля підземним способом на наступні 10–15 років, доцільно для аналізу чутливості величини  $\lambda$  до зміни  $\alpha$ ,  $T_p$ ,  $c_e$ ,  $c_{ky}$  скористатися, крім виразу (3), такими значеннями вихідних величин:

Величина	Межі зміни	Базове значення
$\alpha$	0,05–0,3	$\alpha_{\text{баз}} = 0,2$
$T_p$	2–10 років	$T_{p\text{баз}} = 5$ років
$c_e$	0,3–1,5 грн/кВт·год	$c_{e\text{баз}} = 0,5$ грн/кВт·год
$c_{ky}$	50–100 грн/квар	$c_{ky\text{баз}} = 70$ грн/квар

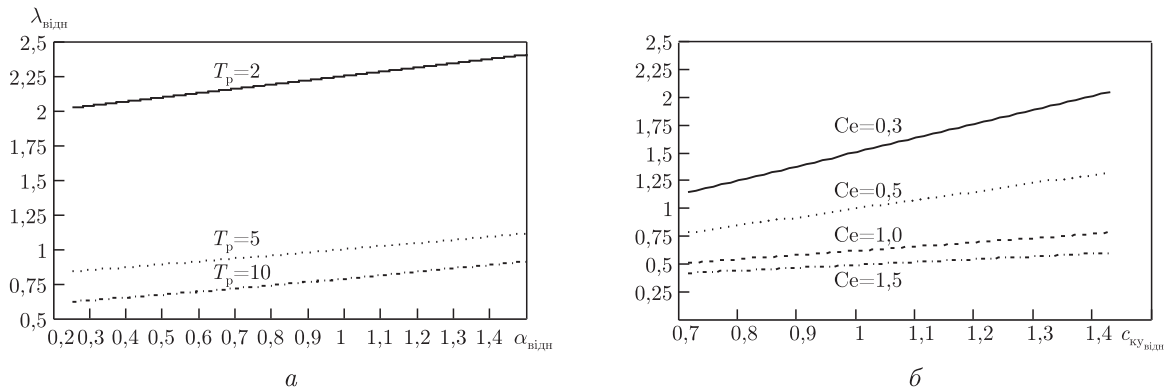


Рис. 3. Залежність відносного значення рівня компенсації  $\lambda$  від відносного значення норми дисконту при різній тривалості розрахункового періоду (а) та від відносного значення питомої вартості конденсаторних установок при різній вартості ЕЕ (б)

Аналізуючи залежності відносного значення рівня компенсації  $\lambda$  від зазначених величин (рис. 3), можна зауважити, що:

норма дисконтування в межах її варіювання 0,2–0,3 не призводить до похибки у визначенні  $\lambda$  більш ніж 15%; з огляду на те, що  $\lambda$  зумовлює значення потужності  $Q_{\text{КУ}}$ , яке в межах рівноекономічності варіантів може бути прийнятим в діапазоні  $\pm 22,3\%$  від оптимального, розрахунок за будь-яким значенням  $\alpha$  від 0,2 до 0,3 не призводить до виходу за межі рівноекономічності;

найбільше впливають на рівень компенсації значення питомої вартості КУ та вартість ЕЕ. Якщо припустити лінійність залежності  $\lambda_{\text{відн}} = f(c_{\text{КУвідн}})$  при  $c_e = \text{const}$ , то можна приблизно сказати, що 10%-на зміна  $c_{\text{КУ}}$  призводить до зміни  $\lambda$  від 9% при  $c_e = 0,3$  грн/кВт·год до 5% при  $c_e = 1,5$  грн/кВт·год. Тому, в межах рівноекономічності варіантів при зростанні цін на ЕЕ, що має місце в теперішній час, значення  $c_{\text{КУ}}$  припустимо визначати з похибкою від 25 до 40%;

тривалість розрахункового періоду більше ніж п'ять років незначно впливає на величину  $\lambda$ , але більше уваги слід приділяти точності вихідних даних з малими розрахунковими періодами.

На закінчення зробимо такі висновки.

За ступеневим підходом до описання систем підземного електропостачання встановлено, що близько 75% втрат активної електроенергії в СПЕП зосереджено в елементах III та IV ступенів розподілу ЕЕ.

Загальний потенціал від зниження втрат активної електроенергії за рахунок компенсації реактивних навантажень складає 55–57%, з них 43% припадає саме на ці ступені.

Розрахунки за критерієм максимуму чистого зведеного доходу показують, що при застосуванні нерегульованих компенсувальних установок можна досягти значного ефекту для умов діючого електроенергетичного комплексу шляхом їх встановлення у вузлах високовольтної мережі, тобто в РПП-6 кВ та ЦПП.

1. Лисовой Г. Н., Мялковский В. И., Лобода В. В., Архангельский Л. Н. Методика энергетического обследования угольных шахт Украины // Энергосбережение. – 2005. – № 8. – С. 22–25.
2. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. Т. Зайка, Ю. Т. Разумний / Під ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Вид. Націон. гірнич. ун-ту, 2004. – 206 с.

3. Зайка В. Т., Лапа А. О., Недоступенко В. В. Підвищення ефективності систем підземного електропостачання вугільних шахт за рахунок компенсації реактивної потужності // Гірничая електромеханіка та автоматика. – 2004. – Вип. 72. – С. 39–44.
4. Астахов Ю. Н. и др. Критериальный анализ технико-экономических задач в энергетике // Кибернетика – на службу коммунизму. – 1973. – 7. – С. 134–159.

*Національний гірничий університет,  
Дніпропетровськ*

*Надійшло до редакції 20.10.2006*