

УДК 621.316.722.076.12

Ф.П. Шкрабець, д-р техн. наук, Ю.В. Куваєв, О.В. Остапчук, канд. техн. наук.*(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")*

ПІДТРИМКА РІВНЯ РОБОЧОЇ НАПРУГИ ЗА РАХУНОК СИСТЕМИ ПОДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Вступ. Останнім часом у гірничій промисловості України спостерігається тенденція збільшення глибини виймання корисних копалин та пов'язаного з цим розвитку гірничих виробок. Збільшення загальної довжини виробок призводить до розгалуження підземної мережі та збільшенням електричних втрат, а також збільшенню рівня відхилень напруги у споживачів глибоких горизонтів. Отже вибір найбільш вдалих технічних рішень для підземної системи електропостачання гірничих підприємств з метою забезпечення відповідних показників якості електричної енергії у споживачів є досить актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з варіантів забезпечення необхідних показників якості є збільшення перетину стовбурних кабелів, підвищення рівня напруги розподільної мережі та застосування пристроїв подовжньої компенсації [1]. При застосуванні першого способу мається на увазі збільшення кількості кабелів живлення та їх перетину до максимального значення (для стаціонарних установок 185 мм², для пересувних – 95 мм²). Проте такий захід призводить до збільшення витрат кольорового металу та загального здорожчання мережі. Крім того кількість кабелів регламентується об'ємом шахтного стовбура, що знижує ефективність використання розглянутого технічного рішення. Другий спосіб можна використовувати при можливості технічного переоснащення електрообладнання на новий клас напруги. Також відповідний захід потребує значних капіталовкладень та наявності електрообладнання відповідного виконання [2]. Для глибоких горизонтів доцільно використовувати пристрої подовжньої компенсації [3]. Перші спроби використання даного способу були розглянуті ще в [4], але не було досліджено вплив сучасних конденсаторних установок на роботу приймачів електричної енергії в умовах глибоких шахт.

Метою роботи є дослідження впливу засобів подовжньо-ємнісної компенсації (ПЕК) на роботу споживачів глибоких горизонтів та розробка методики їх розрахунку.

Матеріали досліджень. В умовах гірничих підприємств, окремі приводи яких мають різкозмінне навантаження, тому доцільно використовувати ПЕК, яка забезпечується включенням послідовно до живильної лінії конденсаторної установки. Опір ємності конденсаторів компенсує (частково або повністю) або навіть перекомпенсує індуктивний опір лінії, внаслідок чого в ній зменшується втрата напруги. Схема електропостачання глибокого горизонту з використанням установки ПЕК приведена на рис. 1.

Значення добавки напруги, створюване послідовно включеними конденсаторами, пропорційне значенню струму навантаження і змінюється автоматично в залежності від струму, практично безінерційно.

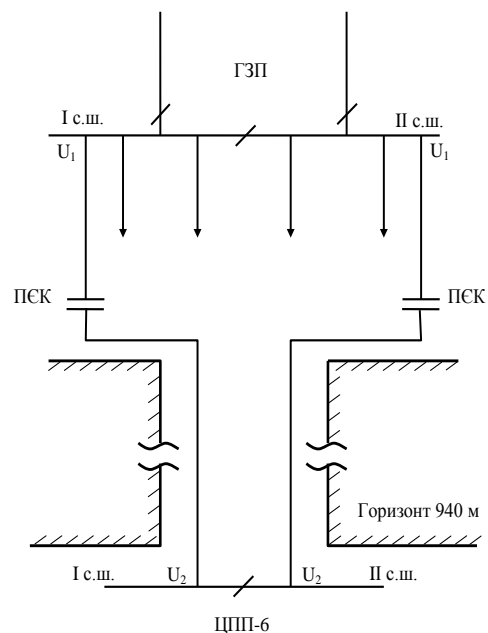


Рис. 1 – Електропостачання глибокого горизонту з установкою ПЕК

Схему заміщення мережі з навантаженням в кінці лінії та з послідовним включенням конденсаторів приведено на рис. 2, а; векторні діаграми напруг без конденсаторів і з конденсаторами приведено на рис. 2, б і 2, в відповідно.

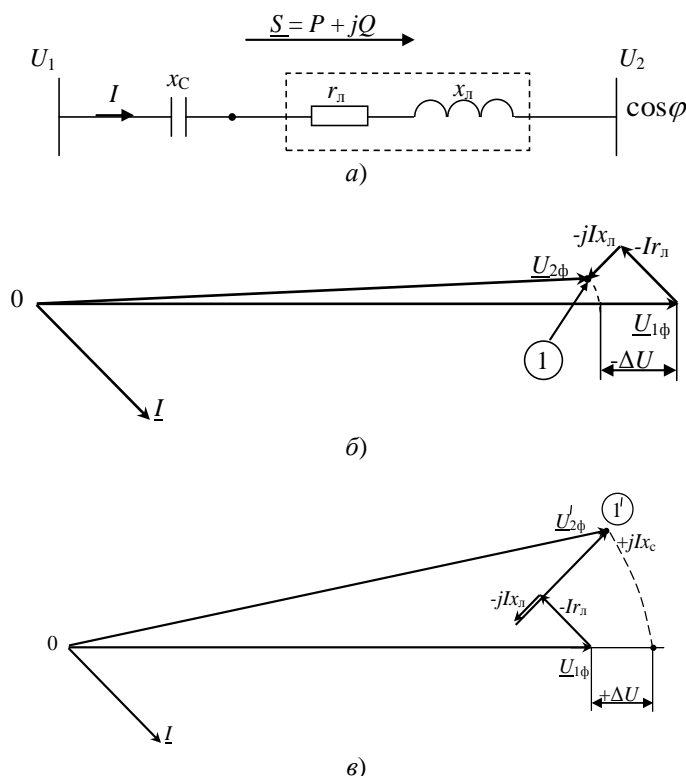


Рис. 2 - Схема включення конденсаторів (а) і векторні діаграми напруг без конденсаторів (б) і з конденсатором (в)

Повздовжня складова величини падіння напруги для випадку без конденсатора (рис. 3.2, б), тобто при завданні вектора фазної напруги на джерелі живлення, напруги на споживачах визначається вектором $\underline{U}_{2\phi}$ (точка 1)

$$\Delta U_{\phi} = I(r_l \cos \phi + x_l \sin \phi).$$

Якщо в лінію включити послідовно конденсатори з реактивним опором x_c (рис. 2, в) то сумарне падіння напруги на реактивному опорі лінії між джерелом живлення і споживачами складе величину $I(x_l - x_c)$. Падіння напруги в цьому випадку будуть дорівнювати:

$$\Delta U'_{\phi} = I[r_l \cos \phi + (x_l - x_c) \sin \phi].$$

Напруга на кінці лінії тепер дорівнює вектору $U'_{2\phi}$, позначеному на рис. 2, в точкою 1'. Очевидно, що положення точки 1' залежить від значення індуктивного опору конденсаторів. На рис. 2, в показаний випадок, коли $x_c > x_l$, який відповідає перекомпенсації індуктивного опору лінії; при цьому напруга біля приймача буде дорівнювати вектору $\underline{U}'_{2\phi}$. Можна визначити таке значення опору x_c , при якому $U_{1\phi} \approx U_{2\phi}$, тобто втрата напруги в лінії має значення, близьке до нуля. В цьому випадку подовжня складова падіння напруги

$$\Delta U''_{\phi} = I[r_l \cos \phi + (x_l - x_c) \sin \phi] = 0,$$

тобто $r_l \cos \phi = (x_c - x_l) \sin \phi$, звідси

$$x_c = x_l + r_l \operatorname{ctg} \phi .$$

Реактивний опір конденсаторів в цьому випадку компенсує не тільки індуктивний опір лінії, але в деякій мірі й падіння напруги на активному опорі. Очевидно, що при подальшому збільшенні x_c можна домогтися, що напруга на кінці лінії буде більше напруги на її початку, що забезпечить компенсацію падіння напруги в джерелі живлення (наприклад, в трансформаторі).

Якщо знехтувати поперечною складовою втрати напруги, а також врахувати відомі співвідношення для розрахунку потужності приймачів і потужності конденсаторів, то очікувана розрахункова процентна величина зниження втрат напруги визначиться виразом

$$\Delta U_p = \frac{P \cdot x_0 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \phi}{10 \cdot U_n^2} \lambda, \%,$$

де P – розрахункова активна потужність, що передається лінією, кВт; x_0 – індуктивний опір 1 км лінії на фазу, Ом/км; l – довжина лінії, км; U_n – номінальна лінійна напруга, кВ; $\operatorname{tg} \phi$ – тангенс кута зсуву фаз між напругою і струмом в лінії; $\lambda = \frac{x_l}{x_c}$ – ступінь компенсації.

Подальший порядок розрахунку подовжньої ємнісної компенсації наступний:

1. Необхідний опір конденсаторних батарей $x_{KB \text{ розр}} = \lambda \cdot x_L$.

2. Номінальна напруга батарей $U_{KB} = I_{KB} \cdot x_{KB}$.

За знайденою величиною U_{KB} обираємо номінальну напругу конденсаторів $U_{сн}$. При виборі виходимо з того, що фактична напруга на конденсаторах при будь-якому навантаженні нижче номінальної і не перевищує 5% фазної напруги лінії, проте ізоляція конденсаторів від землі і один від одного повинна бути розрахована на величину напруги ЛЕП, в яких вони встановлені. В даному випадку вона повинна бути 6 кВ.

3. Потужність конденсаторної батареї

- однієї фази $Q_{KB \phi} = I^2 \cdot x_{KB \text{ розр}}$;

- потужність трьох фаз $Q_{KB} = 3 Q_{KB \phi}$.

4. Ємність конденсаторів, включених в одну фазу

$$C = \frac{1}{2\pi f x_c} .$$

5. Число паралельних конденсаторів

$$n \geq \frac{I_{\phi}}{I_{нк}} = \frac{I_{нл}}{I_{нк}} .$$

6. Відношення потужності конденсаторів і активної потужності приймачів

$$a = \frac{Q_{KB}}{P_n} .$$

При заданих параметрах мережі величина a залежить від коефіцієнта потужності приймачів і що вимагається ΔU . Із збільшенням $\cos \phi$ і ΔU потужність послідовних конденсаторів різко зростає.

Попередній розрахунок установки ПСК для умов живлення горизонту 940 м

I. Початкові дані

1. Розрахункова схема кабельної лінії з установкою ПСК (рис. 3)

2. Очікувані (розрахункові) значення:

$$\cos \phi = 0,75 ; \sin \phi = 0,66 ; \operatorname{tg} \phi = 0,88 .$$

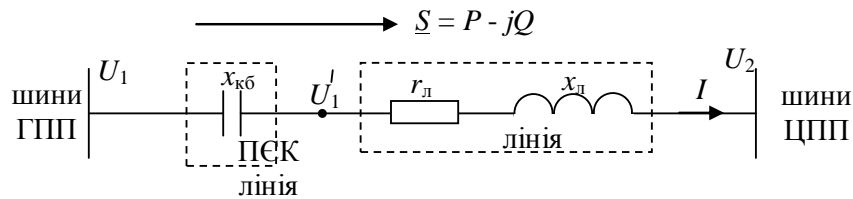


Рис. 3. Розрахункова схема з встановленою установкою ПСК

3. Параметри живильної мережі:

– кабель мідний $2 \times 120 \text{ мм}^2$;

– питомий опір кабелю: $r_0 = 0,153 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,076 \text{ Ом/км}$;

– довжина кабельної лінії $l = 1200 \text{ м} = 1,2 \text{ км}$;

– загальний опір фази двох паралельних кабелів:

$$r_{л} = r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{2} = 0,153 \cdot 1,2 \cdot \frac{1}{2} = 0,092 \text{ Ом};$$

$$x_{л} = x_0 \cdot l \cdot \frac{1}{2} = 0,076 \cdot 1,2 \cdot \frac{1}{2} = 0,046 \text{ Ом};$$

$$Z_{л} = \sqrt{r_{л}^2 + x_{л}^2} = \sqrt{0,0192^2 + 0,046^2} = 0,103 \text{ Ом}.$$

4. Очікувана (розрахункова) напруга на початку кабельної лінії (на шинах ГЗП)

$$U_1 = 6 \text{ кВ}.$$

5. Необхідна (що вимагається) напруга в кінці кабельної лінії (на шинах ЦПП)

$$U_2 = 6,3 \text{ кВ}.$$

А. Секція I шин ГЗП

II. Розрахунок ПСК

1. Розрахункова потужність підземних споживачів

$$\underline{S} = P + jQ = 4000 - j3540 = 5340 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

2. За відсутності установки ПСК ($x_c = 0$)

2.1. Струм у кабельній лінії

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{5340}{\sqrt{3} \cdot 6,0} = 515 \text{ А}.$$

2.2. Втрата напруги у кабельній лінії

– абсолютне значення

$$\Delta U_{л} = \frac{P \cdot r_{л} + Q \cdot x_{л}}{U_1} = \frac{4000 \cdot 0,092 + 3540 \cdot 0,046}{6,0} = 90 \text{ В}.$$

$$(\text{або } \Delta U_{л} = \sqrt{3} \cdot I (r_{л} \cos \phi + x_{л} \sin \phi) = \sqrt{3} \cdot 515 (0,092 \cdot 0,75 + 0,046 \cdot 0,66) = 90 \text{ В}).$$

– відносне значення

$$\Delta U, \% = \frac{\Delta U}{U_1} = \frac{90}{6000} 100\% = 1,5\%.$$

- необхідна напруга на вихідних затисках ПСК з урахуванням компенсації напруги в кабельній лінії

$$U'_1 = U_2 + \Delta U = 6300 + 90 = 6390 \text{ В.}$$

2.3. Розрахункова процентна величина необхідної компенсації втрати напруги ПСК

$$\Delta U, \% = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} 100\% = \frac{6390 - 6000}{6000} 100\% = 6,5\%.$$

2.4. Необхідні параметри конденсаторної батареї установки ПСК

- необхідний ступінь компенсації, %

$$\lambda = \frac{x_c}{x_l} = \frac{10 \cdot U_n^2}{P \cdot x_l \cdot \text{tg } \varphi} \Delta U = \frac{10 \cdot 6,3^2}{5340 \cdot 0,048 \cdot 0,88} 6,5 = 15,9$$

- необхідне значення опору ємності конденсаторної батареї

$$x_{кБ} = \lambda \cdot x_l = 15,9 \cdot 0,046 = 0,73 \text{ Ом.}$$

- напруга на конденсаторній батареї

$$U_{кБ} = I \cdot x_{кБ} = 515 \cdot 0,73 = 376 \text{ В.}$$

2.5. За знайденим значенням $U_{кБ}$ вибираємо номінальні дані конденсатора:

- виробник – ISKRA (Словаччина);
- номінальна робоча напруга - $U_{сн} = 6600 \text{ В}$;
- номінальна потужність $Q_{сн} = 400 \text{ квар}$;
- величина тривалого перевантаження за струмом – $1,3 I_{ном}$;
- максимальний піковий ударний струм – $100 I_{ном}$.

2.6. Розрахунковий робочий струм конденсатора

$$I_{с ном} = \frac{Q_{сн}}{U_{сн}} = \frac{400}{6,6} = 60,6 \text{ А.}$$

2.7. Число паралельних конденсаторів у фазі

$$n \geq \frac{I}{I_{сн}} = \frac{515}{60,6} = 8,5 \text{ приймаємо } n = 9.$$

2.8. Потужність трифазної конденсаторної батареї

$$Q_{кБ} = 3 \cdot Q_{сн} \cdot n = 3 \cdot 400 \cdot 9 = 10800 \text{ квар.}$$

2.9. Відношення потужності конденсаторної батареї до активної потужності приймачів ЦПП

$$a = \frac{Q_{кБ}}{P} = \frac{10800}{4000} = 2,7.$$

У таблиці 1 приведені значення основних параметрів конденсаторної батареї ПСК для забезпечення різних значень компенсації втрати напруги в кабельній лінії від секції І ГЗП до ЦПП, а також припустимі значення U_1 при $U_2 = 6300 \text{ В}$ та очікувані значення U_2 при $U_1 = 6300 \text{ В}$.

Основні параметри конденсаторної батареї ПСК, допустимі значення U_1 (при $U_2 = 6300 \text{ В}$) та очікувані значення U_2 (при $U_1 = 6300 \text{ В}$) при різних значеннях ΔU .

Основні параметри конденсаторної батареї ПСК для 1 с.ш.

$\Delta U, \%$	λ	$x_{кБ}, \text{ Ом}$	$U_{кБ}, \text{ В}$	Припустима $U_1, \text{ В}$ (при $U_2 = 6300 \text{ В}$)	Очікувана $U_2, \text{ В}$ (при $U_1 = 6300 \text{ В}$)	
					В	% від $U_{2н}$
5	12,26	0,564	290	6085	6520	3,5
6,5	15,9	0,73	376	6000	6615	5,0
8	19,6	0,9	464	5920	6710	6,5
10	24,5	1,13	580	5810	6835	8,5

Б. Секція II шин ГЗП

II. Розрахунок ПСК

1. Розрахункова потужність підземних споживачів

$$\underline{S} = P - jQ = 5000 - j4410 = 6670 \text{ кВА}$$

2. За відсутності установки ПСК ($x_c = 0$)

2.1. Струм в кабельній лінії

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{6670}{\sqrt{3} \cdot 6,0} = 643 \text{ А.}$$

2.2. Втрати напруги в кабельній лінії

– абсолютне значення

$$\Delta U_{л} = \frac{P \cdot r_{л} + Q \cdot x_{л}}{U_1} = \frac{5000 \cdot 0,092 + 4410 \cdot 0,046}{6,0} = 110 \text{ В,}$$

(або $\Delta U = \sqrt{3} \cdot I (r_{л} \cos \phi + x_{л} \sin \phi) = \sqrt{3} \cdot 643 (0,092 \cdot 0,75 + 0,046 \cdot 0,66) = 110 \text{ В}$).

– відносне значення

$$\Delta U_{л, \%} = \frac{\Delta U_{л}}{U_1} \cdot 100 = \frac{110}{6000} \cdot 100 = 1,83\%.$$

2.3. Необхідну напругу на вихідних затисках ПСК з урахуванням компенсації втрати напруги в кабельній лінії

$$U'_1 = U_2 + \Delta U = 6300 + 110 = 6410 \text{ В.}$$

2.4. Розрахункова процентна величина необхідної компенсації втрати напруги ПСК

$$\Delta U_{1, \%} = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{6410 - 6000}{6000} \cdot 100 = 6,8\%.$$

2.5. Необхідні параметри конденсаторної батареї установки ПСК

– необхідний ступінь компенсації

$$\lambda = \frac{x_c}{x_{л}} = \frac{10 \cdot U_n^2}{P \cdot x_{л} \cdot \text{tg} \phi} \cdot \Delta U, \% = \frac{10 \cdot 6,3^2}{5000 \cdot 0,046 \cdot 0,88} \cdot 6,8 = 13,3;$$

– необхідне значення опору ємності конденсаторної батареї

$$x_{к\bar{б}} = \lambda \cdot x_{л} = 13,3 \cdot 0,046 = 0,61 \text{ Ом;}$$

– напруга на конденсаторній батареї

$$U_{к\bar{б}} = I \cdot x_{к\bar{б}} = 643 \cdot 0,61 = 392 \text{ В.}$$

2.6. За знайденим значенням U_{KB} вибираємо номінальні дані конденсатора

- виробник – ISKRA (Словаччина);
- номінальна робоча напруга - $U_{сн} = 6600$ В;
- номінальна потужність - $Q_{сн} = 400$ квар;
- величина тривалого перевантаження по струму - $1,3 \cdot I_{ном}$;
- максимальний піковий ударний струм - $100 \cdot I_{ном}$.

2.7. Розрахунковий робочий струм конденсатора

$$I_{сн} = \frac{Q_{сн}}{U_{сн}} = \frac{400}{6,6} = 60,6 \text{ А.}$$

2.8. Кількість паралельних конденсаторів у фазі

$$n \geq \frac{I}{I_{сн}} \geq \frac{643}{60,6} = 10,6$$

приймаємо $n = 11$.

2.9. Потужність трифазної конденсаторної батареї

$$Q_{кб} = 3 \cdot Q_{сн} \cdot n = 3 \cdot 400 \cdot 11 = 13200 \text{ квар.}$$

2.10. Відношення потужності конденсаторної батареї до активної потужності приймачів ЦПП

$$a = \frac{Q_{кб}}{P} = \frac{13200}{5000} = 2,64.$$

У таблиці 2 приведені значення основних параметрів конденсаторної батареї ПЕК для забезпечення різних значень компенсації втрати напруги в кабельній лінії від секції II ГЗП до ЦПП, а також допустимі значення U_1 при $U_2 = 6300$ В і очікувані значення U_2 при $U_1 = 6300$ В.

Таблиця 2

Основні параметри конденсаторної батареї ПЕК для II с.ш.

$\Delta U, \%$	λ	$x_{KB}, \text{ Ом}$	$U_{KB}, \text{ В}$	Допустиме $U_1, \text{ В}$ (при $U_2 = 6300 \text{ В}$)	Очікуване $U_2, \text{ В}$ (при $U_1 = 6300 \text{ В}$)	
					В	% від $U_{2н}$
5	9,8	0,45	290	3100	6500	3,23
6,8	13,3	0,61	392	6000	6615	5,0
8	15,7	0,72	463	5934	6690	6,2
10	19,6	0,9	579	5825	6810	8,2

Основні параметри конденсаторної батареї, допустимі значення U_1 (при $U_2 = 6300$ В) і очікувані значення U_2 (при $U_1 = 6300$ В) при різних значеннях.

Запобігання небажаних режимів при роботі установок ПЕК

Економічна і стійка робота установки ПЕК у високовольтних розподільних мережах багато в чому залежить від правильного вибору основного параметра – опору ємності конденсаторів. Із збільшенням цього параметра зростає напруга на виході установки. Тому доцільно збільшувати опір конденсаторів при низьких рівнях напруги мережі. На практиці налаштування установок ПЕК за максимальним режимом підвищення напруги не завжди вдається у зв'язку з виникненням параметричного резонансу асинхронних двигунів, а також появою феромагнітних субгармонійних коливань.

При параметричному резонансі струми асинхронних двигунів, що містять низькі гармоніки, викликають резонанс між установкою ПЕК та індуктивністю кола і двигуна. Це відбувається на частоті яка нижче за частоту енергосистеми. В цих умовах двигун обертається із зниженою відповідно до частоти резонансу швидкістю обертання. При цьому двигун працює як перетворювач, споживаючи енергію на частоті енергосистеми і видаючи її назад в мережу на резонансній частоті. Цей процес супроводжується

вібраціями і великими струмами в двигуні, причому можуть виникнути і періодичні коливання напруги в мережі.

Явища феромагнітних субгармонійних коливань спостерігаються в основному при включенні ненавантажених трансформаторів або при значному підвищенні напруги. Якщо при цьому послідовно включений опір ємності має достатню величину, то це приводить до насичення сердечника трансформатора і до появи субгармонік значної амплітуди з дробовим (1:2; 1:3 тощо) відношенням її частоти до основної. Це явище супроводжується значним підвищенням струму і напруги, що може привести до відключення як лінії, так і трансформаторів.

Боротися з небажаними режимами можна наступними способами:

- перший - включення шунтувального опору;
- другий - закорочування конденсаторів;
- третій - зменшення опору установки.

Перший спосіб. За цим способом паралельно конденсаторам включається шунтувальний активний опір. Недоліком цього способу слід рахувати наявність втрат енергії в шунтувальному опорі і зниження ефекту підвищення напруги установкою ПСК.

Згідно з [4] в деяких випадках для усунення небажаних режимів достатньо було включення шунтувального опору, величина якого перевищувала опір конденсаторів всього в 3 рази. Це приводило до відчутних втрат енергії в шунтувальному опорі при постійному включенні його. В тих випадках, коли при усуненні небажаних режимів мережі вдається збільшити значення шунтувального опору в 10-20 разів в порівнянні із значенням опору конденсаторів, вживання цього способу доцільне. Можливо також включення послідовно з шунтувальним опором насичувального дроселя, який при появі субгармонійних складових струму буде підмагнічуватися і відкривати гілку з активним опором. Цей варіант вимагає вживання спеціальних дроселів насичення, що здорожчує установку ПСК.

Другий спосіб. За цим способом автоматично закорочуються конденсатори спеціальним захистом, що приводиться в дію субгармонійними складовими струму. Через деякий час після відключення установка знову включається автоматично в роботу. Передбачається, що за цей час двигуни розвинули номінальну швидкість. Даний спосіб може бути рекомендований за наявності відповідальних навантажень і достатньо великої пропускної потужності, оскільки він коштовний (значні витрати на вимикач і спеціальний фільтровий захист).

Третій спосіб. Найбільш простим і доступним є спосіб зменшення опору установки. Даний спосіб передбачає зменшення опору установки ПСК з одночасним зменшенням пробивної напруги спеціальних захисних розрядників. Зниження пробивної напруги захисних розрядників забезпечує одночасно і шунтування конденсаторів у разі появи небажаних режимів із значною амплітудою напруг і тим самим сприяє їхньому усуненню. При цьому конденсатори шунтуються стійкою дугою, рухомою між електродами спеціального розрядника. Після припинення небажаного режиму дуга на розряднику гаснула, і розрядник був знову готовий до повторних дій. У умовах експлуатації розрядник налаштується приблизно на двократну напругу, що виникає на конденсаторах при нормальному максимальному режимі.

Зазначені заходи дозволяють уникнути явища параметричного резонансу в лініях. Проте установку ПСК можна рекомендувати тільки для окремих кабельних ліній, що живлять найбільш віддалених споживачів електричної енергії.

Висновки. Наведена методика вибору ємності установки ПСК може використовуватись в умовах гірничих підприємств для забезпечення необхідних показників якості електричної енергії споживачів глибоких горизонтів. Застосування сучасних установок поздовжньої компенсації дозволить максимально підвищити ефективність передавання електричної енергії по стовбурним кабельним лініям з невеликим рівнем капіталовкладень.

Список літератури

1. Шишкин, Н.Ф. Основные направления электрификации современных шахт [Текст] / Н.Ф. Шишкин, В.Ф. Антонов // М.: Наука, 1981. – 116 с.
2. Пивняк, Г. Г. Перспективы повышения номинальных напряжений электрической сети в системе электроснабжения угольных шахт [Текст] / Г.Г. Пивняк, Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов // Энергосбережение, Донецк, - 2008. – № 3. – С. 9-11.
3. Угольная промышленность за рубежом [Текст] / В.Е. Зайденварг, Н.И. Гаркавенко, В.С. Афендииков и др. – М.: Горная промышленность, 1993. – 389 с.: ил. 34.
4. Побуль, Г.Х. Повышение пропускной способности распределительных сетей высокого напряжения с применением продольно-емкостной компенсации [Текст] / Г.Х. Побуль – М.: Энергия, 1977. – 60 с., ил.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Разумним Ю.Т.