

II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.13

Шкрабець Ф. П.¹, Остапчук О. В.², Кожевников А. В.³, Акулов А. В.⁴¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна, E-mail: ShcrabetsF@nmu.org.ua²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна⁴Асистент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ НАПРУГИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РОБОЧИХ ГОРИЗОНТІВ ГЛИБОКИХ ШАХТ

Виконано аналіз показників, що впливають на економічну доцільність застосування класу напруги 35 кВ для глибоких енергоємних шахт при їх реконструкції. Розроблено методу підрахунку економічної ефективності підземної системи електропостачання, вплив електроприймачів на економічність експлуатації, а також визначена низька ефективність використання класу напруги 10 кВ для живлення глибоких горизонтів шахт.

Ключові слова: шахта, підземна система електропостачання капітальні та експлуатаційні витрати, клас напруги.

ВСТУП

Розвиток економічного потенціалу України нерозривно пов'язаний з ростом об'єму промислового виробництва, для якого необхідна наявність відповідної сировинної бази.

Вітчизняна гірничодобувна та вугільна промисловість завжди займали лідируючі позиції у формуванні ВВП країни. Останнім часом значне поглиблення існуючих гірничих виробок та постійне збільшення тарифів на електроенергію призводять до підвищення вартості кінцевого продукту і, як наслідок, зниження конкурентної спроможності та рентабельності роботи вітчизняних гірничих підприємств. Зазначені обставини примушують керівництво таких об'єктів застосовувати передовий закордонний досвід у технології видобутку корисних копалин. Проте на сьогоднішній день не існує єдиного підходу до перспектив розвитку гірничих підприємств (в першу чергу значної глибини виробок та енергоємності), як на етапі проектування так і реконструкції існуючого виробництва. Вагомим параметром, що чинить вплив на продуктивність та рентабельність гірничого підприємства є робота системи електропостачання підприємства (СЕП). Від правильного вибору та техніко-економічного порівняння запропонованих варіантів СЕП залежить надійність електропостачання, відповідна якість електроенергії та безпека обслуговуючого персоналу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для забезпечення вказаних факторів необхідно визначити оптимальний клас напруги підземної розподільної та дільничної мережі який визначається за формулами [1]:

Німеччина. За формулою Вейкерта, раціональний рівень напруги (кВ)

$$U = 3\sqrt{S} + 0,5l,$$

де S – потужність, що передається, МВА; l – відстань, км.

США. Використовується формула Стілла

$$U = 4,34\sqrt{l+16P},$$

де P – потужність, що передається, МВт; l – відстань, км.

Відповідний вираз був перетворений С. Н. Нікогосовим та набув широкого розповсюдження у вітчизняній практиці у вигляді

$$U = 16\sqrt[4]{Pl}.$$

Швеція. Використовується відповідна формула

$$U = 17\sqrt{\frac{l}{16} + P}.$$

Наведені вирази дозволяють досить наближено визначити значення оптимальної напруги, спираючись на дані потужності та довжини. Але також існує ряд інших факторів, що чинять суттєвий вплив на роботу гірничих підприємств. Крім того необхідно враховувати для якої ділянки СЕП будуть використанні відповідні вирази.

Питання, пов'язані з підвищенням існуючого рівня напруги дільничних мереж до 1120 В і навіть до 3000 В неодноразово розглядалися, як у роботах вітчизняних дослідників так і за кордоном. Відносно ж рівня напруги розподільної мережі у роботах [2–3] відмічена необхідність застосування рівня напруги 10–20 кВ для високовольтних мереж шахт, які будуються. Також існує точка зору переведення глибоких горизонтів енергоємних шахт на часткове використання класу напруги 35 кВ (стовбурні кабелі) за схемою «глибокого вводу» [4]. Проте, деякі дослідники [5], пропонують не змінювати існуючу ситуацію, через обмеженість номенклатури електрообладнання у відповідному виконанні напругою 10-35 кВ. Така велика кількість пропозицій склалася у першу

чергу через складність точної оцінки ряду факторів, що чинять вплив на правильність методики розрахунку техніко-економічних показників параметрів СЕП.

Метою роботи є техніко-економічне обґрунтування та розробка методики визначення оптимального рівня напруги високовольтної розподільної мережі глибоких енергоємних шахт.

Матеріали досліджень. Вибір оптимального рівня напруги розподільної мережі здійснюється у результаті техніко-економічного порівняння деяких варіантів. При виконанні відповідних досліджень, що направлені на оцінку факторів, які чинять вплив на вибір рівня напруги, необхідно вибрати шахту з усередненими показниками продуктивності, глибини виробок корисних копалин, водорясності тощо. При виконанні аналізу необхідно враховувати, що у якості робочої напруги доцільно використовувати наступний ряд 6, 10 та 35(110) кВ. Використання класу напруги 20 кВ, не є доцільним через відсутність необхідного обладнання вітчизняного виробництва (в першу чергу двигунів та трансформаторів).

Оцінка впливу «технічних факторів» до яких відноситься: якість напруги у споживачів підземної мережі, надійність схеми електропостачання, аналіз пропускної здатності відповідних розподільних мереж, були досить докладно розглянуті у роботі [6], тому аналіз необхідно виконати за економічними показниками, а саме: вартість основного обладнання у кожному з варіантів, вартість електричної енергії за класами напруги та її рівень втрат у елементах системи.

В умовах фінансової невизначеності досить складно виконувати планування тих чи інших технологічних процесів. Тому на етапі техніко-економічного обґрунтування для визначення найбільш оптимального класу напруги для підземної розподільної мережі доцільно використовувати методику визначення пропускної здатності діючих кабельних ліній. При зниженні показників якості електричної енергії більш за норму, робиться висновок про підвищення класу робочої напруги. Як уже було зазначено вище, використання класу напруги 10 кВ у якості основного для нових шахт отримало значну підтримку у 80-х роках минулого століття. Проте за останні роки ситуація змінилася в першу чергу через певні досягнення у виготовленні обладнання напругою 35 кВ, тому в певних випадках доцільно використовувати цей клас напруги.

В загальному випадку порівняльний аналіз вартості побудови та експлуатації розподільної мережі для декількох варіантів, виконується за формулою:

$$C_0 = K_{II} + B ;$$

де K_{II} – капіталовкладення, тис. грн.; B – витрати за період експлуатації.

Перша складова має на увазі витрати, що спрямованні на закупівлю основного електрообладнання (трансформатори, двигуни, кабельні лінії тощо), друга складова – об'єм та вартість електричних втрат у цих елементах.

Перша складова визначається за рекомендаціями [7], де вказано також укрупненні показники вартості обладнання. Для спорудження кабельних ліній, тис. грн./рік:

$$K_{KII_{кл}} = \left[(E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i} L_i \right],$$

де E_H – норма дисконту, що дорівнює базовій процентній ставці НБУ (на 30.04.2015 $E_H = 30\%$); P_a – відрахування на амортизацію (для кабельних ліній із зшитого поліетилену $P_a = 5\%$); L – довжина ліній, м; K_{0i} – капітальні витрати на спорудження 1 км кабельної лінії відповідної напруги, тис. грн.

З аналізу низки схем електропостачання існуючих підприємств можна зробити висновок про наявність на підстанції підприємства класу напруги 35 кВ та відсутності 10 кВ, тому при підвищенні напруги необхідно спорудження трансформаторної підстанції (модульного типу), як у першому, так і у другому варіанті. При застосуванні класу напруги 10 кВ, підстанція матиме загальнопромислове виконання, що сприятиме зниженню її вартості, проте для її розміщення необхідна певна територія. При використанні напруги 35 кВ – підстанція буде розташована в шахті, матиме спеціальне виконання, але за рахунок певних технічних рішень можливе зменшення вартості конструкції, через відмову від ввідних комір. Таким чином капітальні затрати на спорудженні підстанції у першому та другому випадках будуть приблизно однаковими та визначатимуться за формулою:

$$K_{KII_{mn}} = n_{mn} \left[(E_H + P_a) K_{mn} \right],$$

де n_{mn} – кількість трансформаторних підстанцій відповідної напруги; K_{mn} – капітальні витрати на спорудження підстанції відповідної напруги, тис. грн.

Орієнтовна вартість втрат енергії у трансформаторах (грн./рік), визначається за формулою:

$$B_{TP.E.} = \left(\Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau \right) \cdot C ,$$

де ΔP_{XX} , ΔP_{K3} – відповідно потужність неробочого ходу та короткого замикання трансформаторів, кВт; T_0 – час експлуатації трансформатора впродовж року $T_0 = 8760$, год./рік; τ – річний час максимальних втрат, год./рік; K_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора; C – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт*год.

Втрати неробочого ходу та короткого замикання з достатньою точністю можна визначити використовуючи формули

$$\Delta P_{XX} = 0,4 + 0,16U_H + 213 \cdot 10^{-6} S_H ;$$

$$\Delta P_{K3} = 24 + \left(585 \cdot 10^{-5} + 10^{-5} U_H \right) S_H ,$$

де S_n – номінальна потужність трансформатора, кВА;
 U_n – номінальна напруга трансформатора, кВ.

До високовольтних споживачів електричної енергії слід віднести трансформаторні підстанції та електричні приводи насосів, компресорів, підйомних установок тощо. Так як клас напруги 35 кВ застосовується тільки для стовбурних кабельних ліній, то подальше порівняння відбуватиметься для обладнання напругою 6 та 10 кВ.

В даний час на шахтах трифазні двигуни потужністю 200–250 кВт і вище обираються для класу напруги 6 кВ. Єдина серія трифазних двигунів передбачає їх виготовлення з номінальною напругою 10 кВ, починаючи з потужності 500 кВт. Оскільки при використанні напруги 660 В, двигуни можуть виготовлятися потужністю до 600–700 кВт, то в більшості випадків можна буде відмовитися від проміжної напруги 6 кВ, яку доводиться вводити в схеми електропостачання з напругою джерела живлення 10,5 кВ. Експлуатаційна вартість втрат високовольтних двигунів, грн./рік:

$$B_{ДВ} = (1 - \eta_{де}) \cdot W T_{макс} C,$$

де W – завантаження двигунів, кВт; $T_{макс}$ – річне число використання максимуму навантаження, год./рік; $\eta_{де}$ – коефіцієнт корисної дії двигунів, в. о.; C – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт*год.

Отже, можна зробити висновок, що вартість втрат залежить в основному від показника ККД двигуна. Вартість електродвигунів з номінальною напругою 10 кВ на 20 % вища за вартість електродвигунів з номінальною напругою 6 кВ, ККД електродвигунів напругою 10 кВ в середньому на 1% менший ніж двигунів на 6 кВ. Стандартний ряд потужностей приводів на 10 кВ істотно менше ніж на 6 кВ. Внаслідок переведення двигунів з номінальною напругою 6 кВ двигуни потужністю до 300–350 кВт повинні бути замінені або (при нагоді) перемотані для роботи з номінальною напругою 380–660 В, а для живлення більш потужних двигунів потрібно встановити трансформатори 10/6 кВ.

Слід зазначити, що переведення мереж з 6 на 10 кВ полегшується тим, що трансформатори потужністю 630 кВА і вище з номінальною напругою 6 і 10 кВ виконуються так, що для переведення на напругу 10 кВ не потрібна заміна обмоток вищої напруги. Отже, переведення підземних розподільних мереж на напругу 10 кВ з погляду забезпечення живленням дільничних споживачів напругою до 1000 В практично не пов'язане з додатковими витратами, проте і не пов'язане з підвищенням ефективності саме цих ділянок системи електропостачання. Вказані заходи при переведенні на клас напруги 10 кВ пов'язані з додатковими витратами на придбання, монтаж і ремонт додаткових електроустановок і обладнання, у кожному конкретному випадку питання повинно роз-

в'язуватися шляхом техніко-економічних розрахунків з урахуванням місцевих умов і термінів отримання додаткового електрообладнання.

Останнім параметром підземної мережі є кабельні лінії, при їх виборі слід зауважити, що кабелі напругою 10 кВ дещо дешевші, але кабелі напругою 35 кВ потребують меншої кількості та перерізу жил.

Вартість втрат електричної енергії в кабельних лініях, грн./рік:

$$B_{КЛ} = \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3},$$

де S – розрахункове навантаження, кВА; U – робоча напруга, кВ; L – довжина ліній, м; F – переріз жили кабелю, мм²; G – питома провідність жили кабелю, м/Ом*мм²; k – кількість струмопровідних жил; C – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт*год. (для 1 класу (35 кВ) – 1,03 грн./кВт*год., для 2 класу (6-10 кВ) – 1,25 грн./кВт*год. без ПДВ) [8]; τ – річний час максимальних втрат, год./рік.

Для типових графіків навантаження час найбільших втрат:

$$\tau = (0,124 + T^{-4})^2 \cdot 8760,$$

де T – час використання максимального навантаження, Т=5000 год. [9].

З урахуванням вказаних припущень, вирази для визначення вартості на побудову та експлуатацію системи електропостачання відповідного класу напруги, матимуть вид: для класу напруги 6 кВ

$$C_{6\text{ кВ}} = \left[(E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^6 L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right];$$

для класу напруги 10 кВ

$$C_{10\text{ кВ}} = \left[(E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^{10} L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right] + n_{mn} \left[(E_H + P_a) K_{mn} + (\Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau) \cdot C \right];$$

для класу напруги 35 кВ

$$C_{35\text{ кВ}} = \left[(E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^{35} L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right] + n_{mn} \left[(E_H + P_a) K_{mn} + (\Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau) \cdot C \right].$$

За наведеними виразами було виконано розрахунок вартості передачі електричної енергії споживачам відповідного горизонту (рис. 1).

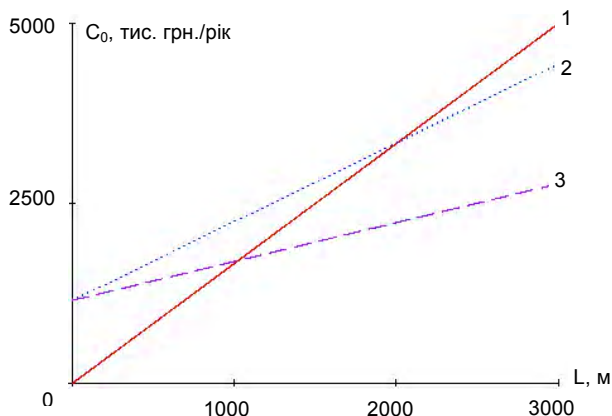


Рисунок 1 – Вартість побудови та експлуатації системи передачі електричної енергії при відповідному класі робочої напруги: 1 – клас напруги 6 кВ; 2 – клас напруги 10 кВ; 3 – клас напруги 35 кВ.

З графіка можна зробити висновок, що доцільність використання класу напруги 35 кВ виникає при глибині біля 1000 м та глибше, в залежності від рівня потужності, а доцільність використання класу напруги 10 кВ зовсім сумнівна, через низький ефект.

ВИСНОВКИ

1. Вибір доцільного класу робочої напруги для передачі електричної енергії на відповідну глибину необхідно виконувати за техніко-економічними показниками. В цілому для шахти, переведення системи внутрішнього підземного електропостачання на напругу 10 кВ з позиції заміни приводів шахтних машин і установок є недоцільною.

2. Клас напруги 10 кВ недоцільно використовувати в умовах глибоких та енергоємних шахт при реконструкції системи електропостачання та переведенні на більш високий рівень напруги.

3. При реконструкції підземних систем електропостачання діючих підприємств в умовах постійного збільшення глибини виробок та навантаження доцільно стовбурні мережі довжиною більше 1000 м виконувати класом напруги 35 кВ, не змінюючи напруги розподільної мережі (6 кВ).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров; Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Энергия, 1972. – 416 с. ил.
2. Marinovic N. Electrotechnology in Mining / N. Marinovic; Rudarska elektrotehnika. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1990. – 613 p.
3. Шишкин Н. Ф. Основне направления электрификации современных шахт / Н. Ф. Шишкин, В. Ф. Антонов // М.: Наука, 1981. – 116 с.
4. Шкрабець Ф. П. Електропостачання глибоких і енергоємних рудних та вугільних шахт: монографія / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук; Мін-во освіти та науки України; Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2014. – 160 с.
5. Пивняк Г. Г. Перспективы повышения номинальных напряжений электрической сети в системе электроснабжения угольных шахт. / Г. Г. Пивняк, Ю. Т. Разумный, А. В. Рухлов // Энергосбережение, Донецк, – 2008. – № 3. – С. 9–11.
6. Шкрабець Ф. П. Технічні аспекти виконання систем електропостачання глибоких енергоємних шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 1 (27), 2014. – С. 162–176.
7. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. Энергосистемы и электрические сети: ГКД 340.000.002-97: Утверждены приказом Минэнерго Украины от 20.01.97 № 1ПС и введены в действие с 01.01.98. – Киев, 1997. – 54 с.
8. Постанова НКРЕКП України від 25.11.2014 № 380.
9. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик. – М.: Минтопэнерго РФ, 1993. – 115 с.

*Стаття надійшла до редакції 20.05.2015
Після доробки 10.06.2015*

Шкрабець Ф. П.¹, Остапчук А. В.², Кожевников А. В.³, Акулов А. В.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

⁴Ассистент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАБОЧИХ ГОРИЗОНТОВ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Выполнен анализ показателей, влияющих на экономическую целесообразность применения класса напряжения 35 кВ для глубоких энергоёмких шахт при их реконструкции. Разработана методика подсчета экономической эффективности подземной системы электроснабжения, влияние электроприемников на экономич-

ность эксплуатации, а также отмечена низкая эффективность использования класса напряжения 10 кВ для питания глубоких горизонтов шахт.

Ключевые слова: шахта, подземная система электроснабжения капитальные и эксплуатационные затраты, класс напряжения.

Shkrabets F. P.¹, Ostapchuk O. V.², Kozhevnikov A. V.³, Akulov A. V.⁴

¹Head of the department of renewable energy sources, State Higher Educational Institution «National Mining University», Doctor of Technical Sciences, Professor

²Assistant professor of renewable energy sources department, State Higher Educational Institution «National Mining University», Ph.D.

³Assistant professor of Automation and Computer Systems department, State Higher Educational Institution «National Mining University», Ph.D

⁴Assistant of renewable energy sources department, State Higher Educational Institution «National Mining University»

TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF OPTIMAL VOLTAGE LEVEL FOR THE POWER SUPPLY OF DEEP MINE OPERATING HORIZONS

The most perspective option for possible deep mine power supply is the one with the deep input of 35 kV voltage by installing of underground 35kV/6 kV substation. This option is caused by the expected level of electrical loads, provided by mine development, the power consumers' deep layout (considering the distance from the source to the shaft on the surface and from the shaft to the underground substation chamber) and primary and the most responsible power consumers (blind shaft lifting devices, drives of water pumping facilities) near-shaft concentration. Furthermore, this option provides further mine development and excludes the impact (and connection in an ordinary operation mode) of existing underground mine power supply system. This option is the most appropriate in terms of economic efficiency in the deep mines reconstruction (effectiveness observed at a depth of 1000 m), also the 6 kV voltage class implementation inexpedience for the shown conditions is noticed. The economic operation efficiency of the main electric equipment types of 6 and 10 kV voltage classes is determined, the impact indexes on their work efficiency are noted.

Key words: mine, underground power supply system, capital and operating costs, voltage class.

REFERENCES

1. Fedorov A. A. Osnovyi elektrosnabzheniya promyshlenniyh predpriyatiy. Izd. 2-epererab. idop. Moscow, Energiya, 1972, 416 s.
2. Marinovic N. Electrotechnology in Mining. Rudarska elektrotehnika, Amsterdam. Elsevier Science Publishers B.V., 1990, 613 p.
3. Shishkin N. F. Osnovnyie napravleniya elektrifikatsii sovremennyih shah. Moscow, Nauka, 1981, 116 s.
4. Shkrabets F. P., Ostapchuk O. V. Elektropostachannya glibokih I energoEmnih rudnih ta vuglnih shaht: monograflya. MIn-voosvIti ta nauki UkraYini; Nats. gIrn. un-t, NGU, 2014, 160 s.
5. Pivnyak G. G., Razumnyiy Yu. T., Ruhlov A. V. Perspektivy povyisheniya nominalnyih napryazheniy elektricheskoy seti v sisteme elektrosnabzheniya ugolnyih shaht. Energoberezhenie, Donetsk, 2008, No 3, S. 9–11.
6. Shkrabets F. P., Ostapchuk O. V. TehnIchnI aspekti vikonannya system elektropostachannya glibokih energoEmnih shaht. *NaukovI pratsI Donetskogo natsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu. SerIya: «Glrnicho-elektromehanIchna»*. Vipusk 1 (27), 2014, S. 162–176.
7. Metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti kapitalnyih vlozheniy v energetiku. Energosistemyi I elektricheskije seti: GKD 340.000.002-97: Utverzhdenyi prikazom Minenergo Ukrainyi ot 20.01.97 #1PS I vvvedenyi v deystvie s 01.01.98, Kiev, 1997, 54 s.
8. Postanova NKREKP UkraYinivId 25.11.2014 #380.
9. Instruktsiya po proektirovaniyu elektroustanovok ugolnyih shaht, razrezov, obogatitelnyih I briketnyih fabric, Moscow, Mintopenergo RF, 1993, 115 s.