

Sergiusz BORON  
Politechnika Śląska, Gliwice

## KRYTERIA EKONOMICZNE DOBORU GÓRNICZYCH KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wybrane zagadnienia analizy ekonomicznej doboru górniczych kabli średniego napięcia. Koszt eksploatacji linii kablowych zależy m.in. od wielkości strat powstających podczas przesyłu energii elektrycznej. Straty te można zmniejszyć dobierając kabel o większym przekroju żył roboczych. W referacie zaprezentowano czynniki wpływające na koszty eksploatacyjne linii kablowych oraz przedstawiono kryteria doboru kabli, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów ekonomicznych.

## ECONOMICAL CRITERIA OF THE MINING POWER CABLES SELECTION

**Summary.** Some of the economical criteria of the mining power cables selection have been discussed. Annual cost of the power cable installation depends mainly on the cost of losses. Losses occur with the transmission of electrical energy through cables. These losses can be reduced by selecting a cable with larger cross-sectional area. Factors deciding on the annual cost of cable lines operation has been presented.

### 1. Wprowadzenie

Kable górnicze stanowią jeden z najbardziej niewralgicznych elementów układu elektroenergetycznego kopalni. Podczas doboru i eksploatacji kabli najistotniejsze są ich właściwości z punktu widzenia pewności ruchowej oraz bezpieczeństwa eksploatacji. Wysokie koszty jednostkowe kabli elektroenergetycznych, sięgające kilkuset tysięcy złotych za kilometr, sprawiają jednak, że sieci kablowe mają również istotny wpływ na wskaźniki ekonomiczne zakładów górniczych. Nieprawidłowy dobór typu kabla do konkretnego

zastosowania może sprawić, że koszt eksploatacji linii kablowej będzie wysoki z uwagi na straty mocy powstające w żyłach roboczych oraz w izolacji, a także ze względu na konieczność dokonywania częstych napraw lub nawet wymiany odcinków kabli. Obecnie dopuszczonych do stosowania w górnictwie jest kilkadziesiąt różnych typów kabli elektroenergetycznych, znajdujących się w ofercie producentów. Zagadnienia związane z doбором typu kabla z uwagi na wymagania bezpiecznej i niezawodnej pracy były już przedmiotem wielu opracowań. Niniejszy referat ma na celu przeprowadzenie podobnej analizy z punktu widzenia wybranych aspektów ekonomicznych.

## 2. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne linii kablowych

Przy rozpatrywaniu ekonomicznych kryteriów doboru kabli elektroenergetycznych należy wziąć pod uwagę zarówno koszty związane z budową linii kablowej (koszty inwestycyjne), jak i koszty związane z jej użytkowaniem (koszty eksploatacyjne). Spośród czynników wpływających na koszt budowy linii kablowej należy wymienić m.in.:

- koszt zakupu kabla,
- koszt transportu kabla do miejsca zainstalowania,
- koszty związane z ułożeniem kabla,
- koszt dodatkowych akcesoriów linii kablowej (uchwyty, zakończenia itp.).

W trakcie eksploatacji linii kablowej występują koszty związane m.in. z:

- amortyzacją początkowego nakładu inwestycyjnego,
- stratami mocy spowodowanymi przepływem prądu obciążenia przez żyły robocze,
- stratami dielektrycznymi w izolacji,
- stratami wynikającymi wskutek zasilania odbiorników napięciem zmniejszonym o spadek napięcia w kablu,
- koniecznością wykonywania napraw i remontów linii oraz innych czynności związanych z utrzymaniem linii kablowej.

Niektóre z wymienionych czynników kształtujących całkowity koszt budowy i eksploatacji linii wzrastają wraz z wartością przekroju żył roboczych kabla (np. cena kabla, koszt jego transportu i ułożenia, a także, w mniejszym stopniu, koszt osprzętu). Z kolei, niektóre z kosztów (związane z przepływem prądu obciążenia) maleją wraz ze wzrostem przekroju żył.

### 3. Kryteria doboru kabli

Podstawowym kryterium doboru kabli elektroenergetycznych jest obciążalność prądowa długotrwała. Decydujący wpływ na jej wartość ma konstrukcja kabla, a w szczególności rezystancja żył, zależna od rodzaju materiału, z którego są wykonane (miedź lub aluminium), i ich przekroju, oraz wartość temperatury dopuszczalnej długotrwałe materiał izolacyjny. Mniejszy wpływ na obciążalność mają pozostałe elementy konstrukcyjne, np. ekrany indywidualne i ogólny oraz pancierz, a także warunki ułożenia kabla – temperatura pomieszczenia, obecność w pobliżu kabla innych przewodów itp. Współcześnie produkowane kable górnicze posiadają żyły robocze wykonane z miedzi oraz izolację wykonaną z polwinitu lub polietylenu usieciowanego. Wymagania dotyczące spadków napięcia podczas pracy ustalonej i w stanach niestabilnych oraz warunków zwarciovych mogą przyczynić się do konieczności skorygowania (zwiększenia) przekroju żył roboczych. W praktyce projektowej z reguły dąży się do tego, aby dobrać kabel o najmniejszym z możliwych przekrojów żył (uwzględniając aktualne i przyszłe obciążenie kabla oraz układ sieci elektroenergetycznej). Takie podejście daje wiele korzyści, z których można wymienić:

- niższy koszt kabla o mniejszym przekroju żył roboczych,
- łatwiejszy transport i układanie,
- niższy koszt osprzętu i napraw,
- mniejsza masa, średnica zewnętrzna i promień zgięcia,
- mniejsze wartości prądów ziemnozwarciowych.

Szczególnie istotna jest ostatnia z wymienionych korzyści, gdyż ona bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo pracy układu elektroenergetycznego, zwłaszcza w przypadku kabli o izolacji wykonanej z polwinitu, charakteryzujących się dużymi wartościami jednostkowych prądów ziemnozwarciowych.

Jak już wspomniano, zwiększenie przekroju znamionowego żył roboczych kabla powoduje zmniejszenie kosztów związanych ze stratami mocy w żyłach oraz kosztów związanych z zasilaniem urządzeń napięciem obniżonym wskutek spadków napięć. Przy analizie kosztów należy wziąć pod uwagę fakt, że kable elektroenergetyczne średniego napięcia są zwykle eksploatowane przez stosunkowo długi okres (20-30 lat) i sumaryczny koszt strat powstałych w tak długim czasie może być znaczny. Należy podkreślić fakt, że dobór kabla o zwiększonym przekroju żył roboczych powoduje konieczność poniesienia większych kosztów inwestycyjnych, co może być problematyczne dla zakładów znajdujących

się w nienajlepszej kondycji finansowej. Z oczywistych względów pełna analiza ekonomiczna poprzedzająca dobór kabla jest utrudniona, m.in. ze względu na brak informacji dotyczących kształtowania się przyszłego obciążenia kabla, cen energii elektrycznej itp.

#### 4. Czynniki wpływające na wielkość strat przy przesyłach energii

Straty mocy powstające podczas eksploatacji kabli elektroenergetycznych powodowane są wydzielaniem ciepła w żyłach roboczych wskutek przepływu prądu obciążenia oraz, w mniejszym stopniu, stratami dielektrycznymi w izolacji. Warto dodać, że prąd obciążenia kabla wynika nie tylko z poboru mocy czynnej przez odbiorniki, ale również z przepływu mocy biernej. Z tego względu kompensacja mocy biernej powoduje zmniejszenie strat przesyłowych, pod warunkiem że zostanie ona przeprowadzona w pobliżu odbiorników. Zastosowanie kompensatorów w pobliżu transformatorów zasilających sieć SN poprawia wprawdzie współczynnik mocy na przyłączy, ale nie zmniejsza strat przesyłowych w układzie elektroenergetycznym zakładu przemysłowego. Ciepło w kablu może być wytworzone również wskutek przepływu prądów wirowych i wyrównawczych przez inne przewodzące elementy (ekrany, pancerze), jednakże w kablach trójżyłowych obciążonych symetrycznie straty te są pomijalnie małe [1]. Straty w żyłach roboczych zależą od rezystancji żyły oraz wartości prądu obciążenia kabla. Rezystancja żyły miedzianej zależy od jej przekroju i temperatury, przy czym dla większych przekrojów należy dodatkowo uwzględnić zjawisko naskórkowości i efekt zbliżenia. Żyły o mniejszym przekroju mają większą rezystancję i przy takim samym prądzie obciążenia straty powodowane jego przepływem są większe w porównaniu z żyłami o większym przekroju. Straty dielektryczne w izolacji zależą od napięcia znamionowego względem ziemi, pojemności doziemnej kabla oraz współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg } \delta$ . Współczynnik  $\text{tg } \delta$  zależy od materiału z którego wykonana jest izolacja, przy czym jego wartość dla polwinitu wynosi 0,1, natomiast dla polietylenu usieciowanego 0,004. Z tego względu, w kablach na napięcie fazowe mniejsze niż 63,5 kV o izolacji z polietylenu usieciowanego, strat dielektrycznych w izolacji nie uwzględnia się [2]. Jak wynika z obliczeń [1], w kablach na napięcie 3,6/6 kV o izolacji polwinitowej, przy obciążeniu prądem dopuszczalnym długotrwale straty dielektryczne w izolacji stanowią 1÷2% strat w żyłach roboczych. Przy mniejszym obciążeniu prądowym udział strat w izolacji zwiększa się. Warto zaznaczyć, że w kablach z ekranami indywidualnymi straty dielektryczne

w izolacji są większe niż w kablach nieekranowanych, co wynika z ich większej pojemności doziemnej.

## 5. Ekonomiczny dobór kabli

Koszt strat powstających podczas przesyłu zależy od ceny energii elektrycznej. Cena ta dla odbiorców przemysłowych uzależniona jest od tzw. strefy czasowej (szczyt przedpołudniowy, szczyt popołudniowy oraz pozostałe godziny doby), przy czym godziny obowiązywania poszczególnych stref czasowych zależne są od pory roku. Średnia cena energii elektrycznej (łącznie z opłatą przesyłową) w obliczeniach przeprowadzonych w niniejszej pracy została przyjęta jako 218,81 zł/MWh (dla odbiorców z grupy taryfowej A23) [3]. Dla zobrazowania wielkości rocznych kosztów strat powstających w 1 km kabla podczas przesyłu energii elektrycznej w tabelicy 1 przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych, przy założeniu że kabel w ciągu całego rozpatrywanego okresu obciążony jest prądem równym obciążalności długotrwałej. Obliczenia wykonano dla kabla o izolacji z polietylenu usieciowanego (XS); w poszczególnych kolumnach tabelicy zestawiono przekrój znamionowy żył roboczych  $s$ , obciążalność prądową długotrwałą  $I_{dd}$ , moc strat w 1 km kabla  $\Delta P$ , koszt tych strat  $K_{\Delta P}$ , a także koszt 1 km nowego kabla  $K_k$  wg [4] oraz stosunek  $K_k/K_{\Delta P}$ .

Tablica 1  
Koszty strat w odcinku kabla typu YHKGXSekyn o długości 1 km  
obciążonego prądem dopuszczalnym długotrwałe

$s$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_{dd}$ [A]	$\Delta P$ [kW]	$K_{\Delta P}$ [zł]	$K_k$ [zł]	$K_k/K_{\Delta P}$
35	176	20,7	39 671	100 504	2,5
50	209	21,6	41 316	124 868	3,0
70	259	22,9	43 939	145 477	3,3
95	314	24,3	46 508	187 108	4,0
120	359	25,1	48 194	220 982	4,6
150	408	26,3	50 450	251 337	5,0
185	466	27,4	52 597	283 139	5,4

Jak wynika z danych przedstawionych w tabelicy, już po kilku latach eksploatacji koszt strat może przekroczyć nakład inwestycyjny poniesiony przy zakupie kabla. Przy długim okresie użytkowania linii koszty strat mogą wielokrotnie przewyższyć koszt zakupu kabla. Kable elektroenergetyczne należą do tych składników majątku zakładów przemysłowych,

które można zaliczyć do środków trwałych i z tego względu podlegają one odpisom amortyzacyjnym. Jak już wspomniano we wcześniejszej części pracy, zastosowanie droższego kabla o większym przekroju żył roboczych powoduje mniejsze straty powstające podczas przesyłu danej wartości mocy. Można więc mówić o ekonomicznym warunku doboru przekroju żył roboczych kabla sformułowanym następująco: **suma rocznych kosztów wynikających z amortyzacji, utrzymania linii oraz strat mocy powinna być jak najmniejsza.**

Koszt rocznego utrzymania linii kablowej, obejmujący m.in. naprawy uszkodzeń, jest trudny do przewidzenia i w praktycznych obliczeniach przyjmuje się, że wynosi on ok. 1% ceny kabla [5]. Do czynników określających roczną amortyzację linii kablowej zalicza się koszt inwestycyjny, koszt utrzymania linii oraz stawkę amortyzacyjną zależną m.in. od całkowitego (przewidywanego) czasu eksploatacji linii i sytuacji na rynku kapitałowym. W przykładowych obliczeniach przeprowadzonych w niniejszej pracy przyjęto wartość stawki amortyzacyjnej równą 8%.

## 6. Przykład obliczeniowy

Dla zilustrowania analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy wykonano przykładowe obliczenia ekonomicznego doboru przekroju znamionowego żył roboczych kabla, przy założeniu że linią o napięciu znamionowym 6 kV przesyłana będzie moc pozorna równa 1 MVA, co odpowiada wartości prądu obciążenia 96 A. Dla uproszczenia założono, że w ciągu rozpatrywanego okresu czasu (1 rok) wartość prądu w kablu nie zmienia się. Obliczenia przeprowadzono dla kabli o izolacji wykonanej z polietylenu usieciowanego (YHKGXSekyn) oraz z polwinitu (YHKGYekyn) dla zakresu przekrojów żył roboczych od 35 do 185 mm<sup>2</sup>. W tablicy 2 przedstawiono roczne koszty strat  $K_{\Delta P}$  dla kabli typu YHKGXSekyn, natomiast w tablicy 3 dla kabli typu YHKGYekyn. W przypadku kabla o izolacji polwinitowej poza stratami w żyłach  $\Delta P_z$  w obliczeniach uwzględniono również wielkość strat dielektrycznych w izolacji  $\Delta P_i$ .

Jak wynika z danych zawartych w tablicy 3, udział strat dielektrycznych w izolacji zwiększa się wraz z przekrojem żył i osiąga ponad 30% wielkości strat w żyłach roboczych dla przekroju 185 mm<sup>2</sup> (wynika to z relatywnie niewielkiego obciążenia prądowego w odniesieniu do obciążalności długotrwałej). Sumaryczny roczny koszt eksploatacji linii

kablowej jest sumą kosztów wynikających z amortyzacji (8% ceny kabla), utrzymania linii (1% ceny kabla) oraz kosztów wynikających ze strat. Dwa pierwsze z powyższych składników zwiększają się wraz ze wzrostem przekroju żył, natomiast straty maleją.

Tablica 2  
Roczne koszty strat powstających w 1 km kabla  
typu YHKGXSekyn dla mocy przesyłanej 1 MVA

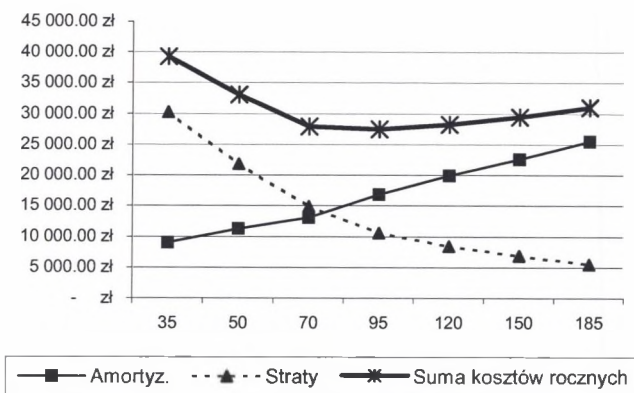
$s$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_{dd}$ [A]	$\Delta P$ [kW]	$K_{\Delta P}$ [zł]
35	176	15,8	30 209
50	209	11,4	21 830
70	259	7,7	14 850
95	314	5,5	10 605
120	359	4,4	8 398
150	408	3,6	6 832
185	466	2,9	5 528

Tablica 3

Roczne koszty strat powstających w 1 km  
kabla typu YHKGYekyn dla mocy przesyłanej 1 MVA

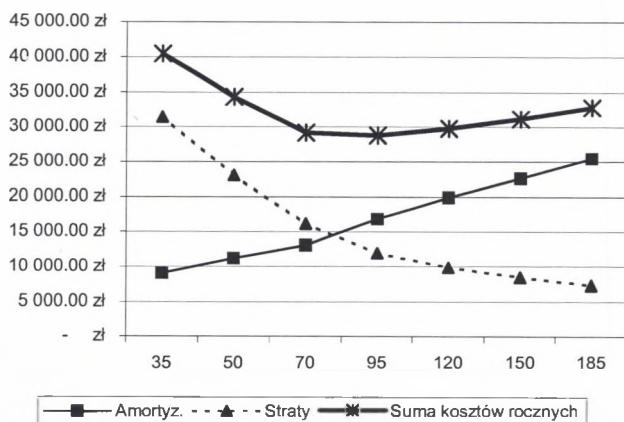
$s$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_{dd}$ [A]	$\Delta P_z$ [kW]	$\Delta P_i$ [kW]	$\Sigma \Delta P$ [kW]	$K_{\Delta P}$ [zł]
35	141	15,9	0,5	16,4	31 397
50	168	11,5	0,6	12,1	23 036
70	209	7,8	0,6	8,4	16 110
95	254	5,5	0,7	6,2	11 985
120	292	4,4	0,8	5,2	9 895
150	331	3,6	0,9	4,5	8 474
185	380	2,9	0,9	3,8	7 293

Na rys. 1 i 2 przedstawiono zależność sumarycznego kosztu eksploatacji linii kablowej od przekroju żył roboczych dla kabli YHKGXSekyn oraz YHKGYekyn. Jak wynika z wykresów, optymalny pod względem ekonomicznym jest dobór kabla o przekroju żył roboczych 70 lub 95 mm<sup>2</sup> (z uwagi na obciążalność prądową długotrwałą wystarczający jest przekrój 35 mm<sup>2</sup>). W przypadku doboru droższych kabli (np. opancerzonych) minimum sumarycznych rocznych kosztów występuje dla mniejszego przekroju, podobna sytuacja ma miejsce wtedy, gdy obciążenie prądowe kabla lub roczny czas użytkowania kabla jest mniejszy.



Rys. 1. Sumaryczny roczny koszt eksploatacji kabla typu YHKGXSekyn w zależności od przekroju żył roboczych

Fig. 1. Total annual cost of YHKGXSekyn cable installation as a function of the cross-sectional area



Rys. 2. Sumaryczny roczny koszt eksploatacji kabla typu YHKGYekyn w zależności od przekroju żył roboczych

Fig. 2. Total annual cost of YHKGYekyn cable installation as a function of the cross-sectional area

## 7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń można sformułować następujące wnioski i uwagi końcowe:

- straty energii w kablu są istotnym czynnikiem kształtującym koszt eksploatacji linii,
- straty energii wynikają głównie z nagrzewania żył prądem obciążenia, ale istotne znaczenie mogą mieć również straty dielektryczne w izolacji,



- dobór optymalnego, z uwzględnieniem czynników ekonomicznych, przekroju żył kabli zależy w dużej mierze od kosztów strat energii w kablu,
- dokładność analizy ekonomicznej może być ograniczona brakiem wiedzy na temat przyszłych kosztów energii elektrycznej, sytuacji na rynku kapitałowym oraz kształtowania się obciążenia kabla,
- koszty wynikające ze strat energii w kablu można ograniczyć również poprzez odpowiednią kompensację mocy biernej,
- decyzje doboru kabla o większym przekroju żył roboczych muszą być podejmowane z uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa eksploatacji sieci; w szczególności należy uwzględnić możliwość zwiększenia się prądów ziemnozwarciowych,
- możliwości zastosowania kabli o zwiększonym przekroju żył roboczych mogą być ograniczone złą sytuacją finansową zakładu.

## LITERATURA

1. Boron S.: Model matematyczny procesów cieplnych zachodzących w górniczych kablach i przewodach oponowych i jego zastosowanie do analizy obciążalności prądowej. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Gliwice 1999.
2. Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor). IEC Publ. 287. 1982.
3. Taryfa dla energii elektrycznej Górnosląskiego Zakładu Elektroenergetycznego SA z siedzibą w Gliwicach. Gliwice 2003.
4. Tele-fonika Kable SA Cennik wyrobów, kwiecień 2004.
5. Heinhold L.: Power Cables and their Application. Siemens Aktiengesellschaft, 1990.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

## Abstract

Total cost of a cable installation consist of the installation costs and additional costs which occur mainly due to losses. The economical solution is to select a cable which has the least overall cost. Power losses due to operating current as well as dielectric losses (in cables with PVC insulation) must be considered. Increasing a cross-sectional area rises investement

---

costs of cable system, therefore only mines in good financial condition can afford this. The accuracy of the economical analysis can be limited by the lack of the knowledge of the future energy cost, load of the cable etc. It must be noticed, that the larger cross-sectional area increases earth-fault current, therefore in some cases it can have negative effect on the safety.