

*Jan Marianowski\*, Tomasz Cieśla\**

## EFEKTYWNOŚĆ MODERNIZACJI PARKU MASZYNOWEGO W ŚWIETLE ZUŻYCIA ENERGII CZYLI HISTORIA KOPALNI SUROWCÓW SKALNYCH PISANA DŻULAMI

---

### 1. Wprowadzenie

Technologia pozyskiwania surowców mineralnych wiąże się z niszczeniem ich struktury (wiercenie, odpajanie, rozdrabianie i in.). Każdy proces technologiczny winien uwzględniać właściwości skał. Odmienność tych procesów wymaga badań skorelowanych z konkretną technologią, dlatego też na przestrzeni lat wyłoniła się mnogość badanych cech, które w odróżnieniu od podstawowych noszą nazwę technologicznych. Niektóre z nich niewiele mają wspólnego z właściwościami fizycznymi i są raczej wynikiem pewnych operacji dokonywanych na materiale skalnym w określonych urządzeniach (przyrządach). Już z metodyki badań wynika, że wyznaczanie tych cech w większości przypadków nie jest łatwe. Dane liczbowe o właściwościach skał są najczęściej rozproszone i niekompletne [1].

Uzależnienie cech technologicznych od innych właściwości fizycznych skał dla celów porównawczych lub ich określenia (prognozowania) jest bez uciążliwych badań bardzo trudne lub wręcz nieosiągalne ze względu na odmienność metodyk badań, różnorodność kryteriów oceny i dużą zmienność wyników. Ostatni czynnik zmusza do uśredniania wyników przy szerszym (ogólniejszym) traktowaniu cech lub ich współzależności.

W celu stworzenia platformy porównawczej niezbędne jest jednolite ujęcie właściwości skał, z wykorzystaniem wspólnego kryterium. Takim kryterium jest energochłonność [6], czyli ilość włożonej energii w wykonanie określonej pracy (ustalenie cech skał, realizacja procesów technologicznych).

Jak wykazały dotychczasowe badania — najbardziej czułym i uniwersalnym kryterium oceny technologicznych procesów górniczych jest jednostkowa energia ich realizacji. Na każdą zmianę zaistniałą w procesie technologicznym jednostkowa energia reaguje jedno-

---

\* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

znacznie i obiektywnie. Dzięki możliwości wykorzystania tego samego kryterium energetycznego do oceny różnych (często nawet nieporównywalnych) procesów staje się realna ocena całych ciągów technologicznych. Energetyczne traktowanie procesów wymaga znajomości wybranych cech skał w tym zakresie.

## 2. Identyfikacja wybranych procesów technologicznych w urabianiu surowców skalnych

### 2.1. Wiercenie

Urabianie skały w procesie wiercenia odbywa się poprzez wnikanie w caliznę skalną odpowiednio ukształtowanych ostrzy narzędzi potocznie zwanych koronkami. Wiercenie opiera się na ciągłym odsłanianiu powierzchni calizny skalnej w określonym geometrycznie obszarze, którym jest umownie walec i w którym kolejne osłaniane powierzchnie skały usytuowane są wzdłuż osi tego walca. Zgodnie z hipotezą Rittingera energia niezbędna w tym procesie jest proporcjonalna do nowo powstałej powierzchni. Jeśli tę proporcjonalność odniesiemy do jednostki objętości wytwarzanych okruchów skalnych to otrzymamy związek jednostkowej energii urabiania wierceniem z podstawowymi wymiarami powstających ziaren skalnych [10].

Dla wiercenia obrotowego

$$e_{WIERC\_OBROTOW} \cong \left( \frac{1}{\Delta d_1} + \frac{2}{D_0 / 2} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- $e_{WIERC\_OBROTOW}$  — jednostkowa energia urabiania skały wierceniem obrotowym,
- $\Delta d_1$  — wymiar ziarna (grubość),
- $D_0$  — średnica wierconego otworu.

Podstawową postacią energii, która jest zamieniana na pracę urabiania przez koronkę skrawającą jest energia potencjalna związana ze skruceniem i ściśnięciem przewodu wiertniczego. Umożliwia to określenie energochłonności (1) procesu wiercenia obrotowego koronką skrawającą jako prostej sumy algebraicznej odpowiednio dwóch składników

$$e_{WIERC\_OBROTOW} = \frac{F_d}{A} + \frac{2\pi M}{Ap} \quad (2)$$

gdzie:

- $F_d$  — siła docisku,
- $M$  — moment obrotowy mechanizmu obrotowego,

- $p$  — jednostkowy posuw,  
 $A$  — powierzchnia przekroju wierconego otworu.

Dla wiercenia obrotowo-udarowego

$$e_{WIERC\_UDAR} \cong \left( \frac{1}{\Delta d_1} + \frac{1}{2\Delta d_2} + \frac{2}{D_0/2} \right) \quad (3)$$

W wierceniu obrotowo-udarowym ruch ostrzy koronki w kierunku calizny skalnej spowodowany jest ściskającą falą naprężeń. Każde z kolejnych wnikięć ostrzy w skałę przedstawiane jest o określony kąt, dzięki czemu wytwarzana jest sukcesywnie oraz wykorzystywana uprzywilejowana geometria dna otworu wiertniczego.

Oprócz energii potencjalnej skręcenia i ściśnięcia przewodu wiertniczego w wierceniu obrotowo-udarowym wykorzystywana jest przede wszystkim energia fali naprężeń nazywana często energią uderzenia.

Postępując analogicznie jak w przypadku wiercenia obrotowego, energochłonność (3) wiercenia obrotowo-udarowego można określić analogicznie do (2) jako algebraiczną sumę odpowiednio trzech składników

$$e_{WIERC\_UDAR} = \frac{F_d}{A} + \frac{E_u i}{Ap} + \frac{2\pi M}{Ap} \quad (4)$$

gdzie:

$e_{WIERC\_UDAR}$  — jednostkowa energia urabiania skały wierceniem obrotowo-udarowym,

$\Delta d_2$  — wymiar ziarna (szerokość),

$E_u$  — energia uderzenia mechanizmu udarowego,

$i$  — liczba uderzeń mechanizmu udarowego,

pozostałe dane jak w (2).

## 2.2. Strzelanie

Drugim ogniwem technologicznym eksploatacji skał zwięzłych jest ich urabianie z zastosowaniem MW. Urabianie skał wybuchem, będące samo w sobie skomplikowanym procesem, powinno zapewnić dogodne warunki dla kolejnego procesu — ładowania urobku koparkami łyżkowymi lub ładowarkami przy uwzględnieniu własności urabianego górotworu. Aby odstrzał w górotworze spełnił z góry postawione wymagania pod względem rozdrobienia, do urabianej objętości górotworu powinna być wniesiona w odpowiednim czasie odpowiednia energia. Wyznaczenie w sposób jednoznaczny tej energii sprowadza obliczenia pozostałych parametrów strzelania, przy znanej średnicy otworów strzałowych.

Podstawowy energetyczny warunek rozdrabiania można zapisać następująco [2, 3, 7]

$$e_{STRZEL} = e_u K_1 K_2 R \quad (5)$$

gdzie:

- $e_{STRZEL}$  — energochłonność strzelania,
- $e_u$  — energia właściwa rozdrobnienia,
- $K_1$  — współczynnik kształtu brył,
- $K_2$  — współczynnik anizotropii własności skały,
- $R$  — stopień rozdrobnienia,  $R = D / d$ ,
- $D, d$  — odpowiednio średnia bryła ośrodka skalnego przed i po urobieniu.

### 2.3. Energochłonność załadunku

Energochłonność załadunku jest zależna zasadniczo tylko od typu koparki lub ładowarki oraz od cech urobku i można ją określić jako równą [2, 5]

$$e_{ZALAD} = \frac{k_R e^{C_2 d_U}}{(C_3 k_R - C_4) \gamma} \quad (6)$$

gdzie:

- $e_{ZALAD}$  — energochłonność załadunku,
- $e$  — podstawa logarytmu naturalnego,
- $k_R$  — współczynnik rozluźniania,
- $d_U$  — średnia bryła w usypie,
- $C_2, C_3, C_4$  — wielkości stałe zależne od typu koparki lub ładowarki.

### 2.4. Energochłonność transportu samochodowego

Energochłonność transportu samochodowego nie zależy w istotny sposób od średniej bryły urobku [6], lecz jest w zasadzie wielkością stałą uwarunkowaną rodzajem transportu i drogą przewozu właściwą dla konkretnych warunków kopalni

$$e_{TRANSPORT} = \text{const} \quad (7)$$

gdzie  $e_{TRANSPORT}$  oznacza energię jednostkową transportu samochodowego.

### 2.5. Energochłonność rozdrabiania wstępnego

Energochłonność rozdrabiania wstępnego zależy od rodzaju kruszarki, wytrzymałości skały na ściskanie oraz stopnia rozdrobnienia [1, 2].

Ogólnie można ją określić wzorem

$$e_{ROZDRAB} = \frac{3,6N_n}{C_5W_T} \quad (8)$$

gdzie:

$e_{ROZDRAB}$  — energia jednostkowa rozdrabiania wstępnego,

$N_n$  — średnie zapotrzebowanie mocy na wale silnika kruszarki,

$C_5$  — stała uwzględniająca sprawność mechaniczną kruszarki i elektryczną silnika,

$W_T$  — średnia wydajność techniczna kruszarki.

## 2.6. Energochłonność przeróbki końcowej

Energochłonność przeróbki końcowej należy rozpatrywać z innego punktu widzenia niż pozostałych operacji. Przebieg tego procesu uwarunkowany jest bowiem przede wszystkim wymaganą strukturą wylotu frakcji finalnych oraz jakości kruszywa. Energochłonność, a także inne mierniki ilościowe, jak np. stopień rozdrabiania, nie mogą więc w tym przypadku stanowić jednoznacznego kryterium oceny procesu [4]. Układ przeróbki finalnej z uwagi na stawiane przed nim wymagania jakościowe jest układem stabilnym (sztywnym) pod względem parametrów przeróbki. Wymaga on nadawy o określonym średnim ziarnie, a tolerancja odchyłek jest niewielka. Stąd energochłonność tego procesu nie może podlegać optymalizacji i należy przyjmować ją jako stałą

$$e_{ROZDRAB\_KOŃC} = \text{const} \quad (9)$$

gdzie  $e_{ROZDRAB\_KOŃC}$  oznacza energię jednostkową przeróbki finalnej.

## 3. Formalizacja zagadnienia

W kopalni surowców skalnych mamy do czynienia z konsumpcją trzech podstawowych nośników energii:

- 1) energią elektryczną,
- 2) energią zawartą w paliwach płynnych,
- 3) energią zawartą w MW.

Aby można było przeprowadzić analizę zużycia energii oraz jej kosztów w procesie pozyskiwania surowca skalnego, jakim jest piaskowiec magurski, zbudowano bazę danych opartą o miesięczne wydobycie, zużycie energii elektrycznej, zużycie paliw płynnych oraz MW zawarte w raportach kopalni za okres 1994–2010 [11].

Analizę zużycia energii oraz jej kosztów przeprowadzono w kilku etapach. W pierwszej kolejności prześlędzono na przestrzeni lat 1994–2010 produkcję  $P$  oraz adekwatne do niej ogólne zużycie energii elektrycznej  $EEL$ , paliw płynnych  $EPAL$  oraz materiału wybuchowego  $EMW$ . Należy przy tym pamiętać, że jako produkcję  $P$  przyjmowano wielkość wydobycia pomniejszoną o straty we wszystkich fazach stosowanych cykli technologicznych.

Wyżej wymienione wielkości stały się bazą do obliczeń w kolejnym etapie, gdzie określono jednostkową energię na pozyskanie surowca skalnego zgodnie z relacją [8, 9]

$$e_{j(P\_lub\_W)} = \frac{E_{EL} + E_{PAL} + E_{MW}}{P\_lub\_W} \quad (10)$$

gdzie:

$e_{j(P\_lub\_W)}$  — energia jednostkowa związana odpowiednio z produkcją ( $P$ )  
lub z wydobyciem ( $W$ ),

$EEL$  — zużycie energii elektrycznej, MJ,

$EPAL$  — zużycie energii zawartej w paliwach płynnych, MJ,

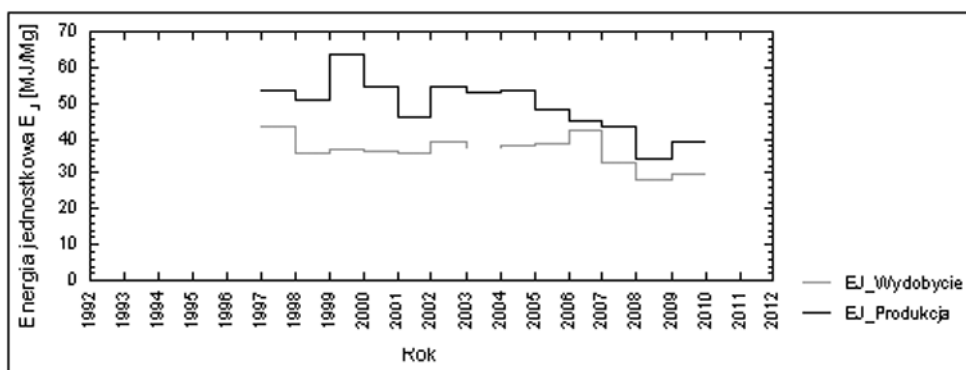
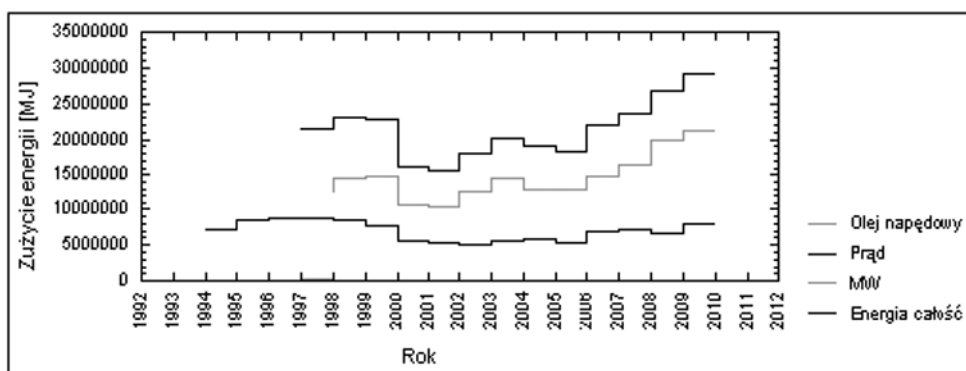
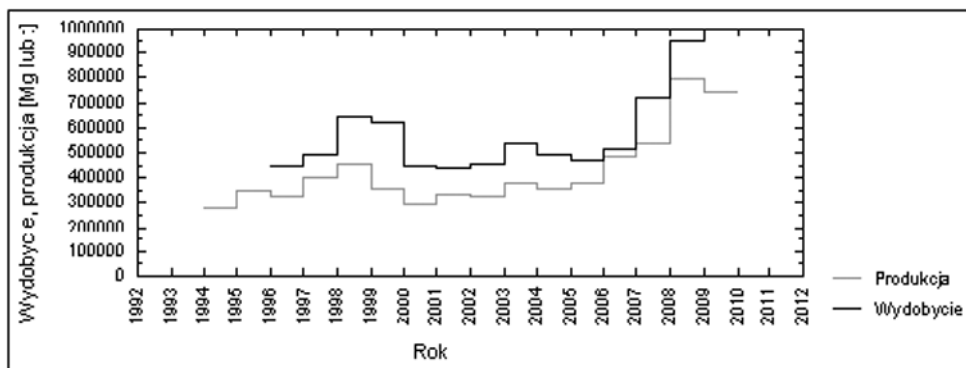
$EMW$  -zużycie energii zawartej w MW, MJ,

$P, W$  — odpowiednio produkcja i wydobycie, t.

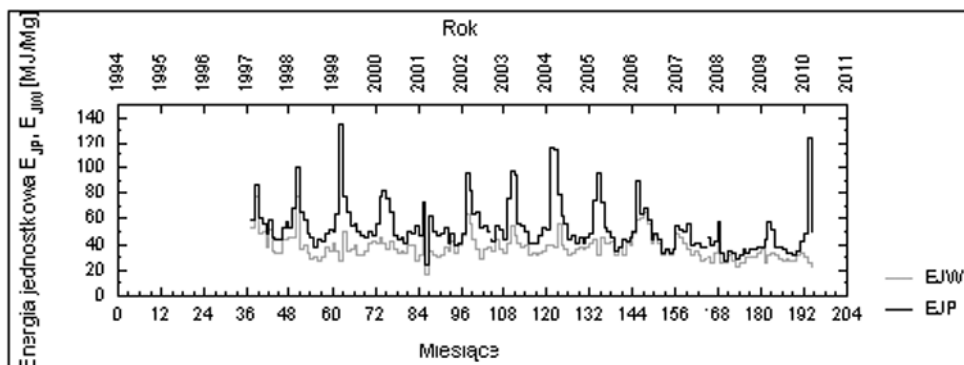
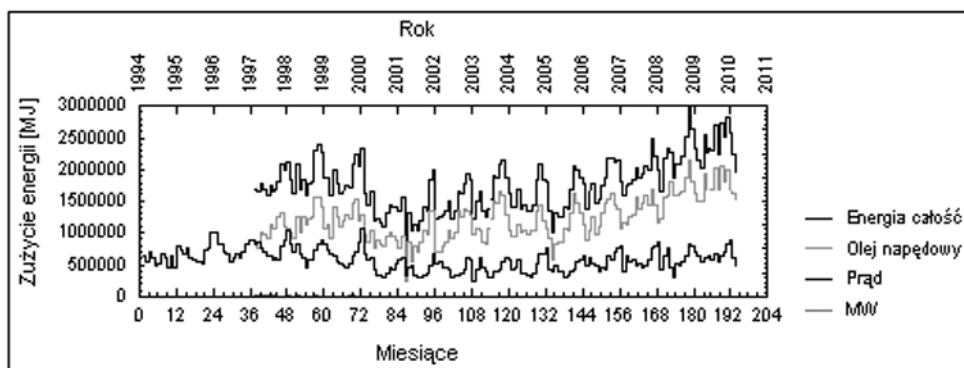
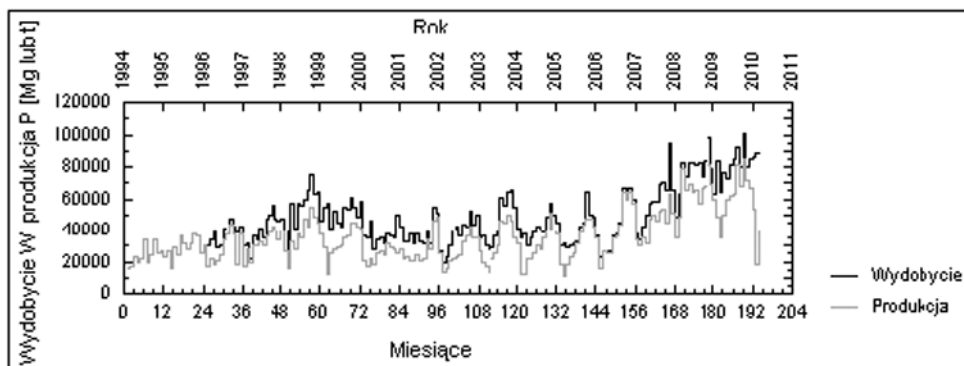
#### 4. Rezultaty obliczeń

Rezultaty obliczeń przedstawiono graficznie na wykresach. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono porównawczo bezpośrednio zużycie energii na tle wydobycia kopalni przez ostatnich 16 lat. Jest to okres, w którym dokonano znaczącej wymiany sprzętu odpowiedzialnego za wydobycie w kopalni. Zdewastowane długoletnią eksploatacją koparki elektryczne linowe zastąpiono nowoczesnymi bardziej mobilnymi ładowarkami z napędem spalinowym. Do eksploatacji na wyrobisku wprowadzono również znacznie nowocześniejsze wozy odstawcze. Na wykresie zużycia energii znalazło to odbicie we wzroście zużycia oleju napędowego z równoczesnym obniżeniem zapotrzebowania na energię elektryczną. Zużycie energii zawartej w MW pozostało na niezmiennym poziomie. Ostatni fakt jest wynikiem ograniczonej zdolności i możliwości wydobycia kruszywa z kopalni. Jest to kopalnia średniej wielkości i jej roczne wydobycie nie przekracza 1 miliona ton surowca. Wydobyciu z racji zmiany aury na przestrzeni roku towarzyszą okresowe fluktuacje. Maksimum wydobycia jak i sprzedaży surowca ma miejsce w miesiącach letnich i jesiennych. Wtedy też ze zrozumiałych względów wzrasta zużycie energii, często w sposób niekontrolowany.

Innym, niemniej ważnym czynnikiem wpływającym na tempo zużycia poszczególnych form energii są ich zmienne ceny. Autorzy na rysunku 3 przedstawili wyniki „śledztwa” cen energii w ostatnich 16 latach odpowiedzialnych za dostępny w nich 1 MJ. Okazuje się że ich wzajemne relacje są nieco zaskakujące.

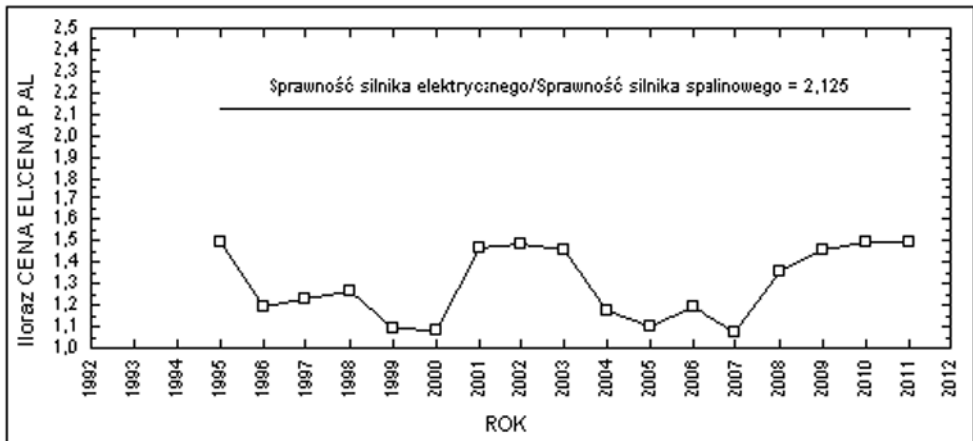
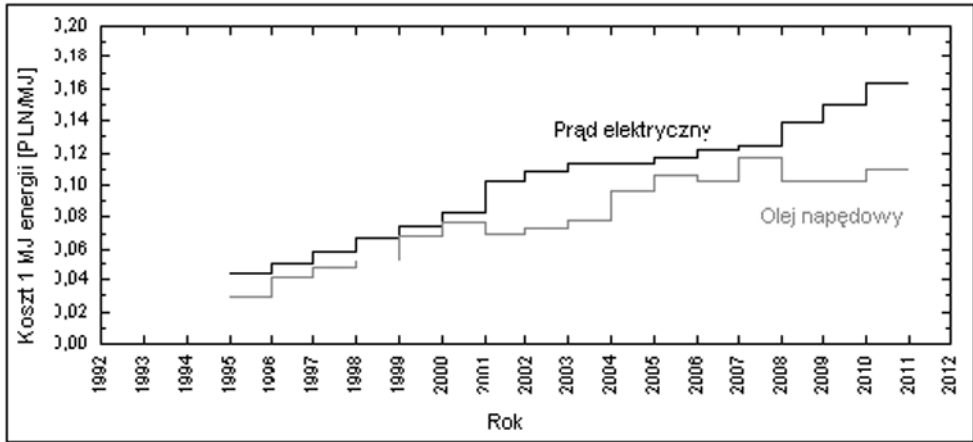


**Rys. 1.**Wydobycie, produkcja, zużycie poszczególnych postaci energii oraz jednostkowe zużycie całej energii w odniesieniu do poszczególnych lat w kopalni piaskowca magurskiego Kłęczany



**Rys. 2.**Wydobycie, produkcja, zużycie poszczególnych postaci energii oraz jednostkowe zużycie całej energii w odniesieniu do poszczególnych miesięcy w kopalni piaskowca magurskiego Klęczany





Rys. 3. Koszty zakupu poszczególnych postaci energii w odniesieniu do 1 MJ i ich wzajemna relacja w odniesieniu do sprawności odpowiednik silników

Zakładając sprawność  $\eta_{e\_el}$  silnika elektrycznego na poziomie 0,85, a sprawność silnika spalinowego  $\eta_{e\_spal}$  równą 0,40 i porównując je z ilorazem kosztu 1 MJ odpowiednich energii otrzymano

$$\frac{cena\_1\_MJ_{EL}}{cena\_1\_MJ_{PAL}} \leq \frac{\eta_{e\_el}}{\eta_{e\_spal}} = 2,125 \quad (11)$$

gdzie:

$cena\_1\_MJ_{EL}$  — cena 1 MJ energii elektrycznej w danym roku,

$cena\_1\_MJ_{PAL}$  — cena 1 MJ energii zawartej w paliwie w danym roku.

Relacja (11) oznacza, że poza fizycznymi zjawiskami towarzyszącymi zamianie energii na pracę w urządzeniach przeznaczonych do pozyskiwania surowców skalnych, mają tuż udział inne niezależne od kopalń czynniki ekonomiczno-towarowo-rynkowe.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone wstępne obliczenia pozwalają stwierdzić, że zaproponowana metoda oceny technologicznych procesów w górnictwie skalnym jest w pełni poprawna i może być natychmiast stosowana jako czułe narzędzie regulacji istniejących układów technologicznych w kopalni. Otrzymane krzywe, jakkolwiek przesunięte w fazie, rzeczywiście charakteryzują tak minima energii jednostkowej jak i minima kosztów jednostkowych.

Autorom nie chodziło w tym momencie o analizę szczegółowych rozwiązań technologicznych, lecz o ukazanie przydatności stosowania kryterium energii jednostkowej dla celów regulacji układów technologicznych.

Niezwykle istotnym parametrem wpływającym na energię jednostkowa eksploatacji są pory roku. Dotyczy to w szczególności zużycia energii elektrycznej oraz energii zawartej w paliwach płynnych. Zmienność aury będąca rezultatem cykliczności pór roku w naszej strefie klimatycznej jest czynnikiem decydującym przede wszystkim o popycie na surowce skalne.

Należy podkreślić, że zaproponowane kryterium nie jest natychmiast do przyjęcia w zagadnieniu jakim jest modernizacja układu technologicznego. W tym bowiem przypadku konieczna jest szersza lub węższa przebudowa podstawowych ogniw układu, zwłaszcza pod względem wyposażenia technicznego, pociągająca za sobą zmianę innych składników kosztów globalnych tj. amortyzacji oraz kosztów materiałowych czy kosztów obsługi.

Przedstawiona analiza zużycia energii oraz jej kosztów została przedstawiona w ujęciu z podziałem na nośniki energii. Wydaje się, że bardziej interesującym podejściem byłaby analiza odniesiona do poszczególnych operacji technologicznych. Jednak na obecnym etapie jest to prawie niemożliwe z uwagi na bardzo duży koszt ciągłego monitoringu wszystkich głównych napędów elektrycznych, głównie koparek i przenośników taśmowych.

*Autorzy składają wyrazy podziękowania wszystkim byłym i aktualnym pracownikom KSS Kłęczany za wszechstronną pomoc w trakcie zbierania danych podczas realizacji niniejszej pracy.*

### LITERATURA

- [1] Brach I.: Podstawowe problemy w procesach rozdrabiania materiałów. IOMB, Warszawa 1963
- [2] Gliński J., Wojtkiewicz H.: Podstawy urabiania skał. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1976
- [3] Gliński J.: Metoda prognozowania efektów urabiania skał techniką strzałową w górnictwie odkrywkowym. Politechnika Wrocławska, Prace Nauk. Inst. Górn. nr 15, 1974
- [4] Gliński J.: Określenie energochłonności procesów oraz racjonalnego rozdrobienia urabku w zakładach wydobywających surowce mineralne. Konferencja: Problemy urabiania i rozdrabiania skał. WSI nr 66, Opole 1980

- [5] *Gliński J.*: Badania energochłonności zaczerpywania koparkami łyżkowymi z uwzględnieniem właściwości ośrodka. Zeszyty Nauk. WSI Mechanika nr 17, Opole 1980
- [6] *Gliński J.*: Energetyczne kryterium porównawcze właściwości skał i procesów technologicznych. Górnictwo Odkrywkowe, nr 3, 1987
- [7] *Gliński J.*: Energetyczna metodyka obliczania parametrów urabiania skał materiałami wybuchowymi. Górnictwo Odkrywkowe, nr 4/5, 1987
- [8] *Marianowski J.*: Analiza i ocena energochłonności procesów wydobywania i przeróbki w kopalni surowców skalnych. II Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania 2002. Kraków–Krynica, wrzesień 2002, Materiały konferencyjne. Katedra Maszyn Górniczych, Przerobczych i Transportowych AGH w Krakowie
- [9] *Marianowski J.*: Efektywność modernizacji parku maszynowego kopalni. Górnictwo Odkrywkowe, r. 49, nr 3–4, 2007
- [10] *Marianowski J., Bęben A., Kędzióra A.*: Rozwój maszyn wiertniczych a problem energochłonności. II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Technika i technologia odkrywkowej eksploatacji złóż surowców skalnych. Kielce 24–25 października 1985, s.232–272, SITG Oddział Kielce
- [11] Raporty dzienne i miesięczne zużycia paliw, MW oraz energii elektrycznej. KSS Kłęczany, 1994–2010 (praca niepublikowana)