

*odpady mineralne, układy recyklingowe,  
wydajność, koszty produkcji*

Jerzy MALEWSKI\*

## **WYCENA USŁUGI RECYKLINGOWEJ PRZERÓBKI ODPADÓW MINERALNYCH UKŁADAMI MOBILNYMI**

Układy recyklingowe to niewielkie mobilne agregaty rozdrabiania i przesiewania odpadów mineralnych górnictwa lub budownictwa. Używane są do przerobu niewielkich źródeł surowców mineralnych, ale też coraz częściej jako elementy wspomagające przemysłowe stacjonarne systemy przerobcze. W każdym wypadku mogą być eksploatowane na zasadzie usługi produkcyjnej oferowanej na czas określony przez operatora-usługodawcę. W artykule omówiono problem wyceny usługi recyklingowej mierzonej kosztem jednostkowym produkcji, gdzie głównymi składnikami efektywności produkcji jest wydajność techniczna układu i koszty jego eksploatacji. Przedstawiono sposób i formuły obliczania tej efektywności na przykładach.

### **WSTĘP**

Nieustający wzrost zapotrzebowania na surowce mineralne, rozwój techniki i technologii, konkurencja na rynkach towarów i usług sprawiają, że przedmiotem zainteresowania biznesu mineralnego stają się nawet niewielkie złoża kopalin i odpadów. Stąd współczesna technologia i technika przeróbki kopalin w odpowiedzi na zapotrzebowanie rynku stała się bardziej elastyczna, wielofunkcyjna, łatwo dostępna i opłacalna w zastosowaniach nawet do niewielkich przedsięwzięć gospodarczych w przemyśle budowlanym, górnictwym i przetwórczym. W szczególności dotyczy to technologii przerobczych, które w przeciwieństwie do dawnych, stacjonarnych, ciężkich i nieelastycznych układów oferuje rozwiązania techniczne, które zdolne są do łatwej zabudowy i kompozycji w dowolne struktury przez zastosowanie jednostek i agregatów mobilnych. Odpowiada to potrzebom współczesnej gospodarki odpadami komunalnymi (rozbiórki) i przemysłowymi, ale też tradycyjnemu górnictwu w związku z eksploatacją niewielkich złóż, niewybranych pozostałości zamykanych lub reeks-

---

\* Politechnika Wrocławska, Instytut Górnictwa, 50-051 Wrocław, pl. Teatralny 2,  
jerzy.malewski@pwr.wroc.pl

plaatowanych kopalń, przykopalnianych składowisk odpadów górniczych i przerób-  
czych. Taki stan rzeczy sprzyja rozwojowi usług w zakresie mechanizacji technologii  
recyklingowych także w zastosowaniu do eksploatacji geograficznie rozproszonych  
i niewielkich źródeł surowców i odpadów mineralnych.

Jednym z praktycznych zagadnień rynku usług w zakresie wydobycia i przeróbki  
skał jest wycena usługi recyklingowej. Usługodawca staje przed problemem właściwej  
oceny swojej zdolności technicznej do wykonania zadania oraz racjonalnej wyceny  
kosztów realizacji usługi. W takim wypadku podstawowym składnikiem formuły ce-  
nowej usługi są jednostkowe koszty bezpośrednie oraz wydajność instalacji. Przed-  
stawiono podstawowe składniki tej formuły i sposób jej obliczania w kontekście  
zmienności cech środowiskowych – właściwości fizycznych i granulometrycznych prze-  
rabianych surowców i aktualnych cen rynkowych, kształtujących koszty operacyjne.

Stając do negocjacji warunków usługi recyklingowej niezbędne jest rozpoznanie  
zagadnienia w zakresie jak na schemacie (rys. 1), który obrazuje zakres problemu,  
z jakim mamy do czynienia w rzeczywistości. Oszacowanie efektu finansowego  
przedsięwzięcia usługowego jest nieodzownym elementem wyceny, gdzie główną  
informacją jest koszt jednostkowy produkcji obliczony jako iloraz kosztów własnych  
 $K_w$  i wydajności efektywnej układu maszyn  $W_e$  jak w formule (1)

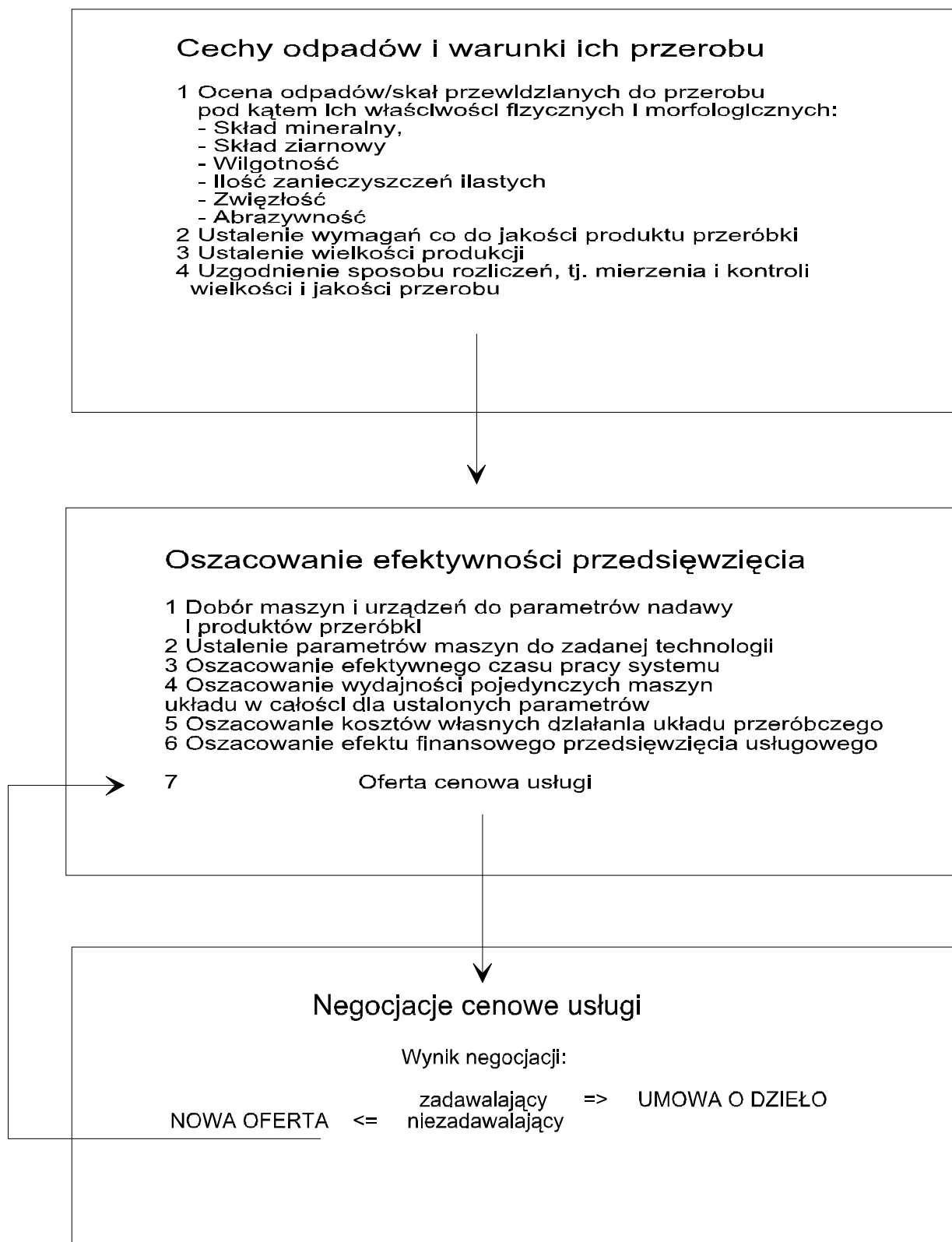
$$K_j = \frac{K_w}{W_e} = \frac{K_w}{P_e \cdot W_{techn}} \quad (1)$$

W artykule zajmiemy się sposobem obliczania tej formuły oraz przykładami jej za-  
stosowania. Posłużono się pojęciami, które – jak pokazuje praktyka – mogą być wie-  
loznacznie rozumiane i dlatego wymagają ścisłego zdefiniowania już na wstępie.  
W szczególności jest to rzecz ważna na etapie zapisywania warunków usługi.

I tak przedmiotem recyklingu są odpady<sup>1</sup>. Podstawą technologii przerobu odpadów  
skalnych są operacje rozdrabiania i klasyfikacji. W zależności od potrzeby są one  
rozbudowane o operacje załadunku, transportu i odstawy produktów przeróbki.

Rozróżniamy pojęcia operacji i maszyny (lub urządzenia) realizującej tę operację.  
Operacją (przeróbczą, górniczą, transportu etc.) będzie zespół specjalizowanych czyn-  
ności technicznych wykonywanych na przerabianym materiale. W każdej operacji  
wyróżnia się dwa rodzaje strumieni: strumień wejściowy zwany nadawą i strumienie  
wyjściowe, zwane produktami operacji; czyli produktem jest też powstający w wyniku  
tej operacji odpad. Zespół powiązanych ze sobą pojedynczych operacji jest systemem  
operacji. System (układ) operacji jednoznacznie reprezentuje technologię produkcji.

<sup>1</sup> Używane tu pojęcia odpadu i recyklingu są bardzo szerokie. Ogólnie odpadem jest nieużyteczny  
w danym momencie produkt operacji technologicznej. Z jednej strony będą to zanieczyszczenia produk-  
tów handlowych, z drugiej – zaniechanie eksploatacji (złóże resztkowe) albo złóże pozabilansowe itp.  
Z kolei recyklingiem będzie operacja odzysku surowca z odpadu, także reeksploatacja złóża w dawniej  
zamkniętych kopalniach.



Rys. 1. Schemat i składniki wyceny usługi recyklingowej  
 Fig. 1. Scheme and elements of recycling services cost evaluation

Operacje są realizowane za pomocą maszyn. Załadunek dokonuje się ładowarkami lub koparkami, rozdrabianie – kruszarkami, klasyfikacja – przesiewaczami, transport – samochodami lub przenośnikami. Typowym układem jest układ szeregowy maszyn: koparka/ładowarka-samochód-kruszarka-przesiewacz. W mobilnych układach kruszarki i przesiewacze, wraz z układem zasilającym (podajnikiem i zasobnikiem), są łączone w jeden agregat. Zespół maszyn i urządzeń realizujący daną technologię nazywamy systemem (układem) maszynowym.

## 2. ZMIENNE ŚRODOWISKOWE TECHNOLOGII RECYKLINGOWEJ

Na efektywność operacji, a w szczególności rozdrabiania, największy wpływ mają takie cechy jak skład ziarnowy, kształt brył, zwięzłość, wilgotność, obecność domieszek ilastych. Np. odpady górnicze mogą składać się z mieszanin skał różniących się zwięzłością lub plastycznością, np. granit świeży + zwietrzały + glina. Każdy ze składników ma różną podatność na rozdrabianie, ale najgorsze jest tu ujemne współoddziaływanie na siebie tych składników w procesie rozdrabiania spowalniające nie-raz wydatnie wydajność operacji. Przykładem jest tu skała zwięzła z domieszką gliny, która zawsze jest obecna w skałach odpadowych. Jednakże obecność gliny spowalnia proces jedynie w przypadku nadawy wilgotnej. Opiszemy pokrótce wpływ tych czynników na wydajność maszyn.

### **Zwięzłość skał**

Zwięzłość, w sensie podatności na kruszenie, utożsamiana jest najczęściej z wytrzymałością na ściskanie. Skały drobnokrystaliczne są bardziej zwięzłe i mniej podatne na kruszenie niż grubokrystaliczne. Skały osadowe najczęściej są słabsze od głębinowych, a te z kolei słabsze od wylewnych. Zwięzłość betonu jest podobna do wypełniacza, czyli skał głębinowych lub wylewnych.

Zwięzłość ma wpływ na energochłonność rozdrabiania, a co zatem idzie i na zwiększone zużycie elementów roboczych maszyn. Zwięzłość i wytrzymałość na ściskanie są do pewnego stopnia skorelowane. Upraszczając można przyjąć, że skały o wytrzymałości do 50 MPa są słabo zwięzłe, 50–150 MPa – średnio zwięzłe, >150 MPa – mocno zwięzłe.

### **Skład ziarnowy**

Jak już powiedziano wyżej, najbardziej istotnym i zmiennym czynnikiem jest skład ziarnowy przerabianego surowca. Skład ziarnowy nadawy jest trudno precyzyjnie oznaczyć w wyrobisku lub na składowisku, z powodu wielkości brył. Praktycznie, maksymalne wymiary brył można określić przez pomiar bezpośredni, a skład ziarnowy oszacować za pomocą skanowania fotografii usypu skalnego. Skład ziarnowy pro-

duktów rozdrabiania lub przesiewania wykonuje się w standardowy sposób przez analizę sitową.

Skład ziarnowy opisuje się za pomocą funkcji rozkładu wymiarów ziaren, tj. funkcji częstości (wychodów)  $f(d_i)$   $i$ -klasy lub  $F(d_i) = \sum_0^i f(d_i)$  wychodów szerokiej klasy od wielkości  $d_0$  do  $d_i$  (wychody skumulowane). Do obliczeń symulacyjnych używamy modele matematyczne tych rozkładów, np. rozkład Gaudina-Schuhmanna  $F(d_i) = (d/d_{\max})^{bGS}$ , gdzie  $bGS$  jest parametrem kształtu tej funkcji, a  $d_{\max}$  parametrem skali.

W praktyce skład ziarnowy nadawy może być bardzo zróżnicowany. Wpływa on bardzo silnie na wydajność kruszarek i koparek. Ale ten wpływ może być większy lub mniejszy zależnie od rozmiarów/wielkości maszyn i ich parametrów roboczych.

### **Wielkość (średnica) ziaren lub brył nadawy**

Jak już wspomiano wcześniej, w przypadku odpadów mamy do czynienia z mieszaniną różnych rodzajów składników np. beton zbrojony, mury, ziemia z wykopów, (rozbiórkowe) stłuczka szklana, opakowania plastikowe, meble, sprzęt agd itp. (komunalne). W tym wypadku na efektywność rozdrabiania wpływają kształt i wymiary brył nadawy, ze względu na ich czas kruszenia i skłonność do zaklinowań w układzie rozdrabiania. Ponieważ kształt brył nadawy jest nieregularny, to potrzebne jest uściślenie pojęcia wymiaru (średnicy) bryły. Z praktyki znamy przykłady sporów, które powstawały na tle braku takiego uściślenia pojęcia wielkości ziarna/bryły.

Jeśli wyróżnimy trzy główne wymiary bryły: długość  $a$ , szerokość  $b$  i grubość  $c$ , to kształt wg klasyfikacji Zingga uważamy za regularny (ziarna kubiczne) jeśli ich wymiary względne  $b/a$  i jednocześnie  $c/b$  są większe od  $2/3$ . W przeciwnym razie mamy do czynienia z ziarnem niekształtnym. Jak widać, nawet w przypadku tzw. regularnych kształtów poszczególne wymiary mogą różnić się od siebie o 50%, ponieważ  $a : b : c = 3/2 : 1 : 2/3$ . Nieregularne zaś mogą przyjmować kształt słupowy, płaski i pośredni: płasko-słupowy.

W tej pracy przyjmujemy, że wielkość (średnica) bryły mierzona jest jej szerokością. Wprawdzie, w przypadku otworów prostokątnych, przejście przez taki otwór bryły jest zdeterminowane jej grubością, jednakże dla ujednoczenia pojęć przyjmujemy, że średnica bryły zawsze będzie identyfikowana z jej szerokością. Z takiego założenia wynika wniosek, że maksymalna po długości bryła nadawy dla wlotów prostokątnych może osiągać wartość równą długości tego otworu, co zdarza się dość często zauważyć w praktyce. Jednakże, dopuszczalny wymiar brył nadawy (czyli szerokości) nie powinien przekraczać szerokości wlotu. Warto tu zauważyć, że w literaturze przedmiotu niemal wszyscy producenci kruszarek ograniczają dozwoloną w nadawie wielkość brył do ok. 85% szerokości wlotu w przypadku kruszarek szczękowych oraz

do ok. 50% tejże szerokości dla kruszarek udarowych. Praktyka zaś bardzo często odbiega od tych zaleceń.

### **Wilgotność i ilość domieszek ilastych**

Wilgotność jest istotna, gdy w nadawie obecne są zanieczyszczenia ilaste. W takim wypadku wpływa ona na wydajność już od wartości powyżej 5%. Dla nadawy wolnej od gliny wilgotność praktycznie nie ma wpływu na proces kruszenia i transportu.

Na zanieczyszczenia ilaste w obecności wilgoci bardziej wrażliwe są kruszarki szczękowe lub stożkowe, a mniej udarowe. Ten fakt powinien być brany pod uwagę przy komponowaniu układu recyklingowego, a także przy wycenie usługi. Jak podają źródła literaturowe wydajność maszyn dla nadawy wilgotnej z domieszką gliny może obniżyć się nawet o 50 procent w porównaniu do nadawy suchej (Taggart). Niektóre źródła (Krupp) podają ograniczenia dla nadawy zawierającą glinę w ilości do 8% w przypadku kruszarek udarowych i 5% w przypadku kruszarek szczękowych.

Obecność gliny towarzyszy wszystkim surowcom mineralnym, ale jest najbardziej prawdopodobna w skałach zwietrzałych nadkładowych i odpadach.

### **Abrazywność skał**

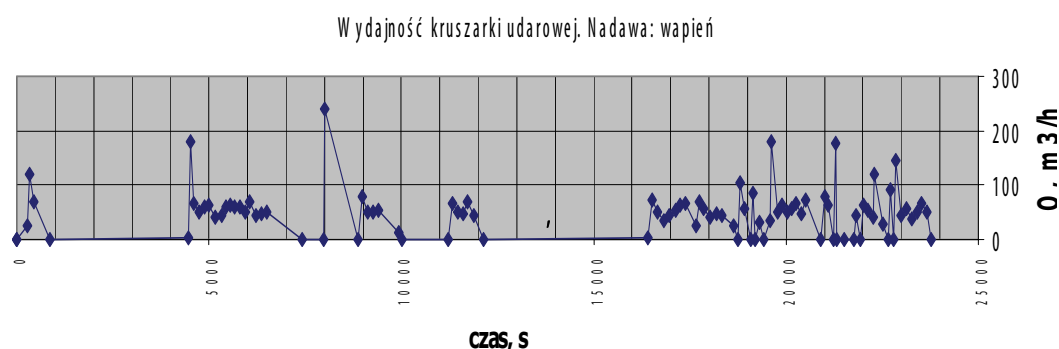
Abrazywność (właściwość ścierna) związana jest z zawartością minerałów twardych, do których zaliczamy kryształy krzemionki  $\text{SiO}_2$  (7 w skali Mohsa). Skały głębinowe, takie jak granit, zawierają do 26%  $\text{SiO}_2$ , podczas gdy ogólna ilość krzemu związanego chemicznie w postaci glinokrzemianów w skałach wylewnych (bazalt) i głębinowych wynosi ok. 70%. Skały węglanowe są niemal wolne od kwarcu (do 5%). Dla betonu można przyjąć abrazywność tego materiału tak jak dla skał granitowych.

Z literatury wynika, że wszyscy producenci kruszarek ograniczają zastosowanie swych seryjnych wyrobów do skał zawierających do 5–7% krzemionki. Są jednak konstrukcje specjalne, zaprojektowane na skały zawierające 100% krzemionki.

Abrazywność skał przyczynia się do szybszego zużycia elementów roboczych maszyn, a w trakcie zużywania się tych elementów również do pogorszenia sprawności operacji. Na przykład, proces zużywania się młotów lub listew w kruszarkach udarowych pogarsza skuteczność operacji rozdrabiania i zmusza operatorów do częstych wymian tych elementów. I choć wymiana taka nie jest awarią maszyny, to czas i koszty z tym związane wpływają na ekonomikę produkcji. Ogólnie, wzrost zawartości  $\text{SiO}_2$  przyczynia się do wzrostu kosztów usługi. Zatem do obliczeń efektywności układów recyklingowych stosowanych do skał abrazywnych należy wprowadzić odpowiednie korekty do formuły kosztowej zwiększonego udziału remontów i konserwacji w kosztach produkcji.

## Awaryjność maszyn i urządzeń

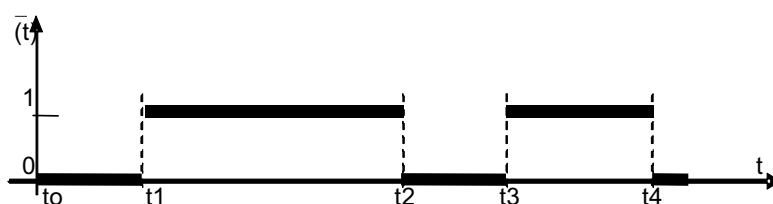
Istotnym czynnikiem ograniczającym wydajność pojedynczych maszyn jak i ich układów jest nieciągłość produkcji. Wyróżniamy trzy rodzaje przerw: organizacyjne, technologiczne i techniczne. Organizacyjnymi nie będziemy się zajmować, bo są one zależne od operatora systemu produkcyjnego. Przerwy technologiczne z kolei, to przerwy losowe spowodowane np. zaklinowaniem otworów wlotowych kruszarek, przesypami na taśmach, brakiem zasilania itp. Rysunek 2 pokazuje rzeczywisty proces produkcji układu recyklingowego składającego się z ładowarki i agregatu recyklingowego zainstalowanego w kopalni wapienia.



Rys. 2. Wykres wydajności kruszarki udarowej (badania własne)

Fig. 2. Capacity diagram of impact crusher in limestones quarry (own investigations)

Widoczne na rys. 2 przerwy wywołane są nieciągłością zasilania spowodowanego różnymi przyczynami, np. brakiem nadawy z windy własnej lub elementu poprzedzającego w układzie maszyn. Mogą być też wywołane awariami (mechanicznymi, elektrycznymi) maszyn. Przy traktowaniu każdej przyczyny jako awarii układu, proces awaryjności systemu maszyn i urządzeń w całości będzie przyjmował w losowej kolejności stany pracy (1) i awarii (0) jak na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy proces awarii systemu przerobczego

Fig. 3. An example of processing system breakdowns

Jeśli podliczymy łączny czas przerw przez  $T_0$ , a czas pracy przez  $T_1$ , to prawdopodobieństwo efektywnej pracy maszyny wyniesie

$$p_e = \frac{1}{1 + \kappa} \quad (2)$$

gdzie  $\kappa = T_0 / T_1$ .

W układach szeregowych maszyn, jeśli potrafimy przypisać poszczególnym maszynom ich „własną” awaryjność, to łączny współczynnik awaryjności jest sumą współczynników indywidualnych, a prawdopodobieństwo efektywnej pracy systemu w całości wyniesie<sup>2</sup>

$$P_e = \frac{1}{1 + \sum_i \kappa_i} \quad (3)$$

Zatem jeśli dyspozycyjny czas pracy systemu wynosi  $T_d$ , to efektywny czas pracy i wydajność efektywna systemu są równe

$$T_e = P_e \cdot T_d \quad (4)$$

### 3. EFEKTYWNOŚĆ UKŁADÓW I ICH ELEMENTÓW

#### 3.1. WYDAJNOŚĆ TECHNICZNA

Zanim przejdziemy do metody obliczania wydajności maszyn warto przypomnieć czym w istocie jest wydajność techniczna i jakie to pojęcie ma odmiany. Mamy wiele definicji wydajności. Wszystkie one są różnicowane wg pojęcia czasu. Praktyczne znaczenie mają pojęcia wydajności chwilowej, technicznej, efektywnej.

Przez wydajność chwilową rozumiemy wydajność osiąganą przez operację w chwili  $t$  będąca pochodną procesu wydajności po czasie, tj.

$$Q(t) = \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

gdzie  $V$  – jednostka objętości lub masy

Rozszerzając czas obserwacji procesu  $V(t)$  z nieskończenie małej długości  $dt$  do długości  $0-T_d$ , z wyłączeniem ewentualnych przerw, otrzymujemy wydajność techniczną średnią w obserwowanym czasie<sup>3</sup>

$$Q_{\text{tech}} = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} Q(t) dt \quad (6)$$

<sup>2</sup> Jest to prawdopodobieństwo układu, w którym zdarzenia awarii poszczególnych elementów są od siebie zależne.

<sup>3</sup> Im dłuższe będą odcinki obserwacji  $T_d$ , tym bardziej uśredniony będzie proces wydajności technicznej. Przydatność tej informacji jest zależna od celu analizy: jeśli celem jest oszacowanie wydajności godzinowej, rocznej to lepszą wartość ma dłuższa obserwacja, jeśli zaś wykonujemy analizy symulacyjne zachowania się jakiegoś procesu, np. poziomu wypełnienia zbiornika zasilającego kruszarkę, to potrzebujemy wydajności chwilowych  $Q(dt)$  i wariancji tych wielkości, gdzie  $dt$  jest czasem obserwacji (próbki) procesu.



Zatem wydajnością efektywną będzie wydajność techniczna (6) pomnożona razy prawdopodobieństwo (2) nieprzerwanej i produktywnej pracy maszyny.

$$Q_e(T_d) = Q_{\text{techn}}(T_d) \cdot p_e \quad (7)$$

### Układy maszyn

W formule (1) potrzebna jest wydajność efektywna systemu, która jest iloczynem prawdopodobieństwa pracy  $P_e$  i wydajności technicznej  $W_{\text{tech}}$  całego zespołu/systemu maszyn. Prawdopodobieństwo efektywnej pracy systemu szeregowego obliczamy formułą (3). Problemem pozostaje obliczenie wydajności technicznej. Jest to wydajność techniczna tzw. wąskiego gardła w układzie, które znajdujemy przez porównanie wydajności technicznych poszczególnych maszyn<sup>4</sup>.

$$W_e = W_{\text{techn}} \cdot P_e \quad (8)$$

I tu, jak widzimy, powstaje problem określenia wydajności technicznej poszczególnych maszyn.

### Pojedyncze maszyny

W układach recyklingowych wydajność samochodu jest stosunkowo łatwa do określenia. Można też pominąć tu problem wydajności przesiewacza, ponieważ w takich układach nie są stosowane obiegi zamknięte, więc przesiewacz nie jest ogranicznikiem wydajności układu. Natomiast wydajność koparki i kruszarki jest ściśle zależna od składu ziarnowego nadawy i ten czynnik musi być bezwzględnie wzięty pod uwagę w obliczeniach. Pozostałe czynniki, takie jak zwięzłość i wilgotność przetwarzanego materiału mogą dodatkowo wpływać na proces wydajności.

W naszym modelu wydajności maszyn przyjmujemy założenie, że każda maszyna jest w pewnym sensie urządzeniem przepływowym o charakterystycznym dla danej maszyny przekrojem wlotowym i wylotowym oraz oporze przepływu masy skalnej. W takim razie natężenie (wydajność) strumienia masy skalnej powiązana jest z prędkością przepływu równaniem

$$Q = q \cdot S, \quad [m^3 / h] \quad (9)$$

gdzie:

$S = B \cdot e$  – powierzchnia wylotu (szczeliny wypustowej, czerpaka koparki) o wymiarach wlotu  $B \times L$ ,

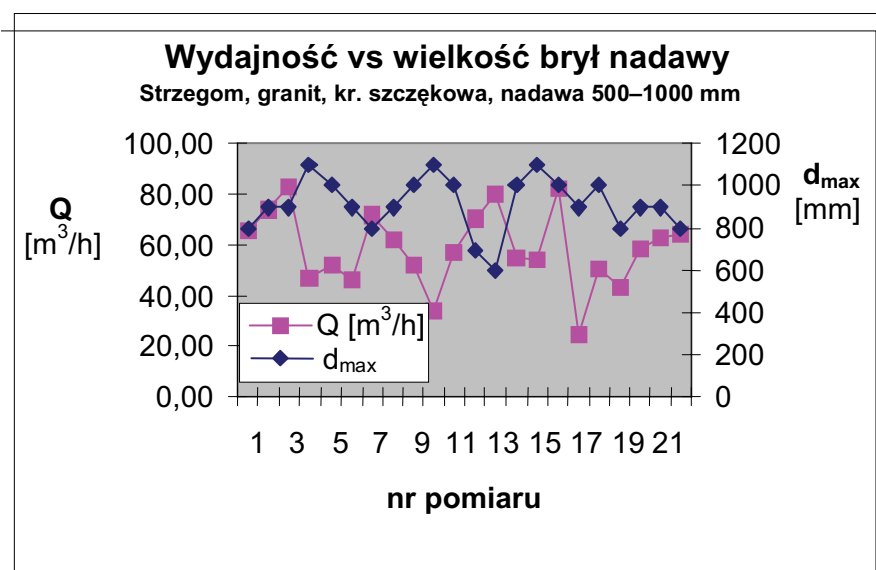
$q$  – prędkość przepływu [m/h], czyli wydajność przypadająca na jeden  $m^2$  przekroju (ponieważ  $m^3/h/m^2$  daje jednostkę prędkości m/h).

<sup>4</sup> A ściślej, przez porównanie ich wydajności względnych  $\mu = Q_o/Q_{\text{tech}}$ , gdzie  $Q_o$  jest obciążeniem danej maszyny, a  $Q_{\text{tech}}$  jej wydajnością techniczną. W przypadku układu maszyn  $Q_o$  będzie dopuszczalnym obciążeniem układu. Zatem wydajność układu jest to taka wydajność  $W_{\text{tech}}$  (obciążenie systemu), przy której tylko jeden ze zbioru wartości  $\{\mu_i\}$  osiąga wartość równą 1, a pozostałe są mniejsze od 1.

## Kruszarki

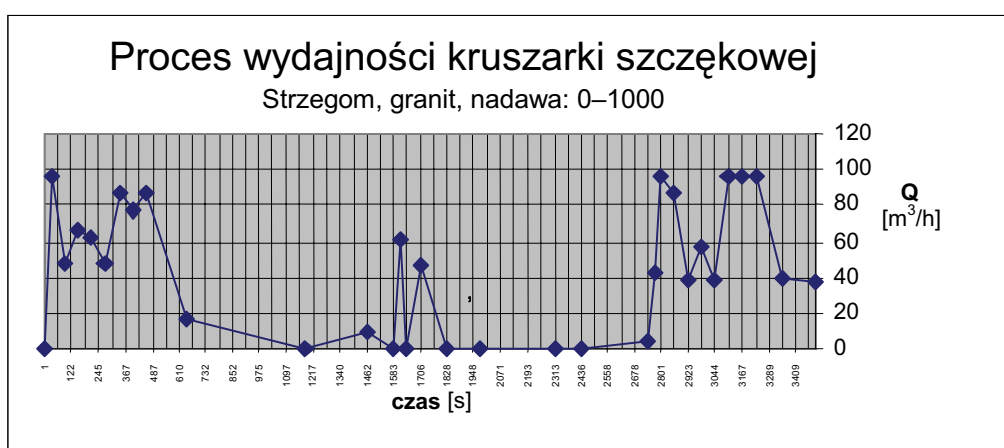
Wpływ składu ziarnowego na efektywność rozdrabniania wynika wprost z klasycznych hipotez rozdrabniania, że energia potrzebna do rozdrobienia ziarna od wielkości ziaren nadawy  $y$  do wielkości ziaren produktu  $x$  jest proporcjonalna do stopnia rozdrobienia  $r = y/x$  i właściwości fizycznych rozdrabnianego materiału, tj.

$$E(r, k) = \frac{C}{y^k} (r^k - 1), \quad r = y/x \quad (10)$$



Rys. 4. Zależność wydajności kruszarki szczękowej od wielkości brył nadawy w skałach granitowych (badania własne)

Fig. 4. Relationship of the jaw crusher capacity and feed lumps size in granite rocks (own investigations)



Rys. 5. Przykład procesu wydajności kruszarki szczękowej,  $e = 140$  mm (źródło własne)

Fig. 5. Capacity diagram of jaw crusher in granite quarry (own study)

Jeśli przyjąć, że w równaniu (10) kontrolną wielkością rozładunku skruszonej skały jest szczelina wypustowa  $e$ , a wydajność  $Q(r, k)$  jest proporcjonalna do ilości zużytej energii, to wydajność maszyny w granicach wielkości rozdrabianych ziaren wyniesie

$$Q_{y_{\max} - y_{\min}}(m) = \frac{C(m)}{F(y_{\max}) - F(y_{\min})} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} Q(r) \cdot dF(y), \quad r = (y/e) \geq 1 \quad (11)$$

gdzie  $Q(r)$  jest funkcją wydajności zależną od stopnia rozdrobienia i parametrów maszyny [ $\text{m}^3/\text{h}$ ];  $C(m)$  jest stałą proporcjonalności, zależną od aktualnych parametrów  $m$  maszyny;  $F(y)$  jest funkcją składu ziarnowego nadawy.

Praktycznym problemem jest identyfikacja funkcji  $Q(r)$  oraz stałej  $C(m)$ , która uwzględnia aktualne i stałe parametry kruszarek. Np. w przypadku kruszarek szczękowych ważna jest częstotliwość i amplituda drgań szczęki, kąt uchwytu, sztywność konstrukcji oraz aktualna szerokość szczeliny wypustowej, a także od skoku elementu drobiącego  $s$  bowiem im mniejsza jest wartość  $w = e/s$  tym bardziej dynamicznie przebiega proces rozdrabiania i odwrotnie. Jednocześnie formuła obliczeniowa powinna nadawać się do całego typoszeregu maszyn, a nie jej pojedynczego egzemplarza. Taką formułę, przez nawiązanie do hipotezy rozdrabiania, otrzymujemy, przyjmując<sup>5</sup>

$$\frac{Q(r)}{Q(r_e)} = g(r) \quad (12)$$

gdzie:

$Q(r_e)$  – wydajność unormowana kruszarki dla ziaren nadawy  $y = e$ , czyli  $Q(r = 1)$ ,

$$g(r) = r^{-k}, \quad r \geq 1 \quad (13)$$

$r = y/e$ ;  $r_{\max} = y_{\max}/B$ ;  $r_e = 1$ , gdzie:

- $y$  – średnica ziaren nadawy,
- $B$  – szerokość paszczy kruszarki,
- $e$  – szerokość szczeliny wypustowej.

Współczynnik proporcjonalności  $C(m)$  w równaniu (11) jest unormowaną wydajnością względną tj.

$$C(m) = \frac{Q(r \approx 1)_{\text{eksp}}}{Q(r = 1)} \quad (14)$$

gdzie  $Q(r)_{\text{eksp}}$  jest wydajnością rzeczywistą uzyskaną z eksperymentu, a  $Q(r = 1)$  jest obliczona teoretycznie jako objętość przepływająca przez otwór o powierzchni  $S$ , co

---

<sup>5</sup> Jest uproszona interpretacja zagadnienia w porównaniu do wcześniejszych prac autora polegająca na pominięciu wpływu na wydajność aktualnej wartości  $w = e/s$ .

w kruszarkach jest polem przekroju otrzymanym z iloczynu długości komory razy szerokość szczeliny wypustowej  $L \cdot e$  (kruszarki szczękowe, udarowe),  $\pi \cdot e \cdot D_w$ . (kruszarki stożkowe).

Zatem podstawiając (12) i (14) do (11) otrzymujemy

$$Q = \frac{q(r_e) \cdot S \cdot C(m)}{F(y_{\max}) - F(y_{\min})} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} r^{-k} \cdot dF(y), \quad r \geq 1 \quad (15)$$

Współczynnik  $k$  w równaniu (15) wg naszych badań energochłonności rozdrabiania różnych skał wynosi: 0,91 (bazalt), 0,76 (granit), 0,62 (wapień).

W przypadku kruszarek szczękowych i stożkowych wartość funkcji wydajności  $q(r_e)$  dla ziaren  $y \approx e$  można wyprowadzić teoretycznie z zależności geometrycznych maszyny. W przypadku kruszarek udarowych brak w literaturze przedmiotu matematycznych modeli wpływu parametrów konstrukcyjnych na wydajność maszyny. Jedyłą, powtarzaną informacją jest ta, że intensywność procesu rozdrabiania jest proporcjonalna do energii kinetycznej elementu drobiącego  $E = m \cdot v^2/2$ . Z równania tego wynika, że energia jest tym większa, im większa jest średnica i masa wirnika. Brak jest natomiast jakichkolwiek propozycji zależności funkcyjnych wydajności od szerokości szczeliny utworzonej pomiędzy końcówkami listew udarowych i płytą odbojową.

Tabela 1

Obliczenia wydajności kruszarki szczękowej obciążanej nadawą grubą (parametr  $bGS = 2$ )

Kruszarka testowana			Kruszarka obliczana		
Parametry	Wartość	Nadawa	Nadawa:		
$Q(y=e)_{\text{pomiarzone}}$	200	0-2e – 300 mm	$C(m) =$	0,7428372	
$Q(0-1000)_{\text{pomiarzone}}$	60	0-1000 mm	$\text{tg } \alpha =$	0,4227932	
$B =$	0,72		$k$	$Q(y=e)_{\text{teor}} =$	269 m <sup>3</sup> /h     1603 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
$L =$	1,2		0,91 bazalt	$Q(0-2e)^* =$	200 m <sup>3</sup> /h !!!     1190 z pomiarów
$n =$	340	1/min	0,76 granit	$L =$	1,2
$e =$	0,14		0,62 wapień	$e =$	0,14
$s =$	0,03			$bGS =$	2
$\alpha =$	0,4 rad				
$P =$	0,168				
$k =$	0,76				

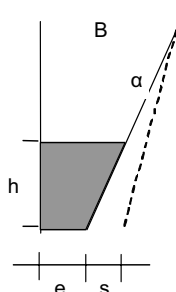
  

$y$	$r = y/e$	$r^{-k}$	$F(d)$	$f(d)$	$d \cdot f(d)$
0	0,00	1,00	0,00	0	0,00
0,05	0,36	1,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,71	1,00	0,01	0,01	0,01
0,15	1,07	0,95	0,02	0,01	0,01
0,2	1,43	0,76	0,04	0,02	0,01
0,3	2,14	0,56	0,09	0,05	0,03
0,4	2,86	0,45	0,16	0,07	0,03
0,5	3,57	0,38	0,25	0,09	0,03
0,6	4,29	0,33	0,36	0,11	0,04
0,7	5,00	0,29	0,49	0,13	0,04
0,8	5,71	0,27	0,64	0,15	0,04
0,9	6,43	0,24	0,81	0,17	0,04
1	7,14	0,22	1,00	0,19	0,04

$F(y) = \left( \frac{y}{y_{\max}} \right)^{kGS}$	0,76
obliczono $Q(0-d_{\max}) =$	65 m <sup>3</sup> /h



$$V = v \cdot n = \frac{s^2 + 2es}{2 \text{tg } \alpha} \cdot L \cdot n$$

We wcześniejszej pracy [1] podano pewną propozycję uogólnienia wzoru (15) na kruszarki udarowe przez przyjęcie założenia, że parametr  $e$  jest szerokością szczeliny pomiędzy listwami i płytą odbojową,  $w = 1$ , ale ten przypadek nie będzie tu omawiany.

Przykładowe obliczenia kruszarki szczękowej przedstawiono w tabeli 1. Jeśli przyjąć w tym modelu, że skład ziarnowy opisuje się równaniem Gaudina-Schuhmanna z parametrem  $bGS = 0,1$  (85% ziaren mniejszych od 200 mm) to otrzymamy wynik  $Q(e) = 180 \text{ m}^3/\text{h}$ , co jest w przybliżeniu zgodne z pomiarami wydajności operacji obciążanej nadawą już raz przekruszoną ( $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Na rysunku 5 pokazano rzeczywisty proces wydajności tej kruszarki obciążanej nadawą 0–1000 mm.

### Koparki

Model wydajności koparki zależny od składu ziarnowego można wyprowadzić na podobieństwo wydajności kruszarek upraszczając model (10) do postaci [2].

$$Q = \frac{q(x=1) \cdot V}{F(x_{\min}) - F(x_{\max})} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-k} \cdot dF(x), \quad x = (y/B) \leq 1 \quad (16)$$

gdzie  $x$  jest względną wielkością zacieranych brył. Parametr  $k$  w tym modelu wynosi ok. 0,5, a wydajność  $q(1)$  załadunku brył bliskich wymiarowi czepaka o pojemności  $1 \text{ m}^3$  wynosi  $40 \text{ m}^3/\text{h}/1\text{m}^3$ . Przyjmuje się tu, że  $B = \sqrt[3]{V}$ .

Przykładowe obliczenia wydajności koparki dla nadawy opisującej się równaniem Gaudina-Schuhmanna z parametrem  $bGS = 1$  przedstawiono w tabeli 2.

Tabele 1 i 2 pokazują sposób użycia formuł do obliczenia wydajności technicznej maszyn. Mogą one służyć jako algorytm obliczeniowy w arkuszu kalkulacyjnym.

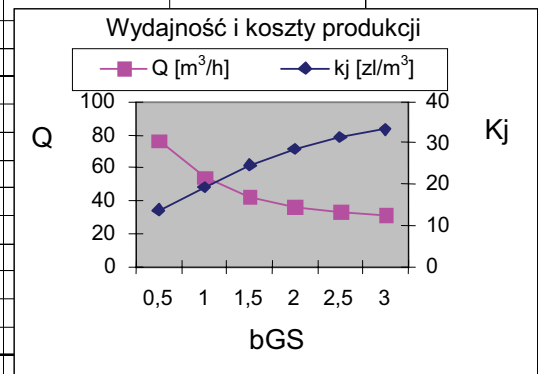
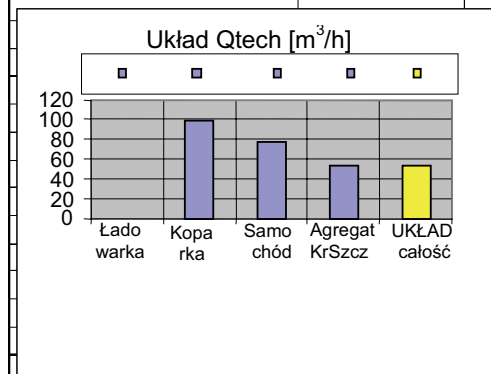
Tabela 2

Przykład obliczenia wydajności koparki obciążanej nadawą 0–1000 mm (parametr  $bGS = 1$ )

Koparka testowana			Koparka obliczana		
Parametry	Wartość	Nadawa	C=	1	
Q=	40 m <sup>3</sup> /h		V=	1,6	
V=	1,00 m		Q = Q(1) · V	40 m <sup>3</sup> /h	
B=	1,00 m		Q(B=1)	25 m <sup>3</sup> /h	na 1 m <sup>3</sup> czepaka z pomiarów
L=	1,00 m		L=	1,17	
e=	1,00 m		e=	1,17	
F=	1,00 m <sup>2</sup>		bGS=	1	
			0,5 Nadawa		
			y	x = y/e	x <sup>-k</sup>
			F(y)	f(y)	y · f(y)
			0	0,00	0,00
			0,05	0,04	4,84
			0,1	0,09	3,42
			0,15	0,13	2,79
			0,2	0,17	2,42
			0,3	0,26	1,97
			0,4	0,34	1,71
			0,5	0,43	1,53
			0,6	0,51	1,40
			0,7	0,60	1,29
			0,8	0,68	1,21
			0,9	0,77	1,14
			1	0,86	1,08
obliczono			Q(0-y <sub>max</sub> ) =	99 m <sup>3</sup> /h	1,00
					1,81

Przykład obliczeniowy układu recyklingowego z kruszarką szczękową zastosowany do skał granitowych (wszystkie dane wejściowe są szacunkowe)

	Ładowarka	Koparka	Samochód	AgregatKrSzcz	UKŁADcałość
Elem.ukł.: 0-nie, 1-tak	0	1	1	1	1
$F_i$ [mm]					
$B$ [mm]	1		1	0,72	
$L$ [mm]	2		0,6	1,2	
$n$ [obr./s]				340	
$e$ [mm]				0,14	
$s$ [mm]				0,03	
$n$ maszyn	1	1	2	1	
$V$ [m <sup>3</sup> ]	3,4	1,6	7		
Li Zatr, osoby	0	1	1	1	3
Td [h] (czasWykonaniaUsł)	0	800	800	800	800
Kappa_maszyny	0,00	0,08	0,05	0,25	0,38
Pe_układu	0,00	0,72	0,72	0,72	0,72
Tef_układu [h/rok]	0	580	580	580	
Qtech, [m <sup>3</sup> /h]	brak	99	76	54	54
Qtech_układu [m <sup>3</sup> /h]	0,0	54	54	54	54
Qef_układu [m <sup>3</sup> /Td]	0	31400	31400	31400	31400
ŚredniaPlacaNetto [zł/mies.]	2500	2500	2500	2500	2500
ZużOlejuNap [l/h]	10	12	15	10	37
UdziałRemKons	0,15	0,15	0,15	0,15	0
CenaZakupuMaszyny [zł/szt.]	0	300000	120000	1200000	1620000
StopaAmort	0,2	0,2	0,2	0,2	
Ki [zł] [C · Td/(12 · 200 h)]	0	20000	8000	80000	36%
Krk [zł] [C · Td/(12 · 200 h)]	0	15000	6000	60000	28%
Ke [zł]	0	27826	34783	23188	21%
Kp [zł]	0	16500	16500	16500	15%
sumaK [zł]	0	79326	65283	179688	324297
Kbepośrednie [zł/m <sup>3</sup> ]	0,00	2,53	2,08	5,72	10,33
Kwydziałowe [zł/m <sup>3</sup> ]	0,00	1,77	1,46	4,01	7,23
Zysk [zł/m <sup>3</sup> ]	0,00	0,43	0,35	0,97	1,76
Kj, razem [zł/m <sup>3</sup> ]	0,00	4,72	3,89	10,70	19,31
Ceny:			bGS	Q [m <sup>3</sup> /h]	kj [zł/m <sup>3</sup> ]
Cena paliwa [zł/l]	4		0,5	76,4	13,7
UdziałRiK	0,15		1	54,2	19,3
ŚrPlaca, netto	2500		1,5	42,4	24,7
CenaEnEl [kWh]	0,35		2	36,5	28,6
KosztyWydziałowe [%]	70		2,5	33,3	31,4
Zysk [%]	10		3	31,4	33,3
Par. uziarn. bGS	1				



Natomiast przykład obliczenia całego układu wykonano w tabeli 3 w taki sposób, by można było prześledzić tok obliczeń i wielkości przyjęte do analizy.

### 3.2. KOSZTY PRODUKCJI

Przedmiotem analizy będą tylko koszty bezpośrednie, na które składają się koszty inwestycyjne, remontów i konserwacji, energii i obsługi (płace)

$$K_w = K_{in} + K_{rk} + K_{en} + K_{pl} \quad (17)$$

Koszty inwestycyjne maszyn, to odpis amortyzacyjny od ceny ich zakupu. Stopy amortyzacji są ustalone odpowiednimi przepisami finansowymi państwa.

Z kolei koszty remontów i konserwacji najczęściej określa się jako udział (np. 10%) w wartości początkowej maszyny, ale w skałach można ten udział podwyższyć nawet do 20%.

Koszty energii wynikają z analizy danych normatywnych i aktualnych cen rynkowych. Koszty płac wynikają z obsady stanowisk pracy. Na agregatach kruszących, do koparek i samochodów potrzeba po jednym pracowniku.

Analiza ekonomiczna rentowności usług powinna uwzględnić jeszcze pewne koszty stałe (wydziałowe i ogólnozakładowe).

## 4. PRZYKŁADY OBLICZEŃ EFEKTYWNOŚCI UKŁADÓW RECYKLINGOWYCH

Przykłady wykorzystania metody obliczenia wydajności i kosztów układu recyklingowego przedstawiono w tabeli 3. Jest to arkusz danych wejściowych oraz wyniki obliczeń wykonanych za pomocą arkusza kalkulacyjnego. Obliczenia poszczególnych maszyn wykonywane są w odrębnych arkuszach skoroszytu.

Program obliczeń skonstruowano w taki sposób, że można zadawać skład ziarnowy i obserwować reakcję układu recyklingowego (kruszarek, koparek, przesiewaczy) na zadane obciążenie i skład ziarnowy. Zależnie od zadanej konfiguracji systemu, wyznacza się automatycznie wydajność techniczną systemu i dla tej wartości oblicza się koszt jednostkowy produkcji.

Trzeba tu wyraźnie podkreślić, że użyte w przykładzie dane o awaryjności maszyn, dyspozycyjnym czasie pracy systemu (czas trwania usługi), składnikach kosztów, składzie ziarnowym nadawy, wydajności koparek i samochodów, są przykładowe i w konkretnych zastosowaniach muszą być ustalone przez usługodawcę w oparciu o doświadczenie z własnej praktyki recyklingowej oraz danych o procesie i kosztach eksploatacji używanych maszyn.

W obliczeniach tych przyjęto założenia, że przerabiana jest nadawa sucha, a skład ziarnowy zadany jest funkcją rozkładu Gaudina-Schuhmanna i modyfikowany przez

zmianę współczynnika kształtu  $b_{GS}$ . Oczywiście nie ma żadnych przeszkód, by posłużyć się rzeczywistym rozkładem uziarnienia nadawy. Jednocześnie:

- wydajność transportu samochodowego obliczono przy odległości dowozu nadawy 0,5 km;
- stopa amortyzacji maszyn wynosi 20%, a udział remontów i konserwacji 15%;
- koszty pracy przyjęto z narzutami w wysokości 65% płacy netto;
- koszty ogólne obliczono z uwzględnieniem kosztów ogólnowydziałowych (70%) i stopie zysku (10%).

W całości są to tylko przykłady sposobu obliczania kosztów i mogą one być łatwo zmieniane, zależnie od praktyki księgowej przedsiębiorcy. Głównym walorem obliczeń jest możliwość prześledzenia efektywności produkcji w konkretnym układzie recyklingowym, zastosowanym do konkretnego materiału (nadawy). W szczególności jest to ważne gdy mamy do czynienia z różnym skałami/odpadami oraz składem ziarnowym przewidywanego do przerobu surowca mineralnego.

#### LITERATURA

- [1] MALEWSKI J., *Metoda obliczania wydajności kruszarek*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 97, seria Konferencje nr 33, 2002.
- [2] MALEWSKI J., *Modelowanie i symulacja systemów wydobywania i przeróbki skał*, seria Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.

#### RECYCLING SERVICES VALUATION OF MINERAL WASTE PROCESSING IN MOBILE CRUSHING UNITS

Recycling systems are the small mobile aggregates used for crushing and screening mineral waste produced in mining or engineering processes. This machinery commonly used to operating small mineral sources, but sometimes applied also as complementary subsystems of the greater industrial processing units. In any case such technology can be offered to mineral business as commercial product of services. Detailed analysis of capacity and running costs of recycling systems consist of loader, trucks and mobile crushing unit is discussed in the paper. In results, some spreadsheet calculation are performed for illustrating of the efficiency prediction of analyzed circuits.