

STATYSTYCZNA ANALIZA STRUGI UROBKU GENEROWANEJ PRZEZ KOPARKĘ KOŁOWĄ

STATISTICAL ANALYSIS OF A STREAM OF MINED ROCK GENERATED BY BUCKET WHEEL EXCAVATOR

Jacek M. Czaplicki – Instytut Mechanizacji Górnictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest strumień urobku generowany przez koparkę kołową, mając na uwadze jego właściwości statystyczne. Informacja o zidentyfikowanych własnościach stanowiła podstawę do wyboru modelu opisującego ten strumień. Analiza została dokonana w oparciu o dane kopalniane, jakie zebrano przy realizacji pracy doktorskiej wykonywanej na Politechnice Wrocławskiej. W literaturze opisującej wnioskowanie o właściwościach strumienia na podstawie zebranego materiału, zaprezentowano nieco inne rezultaty aniżeli w niniejszej pracy.

Słowa kluczowe: struga urobku, właściwości statystyczne, rozkład normalny

A subject of consideration here is a stream of excavated rock won by BWE taking into account statistical properties of the stream. Information on the identified properties was a ground to select an appropriate model that describes the stream. Statistical analysis was done basing on data collected from the field investigation that was carried out to accomplish Ph.D. dissertation realised on Wrocław Technical University. In literature describing statistical inference on the properties of the stream a different approach and results are presented than that described here.

Key words: stream of mined rock, statistical properties, normal distribution

Wstęp

W górnictwie istnieje obszerna klasa obiektów technicznych, które mają za zadanie urabianie górotworu w sposób mechaniczny. Realizując ten cel swojego istnienia „generują” – używając określenia z zakresu symulacji – strumienie urobionej masy.

Jest oczywiste, że ten strumień – obojętnie czy jest on ciągły w swoim charakterze czy dyskretny – powinien być odebrany przez jakiś środek transportowy, odstawczy. Strumień musi być przejęty przez to urządzenie w taki sposób, by nie ingerować w proces urabiania lub zakłócać go w jak najmniejszym stopniu. Aby zrealizować ten cel, tym razem cel istnienia środka transportowego współpracującego bezpośrednio z maszyną urabiającą, należy znać właściwości generowanego strumienia masy. I to właściwości w dwojakim sensie.

Z jednej strony powinny być znane właściwości fizyko-mechaniczne urobku – jego granulacja, wielkość masy ziaren, abrazyjność, ciężar nasypowy, czy urobione bryły posiadają ostre krawędzie, spiczaste dzioby itd. Te informacje posłużą dla podjęcia decyzji czy urobek lepiej będzie ładować do jakichś skrzynek czy pojemników (np. skrzynie wagonów, skrzynie ładunkowe oponowych wozów odstawczych; niektóre przenośniki transportujące dyskretnie nosiwo też mają pojemniki) czy można podać na przenośnik taśmowy.

Z drugiej strony powinny być znane charakterystyki natury statystycznej takie, jak: średni strumień masy w jednostce czasu,

odchylenie standardowe tego strumienia, rozkład prawdopodobieństwa wydajności osiąganego przez maszynę urabiającą. Wszystkie te informacje są ważne, aby dobrać we właściwy sposób ten pierwszy środek odstawy, z punktu widzenia jego przepustowości transportowej oraz jakim nadmiarem w tym względzie powinno charakteryzować się to urządzenie. Informacja o realizacji strumienia w czasie powinna służyć do określenia innej zmiennej losowej – ilości masy urobku jaka znajduje się w danej chwili na przenośniku. Ta informacja jest istotna dla doboru mocy silnika bądź silników przenośnika.

Niestety, badania eksploatacyjne generowanych przez różne organa urabiające strumieni mas, dla identyfikacji ich właściwości i dalej, ich modelowania, są niestety dość sporadyczne. Jednym wyjątkiem w tym względzie był okres lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku, gdy nastąpił rozkwit zastosowań metod symulacyjnych w górnictwie w oparciu o eksperymenty statystyczne. Metoda Monte Carlo cieszyła się bardzo dużą popularnością na świecie i w bardzo wielu krajach świata opracowywano coraz to bardziej zaawansowane metody analizy systemów mechanizacyjnych z wykorzystaniem tej metody; począwszy od systemów ciągłych poprzez systemy dyskretnie aż do systemów mieszanych. Można się o tym przekonać studiując przegląd literaturowy w rozprawie doktorskiej Wianeckiego (1974) czy zapoznając się z pracami Sturgula (1996, 2000).

Ostatnio, w Polsce, w dwóch ośrodkach akademickich podjęto badania dla identyfikacji strumieni masy generowanej

przez maszyny urabiające. W Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach i w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. W pierwszym z wymienionych ośrodków obiektem zainteresowania był strumień urobku przepływający przez systemy przenośnikowe w podziemnych kopalniach węgla na Śląsku. W drugim ośrodku naukowym przedmiotem zainteresowania był strumień urobku generowany przez koparki wielonaczyniowe kołowe pracujące w kopalniach węgla brunatnego.

Podstawowe cele identyfikacji strugi masy w kopalniach powierzchniowych zostały przez Autorów badań (patrz np. Dworczyńska 2012, Dworczyńska, Gładysiewicz, Kawalec 2012) sformułowane następująco:

- ♦ identyfikacja zbiorczej strugi odstawianej masy, gdy urobek pochodzi z kilku maszyn urabiających,
- ♦ obniżenie zużycia energii przez napędy główne przenośników taśmowych,
- ♦ optymalizacja przenośników w fazie projektowania.

Badanie, które podjął Stawowiak z Instytutu Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej polegało na zbieraniu informacji o płynących strumieniach urobku przez podziemne przenośniki taśmowe w kopalniach węgla kamiennego. Informacje te były potrzebne dla realizacji rozprawy doktorskiej pt. „Porównanie analitycznego i symulacyjnego modelowania przepływającego strumienia urobku w systemie zbiornik przyśzybowy-urządzenie wyciągowe”, której obrona przewidziana jest na początku roku 2014.

Cele w obu przypadkach były różne, choć w jednym jak i drugim przypadku, w pierwszej kolejności konieczna była identyfikacja właściwości probabilistycznych strumieni w oparciu o dane empiryczne i dalej – analiza uzyskanych informacji. W obu przypadkach ten sposób postępowania został zrealizowany.

W przypadku analizy danych z podziemnych kopalń węgla uzyskany materiał z przeprowadzonej analizy czeka na opublikowanie. W przypadku analizy danych z powierzchniowych kopalń węgla brunatnego uzyskane informacje zostały zaprezentowane w referacie w 2012 roku (Dworczyńska et al.) Wydaje się, że zaprezentowane tam podejście można nieco zmodyfikować, a uzyskane informacje z dokonanej modyfikacji pozwolą na nieco inną interpretację uzyskanych rezultatów.

Zatem celem niniejszej pracy jest rozważenie innego sposobu identyfikacji właściwości statystycznych zebranych danych o strumieniach urobku generowanego przez koparki kołowe.

Wstępna analiza statystyczna

Jak wiadomo z cytowanej pracy, zebrano dane statystyczne dotyczące splywu urobku generowanego przez dwie koparki kołowe SRs1200 oraz SchRs1200. Z uwagi na fakt, iż obserwowane realizacje zmiennej losowej (tu: porcji urobku podawanych przez czerpaki koparki) w czasie są de facto realizacjami procesów stochastycznych, należało dokonać badania statystycznego dla identyfikacji podstawowych właściwości probabilistycznych tych procesów.

Wstępna analiza statystyczna powinna obejmować co najmniej dwa etapy:

- (a) badanie stacjonarności wartości średniej procesu,
- (b) badanie stacjonarności rozrzutu wartości zmiennej wokół średniej.

Na ogół, dysponując próbą statystyczną, dokonuje się badania stacjonarności realizacji zaobserwowanej zmiennej

losowej. Tu sytuacja jest nieco inna. Próba statystyczna jest bardzo liczna. Rozwiązaniem jest wyznaczenie średnich dla następujących po sobie odcinków realizacji zmiennej losowej o podobnej długości. Można potraktować wyznaczone średnie jako realizację pewnej zmiennej losowej i dokonać badania stacjonarności tej realizacji. Do badania stacjonarności można użyć testu wykorzystującego współczynnik korelacji rangowej Spearmana. Wykorzystując zebrane już dane i przeprowadzając badanie dla losowo wybranych przedziałów zmiennej można stwierdzić, że są takie okresy w splywie urobku, dla których brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy głoszącej stacjonarność. Pojawiają się także i takie okresy, w których są podstawy do zanegowania weryfikowanej hipotezy.

Oznacza to, że musi istnieć jakiś fizyczny czynnik bądź grupa czynników, która generuje zaobserwowaną prawidłowość. Łatwo te przyczyny zidentyfikować. Jest ich kilka, przy czym można je podzielić na dwie kategorie.

(1) Jednorodność urabianego materiału. Urabiany materiał nie jest warstwą jednorodną. Czasami maszyna urabia twardsze utwory geologiczne, czasami w górotworze zdarza się warstwa bardziej rozluźniona. Powoduje to, że w procesie frezowania materiału czerpaki koparki przez pewien losowy czas będą zagarniały nieco mniej materiału; czasami nagarniać będą nieco więcej. Wpływ niejednorodności ujawnia się szczególnie wyraźnie w czasie, gdy organ urabiający kończy frezować warstwę. Następuje samoistne rozluźnianie materiału, gdyż nie ma dalszej warstwy przyległej. Mogą występować i inne przyczyny, które można zaliczyć do tej grupy.

(2) Technologia procesu urabiania. Koło naczyniowe koparki wykonuje przy zabierkowym urabianiu kolejnych pasów cykliczne poziome ruchy, co powoduje obniżenie chwilowych wydajności przy nawrotach. Przy urabianiu tego typu koparka wykonuje również inne cykliczne ruchy manewrowe takie jak: dosuw, zmiana tarasu, zmiana zabioru. Wszystko to powoduje, że wydajność nie jest stała i może okresowo zmieniać się, przy czym pojęcie „okresu” tu użyte oznacza okres w sensie stochastycznym.

Przeprowadzając badanie stacjonarności realizacji omawianej zmiennej dla długiego okresu obserwacji można stwierdzić, że proces jest stacjonarny. Ma to swoje uzasadnienie fizyczne.

Generowany szereg czasowy $\{u_n, i=1, 2, \dots\}$ porcji urobku ma swoje granice. Lewostronną granicą jest zero, co jest oczywiste. Prawostronną natomiast granicą jest maksymalna wielkość urobku, jaka może fizycznie pomieścić się w czerpaku,

$0 \leq u_n \leq u_{max}$. Już w 1964 roku Gładysz zakładał, że proces ten można opisać procesem gaussowskim.

Dalszy krok w analizie statystycznej to badanie stacjonarności rozrzutu wydajności koparek. Chodzi o uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy rozrzut wartości zmiennej losowej wokół wartości przeciętnej (tu: lokalnej, gdyż proces splywu urobku jest, jak już wiemy, czasowo niestacjonarny), jest stały w czasie. Tu można skorzystać z co najmniej dwóch testów:

- test z wykorzystaniem statystyki F Snedecora,
- test Kruskala-Wallisa.

Pierwszy sposób analizy zakłada, iż mamy do czynienia ze zmienną gaussowską. Jak się wydaje, jest to najczęściej stosowany test w takim przypadku, jednakże konieczna jest weryfikacja uczynionego założenia.

Test Kruskala-Wallisa jest testem nieparametrycznym, a zatem nie ma żadnego założenia dotyczącego rozkładu prawdopodobieństwa badanej zmiennej; stąd jest on bardziej uniwersalny od testu F Snedecora¹.

Załóżmy, że nie mamy informacji *a priori* co do klasy rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej, więc należy skorzystać z testu Kruskala-Wallisa.

Dokonując odpowiedniego badania otrzymujemy informację analogiczną, jaką uzyskaliśmy przy badaniu stacjonarności wartości przeciętnej – zdarza się, iż rozrzut zmiennej wzrasta bądź czasami maleje w sposób statystycznie istotny. Rysunek 2.1, zaczerpnięty z rozprawy Dworaczyńskiej [6], jest ilustracją lokalnie niestacjonarnego przebiegu sływu urobku. Na tym rysunku (rys. 1) widać zarejestrowaną wydajność przenośnika odbierającego urobek z koparki kołowej.

Dalsza analiza statystyczna – empiryczny rozkład wydajności chwilowych

Abstrahując od dalszych, możliwych, bardziej subtelnych etapów badania właściwości zanotowanych realizacji procesów sływu urobku (np. badanie autokorelacji procesu), podejmijmy badania nad identyfikacją rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej i znalezieniem modelu teoretycznego, który opisywałby *dobrze*, w sensie statystycznym, zebrane dane.

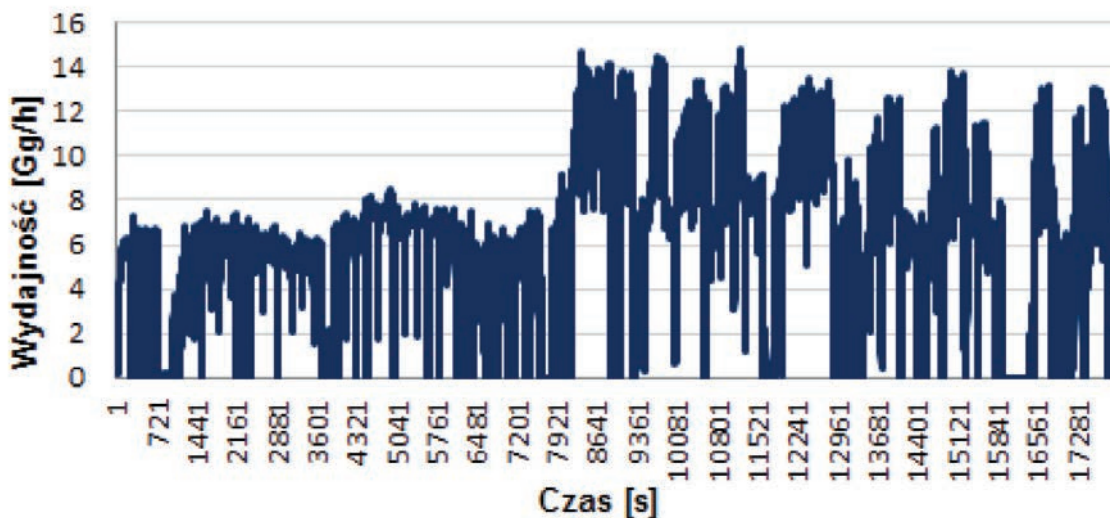
Rysunek 2 - histogram wydajności dla koparki SRs 2000 przedstawiony w pracy Jurdziaka (2006).

Kształt tego histogramu nie jest zaskakujący. Już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku prowadzone były badania strug urobku generowanych przez koparki wielonaczyniowe i jednym z wniosków było stwierdzenie (patrz np. Żur 1979), że proces zmienności natężenia przepływu urobku składa się z dwóch procesów podstawowych: pierwszy osiąga maksimum w pobliżu wydajności równej zero, co odpowiada pracy przenośnika niezaladowanego, a drugi przyjmuje wartości większe, skupione wokół maksimum odpowiadającego warunkom pracy przenośnika zaladowanego. Podobne w charakterze histogramy można uzyskać prowadząc badania innych koparek kołowych.

Analizując bardziej dokładnie histogram można dojść do wniosku, że ten graficzny obraz rozkładu zmiennej losowej jest złożeniem dwóch rozkładów (rys. 3), jednego o charakterze wykładniczym (tu: $f(x)$) i drugiego o charakterze normalnym (tu: $g(x)$).

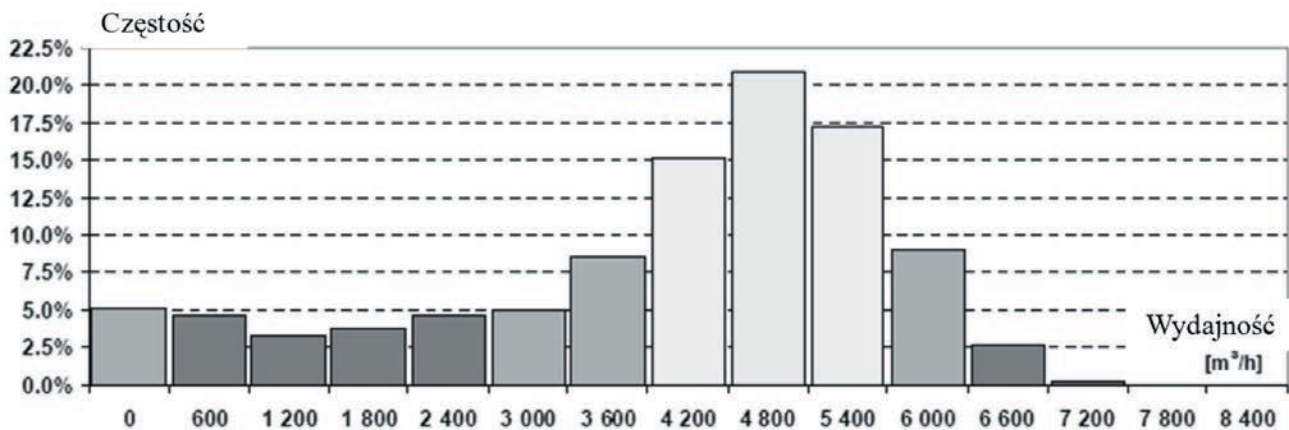
Można uzasadnić powyższe złożenie rozkładów.

W wielu pracach (np. Bucklen et al. 1968, Manula i Rivell 1974, Wiancki 1974, Antoniuk 1990, Czaplicki 1994, Stawowiak 2013) można znaleźć stwierdzenie, że strumień masy generowanej przez górnicze maszyny urabiające ma charakter gaussowski. Charakter ten dotyczy okresu regularnego



Rys. 1. Wykres wydajności przenośnika S10 (Dworaczyńska 2012)

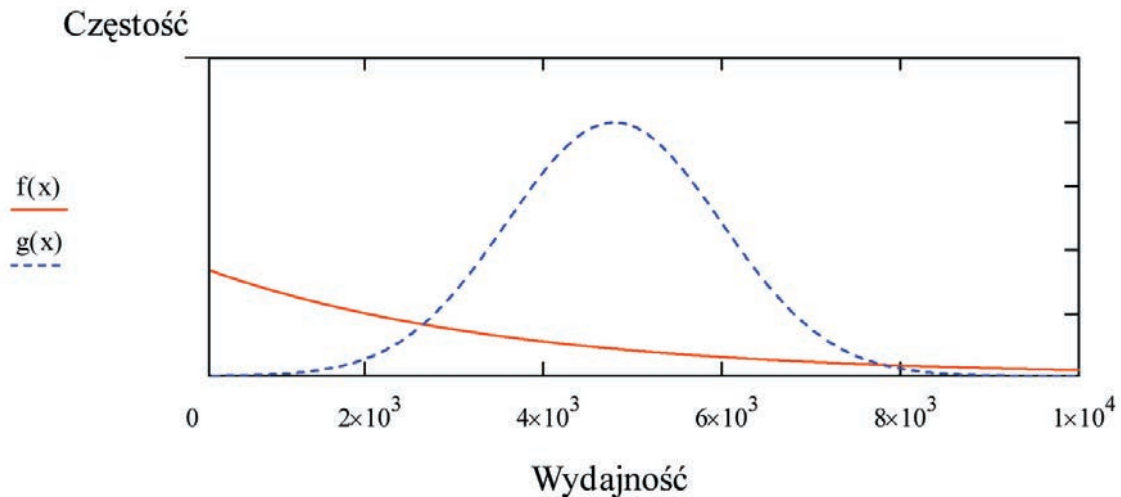
Fig. 1. Productivity of conveyor S10 (Dworczyńska 2012)



Rys. 2. Histogram wydajności dla koparki SRs 2000 (Jurdziak 2006)

Fig. 2. Productivity of BWE SRs 2000 (Jurdziak 2006)

¹ Niestety, test ten jest wyraźnie słabszy, co do swej mocy, od testu wykorzystującego statystykę F .



Rys. 3. Hipotetyczne, teoretyczne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa – składowe histogramu wydajności koparki kołowej
Fig. 3. Hypothetical and theoretical probability distributions – components of the histogram of BWE productivity

urabiania w miarę jednorodnej calizny. Rozkład o charakterze wykładniczym dotyczy różnych innych faz pracy maszyny.

Zauważmy, że o ile informacja o rozkładzie normalnym jest istotna dla doboru przenośnika taśmowego, który będzie odbierał generowany urobek, o tyle informacja o drugim rozkładzie jest istotna dla obliczeń trwałości elementów przenośnika, przede wszystkim krażników przenośnika.

Z uwagi na określone ramy niniejszej pracy ograniczone zostały rozważania do przypadku zorientowanego na przedstawienie informacji dla potrzeb doboru przenośnika odbiorczego.

Teoretyczny rozkład wydajności chwilowych

Mając empiryczny rozkład wydajności koparki i pozbawiając go składnika odnoszącego się do innych faz aniżeli regularna faza urabiania, otrzymuje się rozkład w miarę symetryczny, którego kształt jest podobny do kształtu dzwonowego. I w tym miejscu rodzi się problem, jakim rozkładem teoretycznym opisać otrzymany rozkład empiryczny. Nie sięgając po bardzo wysublimowane narzędzia modelowania w tym względzie, można rozważyć trzy rozkłady, powszechnie stosowane w inżynierii górniczej. Są to rozkłady: gamma, Weibulla i Gaussa.

Autorowi niniejszej pracy nie jest znana jakakolwiek praca na forum światowym, w której zastosowano rozkład gamma do opisu wydajności chwilowej maszyny urabiającej. Można jedynie odnotować dla porządku, że funkcja gęstości rozkładu

gamma w miarę wzrostu wartości parametru kształtu symetryzuje się i można przyjąć (Gerbach, Kordonski 1968), że dla wartości większych od 12 przejście z rozkładu gamma na rozkład normalny jest w pełni uzasadnione.

W pracach Jurdziaka (2006) i Dworaczyńskiej (2012) zdecydowano się na zastosowanie rozkładu Weibulla. Dworaczyńska zdecydowała arbitralnie na pominięcie tylko okresów zerowej wydajności koparki, co oznacza, iż przyjęła, że rozkład $f(x)$ jest zdegenerowany do jednego punktu; wydaje się to być zbyt daleko idącym uproszczeniem. Rysunek 4 - zaczerpnięty z rozprawy doktorskiej Autorki, prezentuje histogram wydajności jednej z koparek. Na rysunku przedstawiono także zaproponowany rozkład teoretyczny Weibulla.

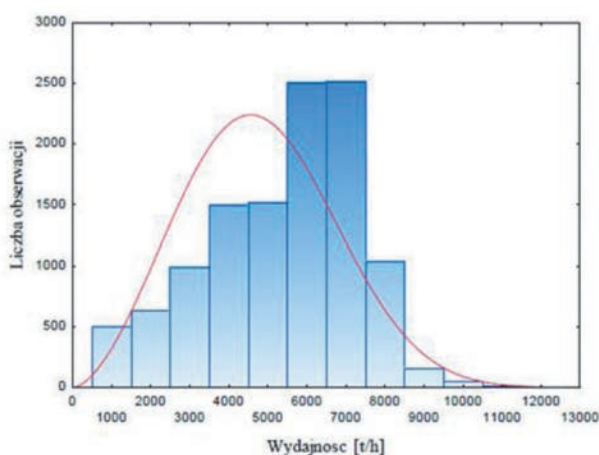
Biorąc pod uwagę, że liczność próby jest bardzo duża, więc rozbieżność pomiędzy rozkładami empirycznym i teoretycznym powinna być bardzo mała, co – patrząc na rysunek 4 – nie znajduje potwierdzenia na rysunku. Jest to spowodowane właśnie zbyt dużym uproszczeniem postaci rozkładu $f(x)$.

Warto zwrócić uwagę na trzy aspekty związane z zastosowaniem rozkładu Weibulla w niniejszej analizie statystycznej.

Rozkład Weibulla zastosowali Sevim i Qing Wang (1988) do opisu rozrzutu sumarycznej masy urobku dostarczonej pod szyb w ciągu doby w kopalni głębinowej. Zastosowanie tego rozkładu (a nie normalnego) doprowadziło autorów do nietrafionego wniosku, że zbiornik przyszybowy powinien być o bardzo dużej objętości; *de facto* przewymiarowany.

Aplikacja rozkładu Weibulla w cytowanej rozprawie doktorskiej skutkowałą tym, że w dalszej analizie dotyczącej rozkładu wydajności przenośnika zbiorczego dla dwóch pracujących koparek, nie można było znaleźć jawnej postaci rozkładu będącego sumą dwóch zmiennych losowych. Autorka rekomendowała zastosowanie metody symulacji dla znalezienia nieznanego rozkładu. Idąc tym tropem rozumowania można zauważyć, że trzeba było zastosować metodę symulacji od początku, a nie szukać rozwiązań analitycznych. Pamiętajmy jednakże, iż rozwiązania analityczne – jeżeli takie istnieją – mają zawsze przewagę nad rozwiązaniami symulacyjnymi.

Jest jeszcze jeden aspekt warty odnotowania. Z teorii wiadomo, że jeżeli wartość parametru kształtu w rozkładzie Weibulla jest bliska 3,3 to rozkład jest symetryczny, a kształt funkcji gęstości jest dzwonowaty i jest zasadność przejścia na rozkład normalny. W obliczeniach statystycznych Dworaczyńskiej wartości parametru kształtu są niedalekie od trzech. Biorąc to pod uwagę, a także niedoskonałość wynikającą z odrzucenia



Rys. 4. Histogram wydajności koparki K1 i rozkład teoretyczny (Dworaczyńska 2012)

Fig. 4. Histogram of the productivity of BWE K1 and the theoretical density function (Dworaczyńska 2012)

tylko częstości w zerze oraz mając na uwadze informacje w literaturze przedmiotowej można przyjąć, że lepszym rozwiązaniem byłoby przyjęcie rozkładu Gaussa aniżeli rozkładu Weibulla². Jest to tym bardziej uzasadnione, ponieważ rozkład normalny opisuje lepiej dane doświadczalne zebrane w trakcie realizacji jej pracy. Można to stwierdzić konstruując dwa rozkłady prawdopodobieństwa – Weibulla i Gaussa – mające tą samą wartość oczekiwaną i tą samą wariancję dla danych z rysunku 4. Ich wzajemne położenie będzie takie, jak to widać na rysunku 5.

Również w artykule Jurdziaka (2006) przedstawionych jest kilka histogramów i funkcji gęstości Weibulla i z racji ich dość symetrycznego kształtu można domniemywać, że można rozkłady Weibulla zastąpić rozkładami normalnymi, zwłaszcza, że brak jest informacji na temat kryterium odcięcia wydajności małych; skala wydajności rozpoczyna się od 2000 m³/godz.

Rozkład sumarycznej strugi urobku otrzymywanej z kilku koparek

Generowany strumień urobku podawany jest na kolejne przenośniki taśmowe, odstawcze. Bardzo często jest tak, że to struga urobku spotyka się z inną, wygenerowaną przez inną maszynę urabiającą. W niektórych kopalniach odkrywkowych łączy się trzy lub nawet więcej strumieni masy. Wydajności przenośników zbiorczych muszą być tak dobrane, by podołać tym zwiększonym wymaganiom. Ważnym pytaniem jest: Jakim modelem można opisać strugę zbiorczą?

Z chwilą zastosowania rozkładu Weibulla do opisu pojedynczej strugi odpowiedzi nie ma. Można co najwyżej zapisać całość opisującą rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej będącej sumą dwóch strumieni i zapis się coraz bardziej komplikuje, gdy liczba strumieni wzrasta. Jawnych postaci wzorów nie da się uzyskać. Nie ma nazw teoretycznych na takie procesy losowe. Nie ma opracowań teoretycznych w tym względzie.

Sytuacja ulega diametralnej zmianie, gdy generowane strumienie urobku można opisać procesem gaussowskim. Dość powiedzieć – bazując na teorii – że:

- ♦ proces losowy będący sumą procesów gaussowskich jest

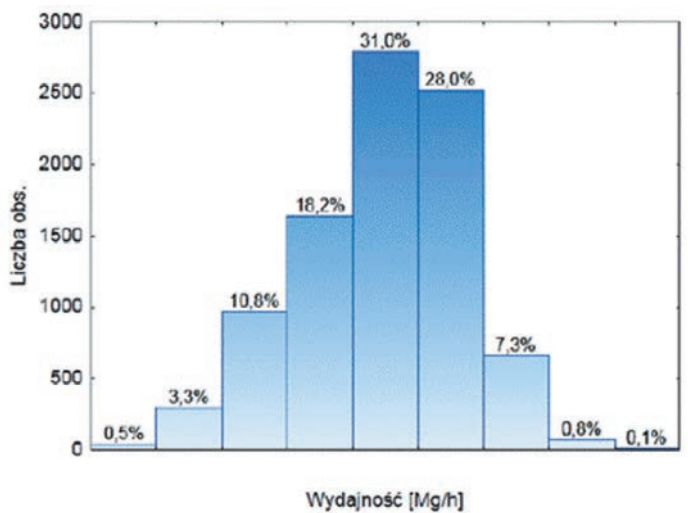
procesem gaussowskim,

- ♦ wartość oczekiwana procesu zbiorczego jest równa sumie wartości oczekiwanych procesów składowych,
- ♦ wariancja procesu zbiorczego jest równa sumie wariancji procesów składowych.

Przyjrzyjmy się histogramowi wydajności chwilowych strumienia będącego sumą dwóch procesów składowych przedstawionego w rzeczonyj rozprawie doktorskiej (rys. 6). Jest on symetryczny o kształcie dzwonowym. Zastosowany test zgodności chi-kwadrat Pearsona nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy głoszącej, iż rozkład empiryczny można opisać rozkładem Gaussa.

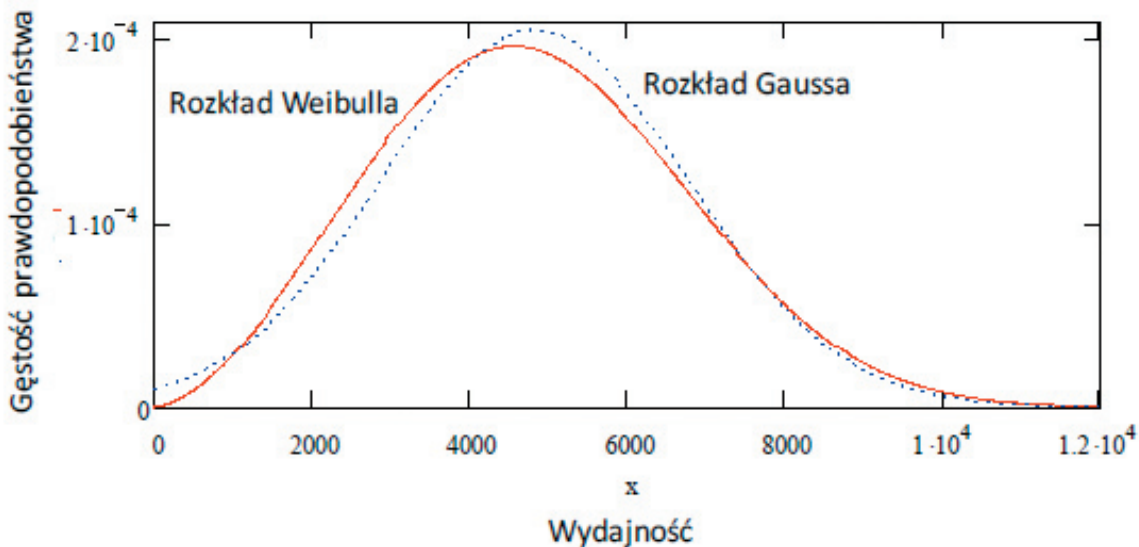
Mając do czynienia z procesem zbiorczym spływu urobku należy zwrócić uwagę na dwie cechy charakterystyczne:

- (1) o ile, w przypadku rozpatrywania strumienia generowanego przez jedną koparkę, celowe jest uwzględnienie punktów ucięcia, o tyle w przypadku strumienia sumarycznego istotność ucięcia dla funkcji gęstości $g(x)$ w zerze traci sens; masa prawdopodobieństwa odsuwa się bowiem od zera,



Rys. 6. Histogram wydajności chwilowych dla strugi zbiorczej (Dworaczyńska 2012)

Fig. 6. Histogram of instantaneous productivity for cumulative stream



Rys. 5. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa Weibulla i Gaussa dla histogramu z rys. 4
Fig. 5. Probability density functions: Weibull and Gauss for the histogram in Figure 4

² Warto zauważyć, że rozkład Weibulla i rozkład gamma są szczególnymi przypadkami jednego rozkładu – uogólnionego rozkładu gamma.

(2) rośnie problem granicy prawostronnej, która ma wpływ na dobór szerokości taśmy; rośnie bowiem, w sposób istotny, rozrzut zmiennej³.

Jeżeli rozpatrywać problem doboru taśmy zbiorczej w obszarze probabilistyki, to problem doboru taśmy sprowadza się do przyjęcia takiej wartości wydajności chwilowej, o określonym prawdopodobieństwie pojawienia się, która będzie zabrana przez przenośnik; wszystko powyżej zasili przenośnik ścierowy.

Można też pokusić się o rozpatrzenie tego problemu w obszarze statystycznych funkcji decyzyjnych uwzględniając aspekt ekonomiczny.

Stany systemu kilku koparek kołowych

Zdarza się, że w dużych wyrobiskach eksploatacyjnych złóż pokładowych zalegających poziomo⁴ użytkowanych jest równocześnie kilka koparek kołowych i tworzą one system. Generują strumienie urobku, które łączą się w jedną strugę. Jak już wiemy, w przypadku, gdy strumienie te można opisać modelami procesów gaussowskich, to strumień zbiorczy ma również charakter gaussowski. Jednakże na podstawie znajomości takich modeli i ich parametrów nie jesteśmy w stanie określić wydajności systemu. Potrzebna jest informacja o stanach systemu i prawdopodobieństwach ich pojawienia się w procesie eksploatacji.

Zacznijmy od stanów, w jakich może znaleźć się pojedyncza koparka. Podzielmy te stany na:

- zdeterminowane,
- pojawiające się stochastycznie.

Stany zdeterminowane to obsługi planowe. Maszyna jest wyłączona z procesu urabiania i dokonywane są niezbędne przeglądy, planowane wymiany i zabiegi profilaktyczne. Zabiera to pewien czas i stąd podawana jest informacja, jaką część jednostki czasu trzeba poświęcić na tego typu obsługi. W probabilistycznych analizach procesu eksploatacji maszyny obsługi planowe są wyłączone z rozważań.

Drugi zbiór stanów, oznaczmy go przez $\{s_i, i=1,2,3\}$ to stany, których czas trwania jest losowy i które z reguły pojawiają się stochastycznie. Są to stany: pracy, naprawy i niedostępności do realizacji procesu urabiania.

W stanie pracy, s_1 , maszyna urabia i generuje strumień urobku.

W momencie pojawienia się uszkodzenia w koparce, przyjmujemy, że maszyna przechodzi w stan naprawy s_2 i oczywiście nie generuje strumienia masy. Tu będą nas interesowały tylko takie uszkodzenia, których usuwanie skutkuje wstrzymaniem pracy maszyny.

W stanie s_3 , niedostępności do realizacji procesu urabiania, maszyna jest sprawna (jest w stanie pracy w sensie niezawodności), nie ma uszkodzenia, lecz nie realizuje ona procesu urabiania z różnych przyczyn; przyczyn, które pojawiły się losowo. Czas tego stanu jest również losowy, a jego pojawienie się jest związane z właściwościami procesu eksploatacji maszyny.

Niezawodność maszyny jest określana w obszarze alternatywnego procesu zmiany stanów $\{s_1, s_2\}$. Ponieważ koparka jest obiektem odnawialnym więc podstawowym jej miernikiem niezawodności jest współczynnik gotowości i to współczynnik graniczny⁵. Jest to prawdopodobieństwo zdarzenia, że koparka jest w stanie pracy w dowolnej chwili procesu zmiany stanów $\{s_1, s_2\}$. Stany te są stanami własnymi maszyny i zależą od trzech czynników:

- (1) właściwości nadanych jej na etapie projektowania i produkcji,
- (2) przyjętej metodzie eksploatacji maszyny,
- (3) otoczeniu maszyny rozumianego w sensie teorii systemów.

Z punktu widzenia realizacji procesu urabiania koparka może generować urobek (stan pracy, s_1) albo urobek nie jest generowany (suma stanów: $s_2 \cup s_3$). Są to oczywiście stany alternatywne o różnej naturze. Interesującym miernikiem jest prawdopodobieństwo p_g zdarzenia, że koparka generuje urobek.

Możemy przyjąć, że koparki pracują niezależnie od siebie i pojawiające ich stany $\{s_i\}$ są wzajemnie stochastycznie niezależne, więc liczba możliwych stanów systemu wynosi 2^k gdzie k jest liczbą koparek. I tak np. dla systemu złożonego z trzech maszyn, $k=3$, mamy następujący repertuar stanów:

$$\{ggg, ggn, gng, ngg, gnn, ngn, nng, nnn\}$$

gdzie symbol g oznacza tu stan generowania urobku, a symbol n stan przeciwny.

Każdemu stanowi systemu można przypisać miarę probabilistyczną – prawdopodobieństwo pojawienia się tego stanu.

Z każdym stanem systemu związany jest różny strumień masy generowany przez system.

Możemy zatem obliczyć średnią wydajność systemu zgodnie ze wzorem:

$$\bar{Q} = p_{ggg}(\bar{q}_1 + \bar{q}_2 + \bar{q}_3) + p_{ggn}(\bar{q}_1 + \bar{q}_2) + p_{gng}(\bar{q}_1 + \bar{q}_3) + ; \\ + p_{gnn}(\bar{q}_1) + p_{ngn}(\bar{q}_2) + p_{nng}(\bar{q}_3)$$

gdzie, przykładowo, symbol p_{ggg} oznacza stan pracy trzech koparek, a symbol \bar{q}_1

oznacza średnią wydajność pierwszej koparki. Dalsze symbole można łatwo zidentyfikować.

Zauważmy, że gdy koparki są takie same i można przyjąć, iż mają ten sam współczynnik gotowości, wówczas rozkład prawdopodobieństwa liczby maszyn w stanie generowania urobku opisuje dwumianowy rozkład prawdopodobieństwa (Czaplicki 2012 rozdz. 10).

³ Warto zwrócić uwagę na to, że wraz z długością drogi przebytej przez strugę jej dyspersja maleje.

⁴ Jest to ważne założenie, gdyż np. w Indonezji eksploatowane są złoża węgla kamiennego o znacznym nachyleniu (30° i więcej) i wyrobisko eksploatacyjne ma charakter stożkowy.

⁵ Współczynnik gotowości jako funkcja czasu jest interesujący dla systemów gotowościowych.

Literatura

- [1] Antoniak J.: *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Wyd. Śląsk, Katowice 1990
- [2] Bucklen, E. P., Suboleski, S. C., Preklaz, L. J., and Lucas J. R., 1968. *Computer applications in underground mining systems*. Vol. 4, BELTSIM Program, Research Development Report No 37, Virginia Polytechnic Institute
- [3] Czaplicki J. M.: *Uwagi krytyczne o modelowaniu analitycznym strumienia nosiwa na przenośniku*. X Szkoła Jesienna - Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 75, Konferencje Nr 17, Wrocław, 1994
- [4] Czaplicki J.M.: *Elementy statystyki matematycznej i ich zastosowania w inżynierii górniczej i robót ziemnych*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011
- [5] Czaplicki J.M.: *Niezawodność w zagadnieniach mechanizacji górnictwa i robót ziemnych*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012
- [6] Dworczyńska M.: *Modelowanie zmienności strugi urobku w systemach KTZ*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wydz. Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wrocław 2012
- [7] Dworczyńska M., Gładysiewicz L., Kawalec W.: *Model strugi urobku dla potrzeb projektowania przenośników zbiorczych*. Szkoła Górnictwa Odkrywkowego Kraków, 27-28.03.2012
- [8] Gercbach I.B., Kordonski Ch.B.: *Modele niezawodnościowe obiektów technicznych*. WNT, W-wa 1968
- [9] Gładysz S.: *Analiza statystyczna nieregularności rozkładu mas na taśmociągach i zwalówarkach obsługujących układ koparek i taśmociągów*. Prace Naukowe Instytutu Matematyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1964 (praca niepublikowana)
- [10] Jurdziaik L.: *Wykorzystanie teorii wartości ekstremalnych do wymiarowania przenośników współpracujących z koparkami kołowymi*. Transport przemysłowy, 3, 25, 2006, s. 38-43
- [11] Manula, C., and Rivell, R., 1974. *A master design simulator*. APCOM 12, Colorado School of Mines Quarterly
- [12] Sevim H., Qing Wang.: *Design and economic evaluation of hoisting system*. Trans. Inst. Min. Metall., 97, July 1988, p. A129-133
- [13] Stawowiak M.: *Porównanie analitycznego i symulacyjnego modelowania przepływającego strumienia urobku w systemie zbiornik przyszybowy-urządzenie wyciągowe*. Rozprawa doktorska, Instytut Mechanizacji Górnictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013
- [14] Sturgul J.R.: *History of discrete mine system simulation*. I Internet Symposium on Mine Simulation via Internet, Athens, Greece, December 1996
- [15] Sturgul J.R.: *Mine design: examples using simulation*. SME, 2000
- [16] Wiancki A.: *Badania pracy układów podziemnego transportu ciągłego za pomocą metody symulacji procesów produkcyjnych*. Rozprawa doktorska, Wydział Górniczy, Politechnika Śląska, Gliwice, czerwiec 1974
- [17] Żur T.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wyd. „Śląsk”, Katowice, 1979