

*Jerzy Alenowicz\*, Marek Onichimiuk\*, Marian Wygoda\**

## OBCIĄŻENIA EKSTREMALNE W PROCESIE PROJEKTOWANIA I EKSPLOATACJI KOPAREK KOŁOWYCH PRZEZNACZONYCH DO PRACY W GRUNTACH TRUDNO URABIALNYCH KOPALŃ ODKRYWKOWYCH WĘGLA BRUNATNEGO

---

### 1. Wstęp

W procesie projektowania koparek kołowych wielonaczyniowych, które stanowią podstawowy potencjał eksploatacyjny w krajowych kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego, najistotniejszym zagadnieniem jest dobór odpowiednich wartości obciążeń zewnętrznych występujących podczas urabiania. Jest to o tyle istotne, że w oparciu o wielkości sił zewnętrznych obciążających koło czerpakowe następuje wymiarowanie pozostałych zespołów koparki kołowej (w szczególności konstrukcji nośnej) oraz dobór mocy najważniejszego mechanizmu, jakim jest mechanizm napędu koła czerpakowego. Zagadnienie doboru odpowiednich wartości obciążeń zewnętrznych koła czerpakowego jest również bardzo istotne w bieżącej eksploatacji koparek np. podczas ich modernizacji. Modernizacja dotyczy bowiem najczęściej układów urabiania i prowadzona jest pod kątem dostosowywania ich do pracy w gruntach o zwiększonych oporach urabiania.

W dotychczasowej praktyce projektowej do obliczania sił zewnętrznych obciążających koło czerpakowe stosowany był przeważnie deterministyczny model procesu urabiania. Model ten zakłada, że siła urabiania jest wprost proporcjonalna do czynnej długości ostrza czerpaka  $L$  wnikającego w caliznę lub do powierzchni odcinanego wióra  $A$ . Współczynniki tej proporcjonalności określane są mianem jednostkowych oporów urabiania, odpowiednio liniowym i powierzchniowym [1].

---

\* Poltegor-Institut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

\*\* Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr 4T07A01230 finansowanego przez MNiSW

Powyższy model został wielokrotnie sprawdzony w odniesieniu do koparek pracujących w gruntach łatwo i średnio urabialnych. Niestety w gruntach trudno urabialnych model ten nie sprawdził się, czego dowodem są liczne awarie koparek eksploatowanych w tych gruntach. Nie ujmuje on bowiem wpływu przestrzennego ukształtowania narzędzi urabiających, złożonej kinematyki układów roboczych o ruchu ciągłym oraz zakłóceń tego ruchu wynikających z niejednorodności urabianych gruntów [2].

Wobec powyższych faktów, a także coraz częściej występującej konieczności eksploatacji koparek kołowych w gruntach trudno urabialnych podjęto próbę opracowania nowego modelu obciążeń ekstremalnych koła czerpakowego (rys. 1 i 2).

Istotą tego modelu jest opracowanie go na podstawie analizy procesu urabiania skał spoistych narzędziami o ruchu ciągłym złożonym oraz rzeczywistych wartości i przebiegów obciążeń ekstremalnych występujących podczas pracy koparek kołowych, co przedstawiono w podrozdziale 2.



**Rys. 1.** Koparka kołowa wielonaczyniowa KWK 910 zaprojektowana do eksploatacji w gruntach trudno urabialnym KWB „Turów” SA



**Rys. 2.** Widok koła czerpakowego KWK 910 podczas pracy w najtrudniej urabialnych gruntach KWB „Turów” SA

## 2. Deterministyczny model obciążeń zewnętrznych procesu urabiania

Jak podano we wstępie, deterministyczny model procesu urabiania zakłada, że siła urabiania na kole czerpakowym jest wprost proporcjonalna do czynnej długości ostrza czerpaka  $L$  wnikającego w caliznę lub do powierzchni odcinanego wióra  $A$ . Zależności te można wyrazić następującymi wzorami:

$$F_{u1} = k_L \cdot L \quad (1)$$

$$F_{u1} = k_A \cdot A \quad (2)$$

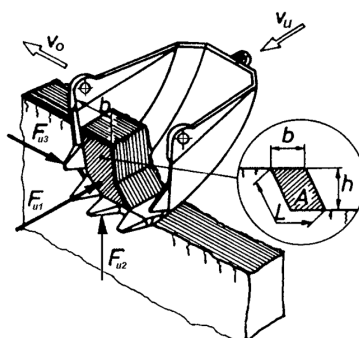
gdzie:

- $F_{u1}$  — wartość składowej stycznej (obwodowej) siły urabiania,
- $k_L$  — średni jednostkowy opór urabiania liniowy [kN/m],
- $k_A$  — średni jednostkowy opór urabiania powierzchniowy [kN/m<sup>2</sup>].

Wielkości średnich jednostkowych oporów urabiania wyznaczane są doświadczalnie dla różnych rodzajów gruntów. W praktyce okazuje się, że wielkości  $k_L$  i  $k_A$  zależą nie tylko od właściwości urabianego ośrodka, ale również od innych parametrów [3]. Dlatego w ostatnim czasie opracowano empiryczne wzory umożliwiające dokonanie prognozy jednostkowych oporów urabiania w oparciu o właściwości fizyko-mechaniczne gruntów sypkich, spoistych i węgla brunatnego. Zostały one określone dla konkretnych warunków urabiania, a mianowicie urabiania wielonaczyniową koparką kołową [4, 5]. Poszukiwana zależność oporów jednostkowych od wymiarów odcinanego wióra wynika przede wszystkim z tego, że takie podejście umożliwia wykorzystanie nagromadzonego materiału doświadczalnego bazującego na tych wielkościach. Pozostałe składowe siły urabiania można wyznaczyć jako proporcjonalne do składowej siły stycznej (rys. 3) a mianowicie:

$$F_{u2} = k_2 \cdot F_{u1} \quad (\text{składowa promieniowa}) \quad (3)$$

$$F_{u3} = k_3 \cdot F_{u1} \quad (\text{składowa pozioma}) \quad (4)$$



Rys. 3. Schemat obciążenia pojedynczego czerpaka w procesie urabiania

Współczynniki występujące we wzorach (3) i (4) są wartościami zmiennymi. Zależą one w decydującym stopniu od parametrów pracy koparki i dla chwilowych wartości sił mogą przyjmować wartości w szerokim przedziale — prawie od zera do wartości przekraczającej znacznie wartość 2 z tym, że przyjmuje się tym większe wartości tych współczynników im trudniej urabiana jest skała [5].

Dla obrotu koła czerpakowego o kąt  $\varphi$  (rys. 4), na pojedynczym czerpaku następuje zmiana wartości stycznej siły urabiania  $F_{u1}$  na skutek zmiany wymiarów przekroju poprzecznego odspojonego wióra  $A(\varphi)$ . Ponieważ wielkość  $A(\varphi)$  można po przekształceniach przedstawić w ostatecznej postaci jako:

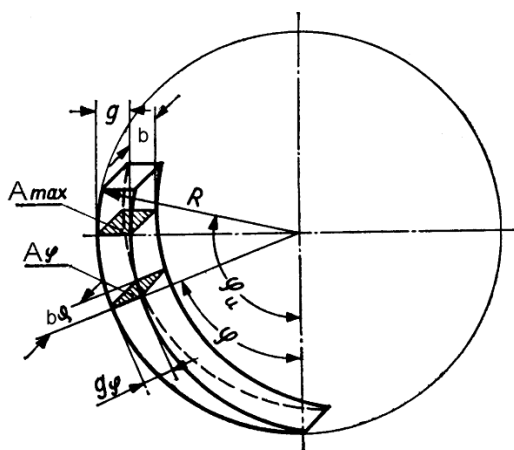
$$A(\varphi) = \begin{cases} \frac{4\pi Q_t \sin \varphi}{(1 - \cos \varphi_u) \cdot z \cdot \omega_k \cdot D} & \text{dla } 0 < \varphi \leq \varphi_u \\ 0 & \text{dla } \varphi > \varphi_u \end{cases} \quad (5)$$

stąd też po podstawieniach zgodnie z zależnością (2):

$$F_{u1}(\varphi) = k_A \cdot A(\varphi) = \begin{cases} \frac{4\pi Q_t \sin \varphi}{(1 - \cos \varphi_u) \cdot z \cdot \omega_k \cdot D} \cdot k_A & \text{dla } 0 < \varphi \leq \varphi_u \\ 0 & \text{dla } \varphi \geq \varphi_u \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

- $Q_t$  — wydajność techniczna koparki,
- $z$  — liczba czerpaków na kole,
- $D$  — średnica koła czerpakowego,
- $\omega_k$  — prędkość obrotu koła czerpakowego,
- $\varphi$  — kąt obrotu koła czerpakowego liczony od wejścia czerpaka w urabianą caliznę,
- $\varphi_u$  — kąt obrotu koła czerpakowego odpowiadający wysokości urabianego wióra.



Rys. 4. Kształt i wielkości charakteryzujące wiór pionowy koparki kołowej [6]

### 3. Statystyczny model obciążeń zewnętrznych procesu urabiania niejednorodnych gruntów trudno urabialnych

Przedstawiony powyżej model deterministyczny nie potwierdził się dla gruntów niejednorodnych i trudno urabialnych, ponieważ w gruntach tych na skutek ich wysokich wartości ściernych następuje szybkie tępienie się ostrza tzn. szybki wzrost promienia jego zaokrąglenia, stąd wzrostu powierzchnia przyłożenia ostrza a zatem następuje również wzrost oporów urabiania  $k_L$ . Dla założonej wydajności powoduje to konieczność zwiększenia poboru mocy przez mechanizm koła czerpakowego [7].

Ponadto na skutek drgań konstrukcji nośnej (spowodowanych uderzeniami o kamienie i twarde przerosty) oraz wylamywanie się zębów i noży czerpaków wartość przekroju poprzecznego wióra  $A$  również ulega okresowym zmianom w czasie. Zresztą nawet w glinach piaszczystych o dużej zawartości krzemionki hipotezy o jednostkowych oporach urabiania nie są w pełni adekwatne a zatem szacowanie obciążeń konstrukcji nośnej koparki wywołane procesem urabiania na podstawie powyższych hipotez nie sprawdza się.

Ponieważ jak stwierdzono w wyniku badań, obciążenia konstrukcji koparki procesem urabiania są dla niej decydujące dla potrzeb obliczeniowych konstrukcji nośnej opracowano analityczno-doświadczalny model rozkładu sił urabiania [8]. Model ten powstał na podstawie licznych badań reakcji ustroju nośnego wysięgnika koła czerpakowego na proces urabiania. Badano przebiegi czasowe wzajemnie prostopadłych naprężeń normalnych działających na konstrukcję nośną wysięgnika, estymując na podstawie długoterminowych badań eksploatacyjnych rozkłady statystyczne dla każdej ze składowych sił działających na tę konstrukcję. W rezultacie uzyskano adekwatny model rozkładu sił urabiania.

$$F_u = \begin{bmatrix} F_{u1}(t) \\ F_{u2}(t) \\ F_{u3}(t) \end{bmatrix} = \text{diag}(A_x, W_y, W_z) \cdot K_\phi^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_x(t) \\ \sigma_y(t) \\ \sigma_z(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie:

- $K_\phi$  — macierz kwadratowa współczynników geometrycznych konstrukcji nośnej wysięgnika urabiającego koparki,
- $A_x$  — pole powierzchni przekroju poprzecznego konstrukcji nośnej wysięgnika,
- $W_y, W_z$  — wskaźniki przekroju poprzecznego na zginanie konstrukcji nośnej wysięgnika,
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — naprężenia normalne w przekroju poprzecznym konstrukcji nośnej wysięgnika w przyjętym układzie współrzędnych.

Z racji znacznych oddziaływań dynamicznych pomiędzy urabianym gruntem a narzędziem, kształt przekroju wióra jest funkcją chwilowego ugięcia wysięgnika. Punkt przyłożenia wypadkowych sił urabiania staje się nieokreślony. Mimo to model ten pozwala na określenie oddziaływań tych wypadkowych na konstrukcję. Korzysta on z wzajemnie ortogonalnych doświadczalnie wyznaczonych naprężeń głównych w dowolnie wybranym przekroju wysięgnika koła czerpakowego. Następnie pozwala na oszacowanie modułów trzech składowych wypadkowej siły urabiania w dowolnej chwili. Model ten został zweryfikowany na prawie wszystkich typach maszyn w Polsce. Nie ma w nim jednak nic o wpływie zębów i noży naczyń urabiających na proces odspajania wióra. Został on zbudowany wyłącznie dla potrzeb obliczeń wytrzymałościowych konstrukcji nośnej koparki. Wnioskiem zasadniczym wynikającym z tego modelu jest jednak fakt stochastycznego charakteru naprężeń w konstrukcji nośnej. Przy liniowym modelu wytrzymałościowym Hooke'a, a więc znacznie poniżej granicy sprężystości tworzywa konstrukcyjnego oznacza to, że wejście a więc

rozkład sił na narzędziu urabiającym jest również stochastyczne. Niezmienna geometria maszyny; średnica koła czerpakowego, kształt naczyń, liczba czerpaków i zębów, obroty koła, aktualny kąt i wysokość urabiania — sugeruje, że losowo zmienne mogą być tylko:

- przekrój odspajanego wióra  $A$  (oraz wynikająca stąd sumaryczna długość czynna krawędzi urabiającej) zmienny w czasie drgań nadwozia koparki
- jednostkowe opory urabiania  $k_A$  — ujmujące aktualny stan niewiedzy i niepewności o wytrzymałości lokalnej urabianej skały.

Wykorzystując koncepcję powyższego modelu przyjęto hipotezę o możliwości połączenia go z hipotezą o jednostkowych oporach urabiania i zaproponowano następujący statystyczny model urabiania gruntów, gdzie wartość składowej stycznej  $F_{ul}$  definiowana jest w następujący sposób [9]:

$$F_{ul}(\varphi, t) = p[k_A(\Omega)] \cdot A(\varphi, t) = \begin{cases} \frac{4\pi Q_i \sin \varphi}{(1 - \cos \varphi_u) \cdot z \cdot \omega_k \cdot D} \cdot p[k_A(\Omega)] & \text{dla } 0 < \varphi \leq \varphi_u \\ 0 & \text{dla } \varphi > \varphi_u \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:

$k_A(\Omega)$  — rozkład statystyczny jednostkowych oporów urabiania w ośrodku niejednorodnym.

$p[k_A(\Omega)]$  —  $p$ -ty kwantyl rozkładu  $k_A(\Omega)$ .

Kwantyl rzędu  $p$  jest to wartość  $x_p$  zmiennej losowej  $X$ , przy której prawdopodobieństwo zdarzenia  $X \leq x_p$  wynosi  $p$  tzn. w punkcie  $x = x_p$  wartość dystrybuanty jest równa  $p$ .

$$F(x_p) = p(X \leq x_p) = p \quad (9)$$

Taka hipoteza pozwala wykorzystać dotychczasowe wieloletnie dane doświadczalne z urabiania gruntów jednorodnych z danymi pomiarowymi świadczącymi niezbić o stochastyczności procesu urabiania gruntów niejednorodnych.

Nowością jest tu wprowadzenie w miejsce stałego jednostkowego oporu  $k_A$ , doświadczalnie wyznaczonego rozkładu statystycznego  $k_A(\Omega)$ .

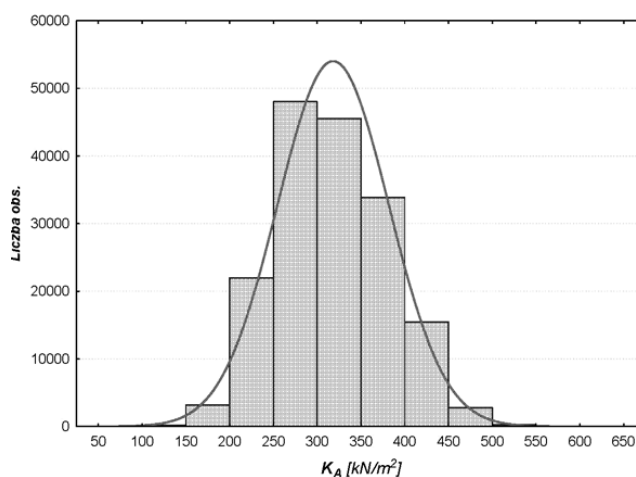
Aby wykorzystać dotychczasową bazę wiedzy, przyjęto, że wartość oczekiwana tego rozkładu dla gruntów jednorodnych wynosi właśnie  $k_A$ . Jeśli rozkład ten jest symetryczny to rząd kwantyla  $p\{E[k_A(\Omega)]\}$  jest równy 0,5.

#### 4. Doświadczalna weryfikacja opracowanego modelu statystycznego

Dla weryfikacji opracowanego modelu statystycznego przeprowadzono badania długoterminowe oporów urabiania. Ponieważ wybór rodzaju gruntu podczas badań praktycznie

nie jest możliwy, zdecydowano się na tzw. eksperyment bierny prowadząc badania na wielu koparkach pracujących na różnych poziomach roboczych zawierających różne rodzaje gruntu. Wartości jednostkowych powierzchniowych oporów urabiania  $k_A$  wyznaczono poprzez ciągły pomiar mocy napędu koła czerpakowego (umożliwiający obliczenie wartości jednostkowej siły obwodowej  $F_{ul}$ ) oraz przekroju poprzecznego wióra  $A$  [10].

Uwzględniono przy tym sprawność napędu, moc biegu luzem i energię potrzebną do podnoszenia urobku. Uzyskane w wyniku badań wartości chwilowych oporów urabiania  $k_A$  poddano obróbce statystycznej w wyniku, której otrzymano ich histogramy. Następnie dla tak otrzymanych histogramów dopasowano rozkłady teoretyczne zmiennych losowych. Jako najbardziej zbliżony do otrzymanych rozkładów doświadczalnych uznano rozkład normalny [11]. Dla takiego rozkładu wartość oczekiwana oporów urabiania dla gruntów jednorodnych odpowiada kwantylowi rzędu 0,5. W rzeczywistych warunkach mamy do czynienia z gruntami niejednorodnymi z lokalnym wzrostem zwięzłości oraz twardymi wtrąceniami, co wpływa na chwilowy wzrost oporów. Opory urabiania, także wzrastają w wyniku zużywania się narzędzia tj. zmian stanu czerpaków. W związku z tym, do analiz obciążeń koparek należy przyjąć zdecydowanie większą, niż dla wartości oczekiwanej, wartość oporów urabiania. Dla określenia reprezentatywnych wartości oporów urabiania dla strefy ekstremalnej zaproponowano, jako wartość obliczeniową kwantyl rozkładu rzędu 0,98. Oczywiście, bazując na statystycznym rozkładzie oporów urabiania, dla szczególnych przypadków i w zależności od potrzeb, można przyjmować wartość oporów urabiania równą innym kwantylom, np. gdy spodziewana jest praca maszyn w łżejszych warunkach geologiczno-górnicych. Jako przykład zamieszczono histogram rozkładu wartości oporów urabiania otrzymany w wyniku badań na koparce KWK 910 w KWB „Turów” SA (rys. 5) a w tabeli 1 statystyki opisowe. Wynika z niej, że dla kwantyla rzędu 0,98 wartość zmiennej jednostkowych oporów urabiania  $k_A$  wynosi 447,4 kN/m<sup>2</sup>.



Rys 5. Histogram rozkładu wartości oporów urabiania  $k_A$



TABELA 1

Tabela liczności oraz statystyki opisowe wyznaczonych wartości oporów urabiania

Klasa	Tabela liczności: $k_A$				
	liczba	skumulowana liczba	% ogółu przypadki	skumulowany % ogółu	oczekiwana liczba
$50 < x \leq 100$	0	0	0,00000	0,0000	52,60
$100 < x \leq 150$	175	175	0,10215	0,1021	667,94
$150 < x \leq 200$	3 191	3 366	1,86257	1,9647	4 852,63
$200 < x \leq 250$	21 983	25 349	12,83139	14,7961	19 406,60
$250 < x \leq 300$	48 024	73 373	28,03143	42,8275	42 822,11
$300 < x \leq 350$	45 543	118 916	26,58328	69,4108	52 212,71
$350 < x \leq 400$	33 876	152 792	19,77329	89,1841	35 191,91
$400 < x \leq 450$	15 458	168 250	9,02278	98,2069	13 101,92
$450 < x \leq 500$	2 779	171 029	1,62209	99,8290	2 689,51
$500 < x \leq 550$	280	171 309	0,16343	99,9924	303,63
$550 < x \leq 600$	12	171 321	0,00700	99,9994	18,80
Zmienna	Statystyki opisowe				
	średnia	mediana	minimum	maksimum	kwantyl 0,98
$k_A$	316,7	312,7	100,2	570,1	447,4

## 5. Zastosowanie opracowanego modelu statystycznego w procesie projektowania i eksploatacji koparek kołowych wielonaczyniowych

Najistotniejszym praktycznym wykorzystaniem opracowanego modelu statystycznego jest możliwość określenia wartości i charakteru przebiegu składowej obwodowej siły urabiania na kole czerpakowym na podstawie uzyskanych w wyniku badań statystycznych rozkładów oporów urabiania. Pozwala to na zwymiarowanie konstrukcji nośnej nowo projektowanej koparki, tak, aby nie uległa ona uszkodzeniu nawet w najtrudniejszych warunkach geologiczno górniczych występujących podczas eksploatacji maszyn na odkrywkach danej kopalni. W oparciu o wartość składowej obwodowej siły urabiania następuje też dobór mocy mechanizmu napędu koła czerpakowego decydującego w największym stopniu o wydajności koparki [12]. Stąd też ważne jest, aby wartość składowej obwodowej była dobierana

w zależności od rzeczywistych warunków geologiczno-górnicych występujących na przyszłych frontach pracy nowej koparki tak, aby można było w tych warunkach osiągnąć maksymalną wydajność. Może to być również wykorzystywane w bieżącej eksploatacji w odniesieniu do koparek modernizowanych, pod kątem przystosowania istniejącego mechanizmu urabiania do pracy w gruntach o zwiększonych oporach urabiania lub jego wymiany na nowy.

Ponadto znajomość rzeczywistych rozkładów obciążeń ekstremalnych oddziaływujących na konstrukcję nośną koparek umożliwi przewidywanie stanów jej wyczerpania w przyszłości i odtworzenia jej historii, co będzie stanowiło podstawę do diagnozowania stanu technicznego maszyn i pozwoli uniknąć wielu zdarzających się dotychczas awarii i katastrof.

Do zastosowań opracowanego modelu statystycznego należy zaliczyć również możliwość bardziej efektywnego doboru koparek do nowoprojektowanych jak i istniejących odkrywek kopalń oraz opracowań technologii urabiania tych maszyn pozwalających na uzyskiwanie optymalnej wydajności w określonych warunkach geologiczno-górnicych.

## 6. Podsumowanie

W dotychczasowej praktyce projektowej do obliczania sił zewnętrznych obciążających koło czerpakowe stosowany był deterministyczny model procesu urabiania. Model ten zakłada, że siła urabiania na kole czerpakowym jest wprost proporcjonalna do czynnej długości ostrza czerpaka wnikającego w caliznę lub do powierzchni odcinanego wióra. Został on wielokrotnie sprawdzony w gruntach łatwo i średnio urabialnych, niestety w gruntach trudno urabialnych nie sprawdził się, czego dowodem są liczne awarie koparek eksploatowanych w tych gruntach. Model ten nie ujmuje bowiem wpływu przestrzennego ukształtowania narzędzi urabiających, złożonej kinematyki układów roboczych o ruchu ciągłym oraz zakłóceń tego ruchu wynikających z niejednorodności urabianych gruntów. Stąd też dla potrzeb obliczeniowych konstrukcji nośnej opracowano analityczno-doświadczalny model rozkładu sił urabiania. Model ten powstał na podstawie licznych badań reakcji ustroju nośnego wysięgnika koła czerpakowego na proces urabiania. Badano przebiegi czasowe wzajemnie prostopadłych naprężeń normalnych działających na konstrukcję wysięgnika, estymując na podstawie długoterminowych badań eksploatacyjnych rozkłady statystyczne dla każdej ze składowych sił działających na tę konstrukcję. W rezultacie uzyskano adekwatny model rozkładu sił urabiania.

Wykorzystując koncepcję powyższego modelu przyjęto hipotezę o możliwości połączenia go z hipotezą o jednostkowych oporach urabiania i zaproponowano statystyczny model urabiania gruntu. Zasadniczą nowością w tym modelu jest wprowadzenie w miejsce stałego jednostkowego oporu  $k_A$ , doświadczalnie wyznaczonego rozkładu statystycznego  $k_A(\Omega)$ . Następnie przeprowadzono eksperymentalną weryfikację tego modelu. Weryfikacja polegała na wyznaczeniu rozkładów jednostkowych powierzchniowych oporów urabiania na podstawie długoterminowych badań na obiektach rzeczywistych. Badania prowadzono na

wielu koparkach podczas ich normalnej eksploatacji, w większości w gruntach średnio i trudno urabialnych.

W rezultacie uzyskano bardzo obszerny zbiór wyników wartości chwilowych oporów urabiania. Wyniki te poddano obróbce statystycznej i otrzymano rzeczywiste rozkłady (histogramy) wartości jednostkowych oporów urabiania.

Opracowany statystyczny model obciążeń zewnętrznych procesu urabiania powinien znaleźć szereg zastosowań w procesie projektowania i eksploatacji koparek kołowych w gruntach trudno urabialnych. Do najważniejszych możemy zaliczyć:

- wymiarowanie konstrukcji nośnych koparek tak, aby nie ulegały one uszkodzeniu nawet w najtrudniejszych warunkach geologiczno-górnicych występujących w danej kopalni;
- dobór mocy mechanizmu napędu koła czerpakowego tak, aby można było uzyskać maksymalną wydajność w występujących rodzajach gruntów;
- możliwość przewidywania stanu wyężenia konstrukcji nośnej koparki i odtworzenia jej historii, co będzie stanowiło podstawę do diagnozowania stanu technicznego maszyn i pozwoli uniknąć wielu zdarzających się dotychczas awarii i katastrof;
- możliwość bardziej efektywnego doboru koparek do nowoprojektowanych jak i istniejących odkrywek oraz opracowań technologii urabiania pozwalających na uzyskanie optymalnej wydajności w określonych warunkach górniczo-geologicznych.

#### LITERATURA

- [1] *Hawrylak H., Sobolski R.*: Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1967
- [2] *Dudek D.*: Identyfikacja obciążeń eksploatacyjnych w procesie urabiania koparkami kołowymi. Archives of Mining Sciences, Vol. 36, Iss. 4, 1991
- [3] *Korzeń Z.*: Mechanika procesu przecinania ośrodka rozdrobnionego elementarnymi profilami liniowymi. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, nr 38/9, 1981
- [4] *Musiał W.*: Określenie oporów właściwych w procesie mechanicznego urabiania skał ilastych. IKEM Politechniki Wrocławskiej, 1971 (praca doktorska niepublikowana)
- [5] *Szepietowski W.*: Określenie oporów właściwych w procesie mechanicznego urabiania węgla brunatnego. Praca doktorska (nie publikowana). IKEM Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 1972
- [6] *Kolkiewicz W.*: Zastosowanie maszyn podstawowych w górnictwie odkrywkowym. Śląsk. Katowice, 1974
- [7] *Hawrylak H. i in.*: Analiza procesu ciągłego urabiania skał zwięzłych narzędziami roboczymi o ruchu złożonym. Realizacja — Wyniki — Wnioski. Prace Naukowe CPBP O2.05. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1990
- [8] *Dudek D.*: Modele statystyczne obciążeń eksploatacyjnych w procesie urabiania wielonaczyniowymi koparkami kołowymi. Prace Naukowe IKEM P. Wr. 53. Seria Monografie 12. Wrocław, 1987
- [9] *Alenowicz J.*: Statystyczny model obciążeń procesu skrawania gruntów trudno urabialnych koparkami kołowymi górnictwa odkrywkowego. Problemy Maszyn Roboczych z. 27. Warszawa, 2006
- [10] *Alenowicz J., Onichimiuk M.*: Przeprowadzenie serii badań długoterminowych oporów urabiania oraz obciążeń w konstrukcji nośnej koparek w warunkach eksploatacyjnych gruntów trudno urabialnych krajowych kopalń odkrywkowych węgla brunatnego. Oprac. IGO Poltegor nr arch. 5760/IGO. Wrocław, 2008 (praca niepublikowana)
- [11] *Hellwig Z.*: Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN. Warszawa, 1977
- [12] *Szepietowski W.*: Metoda określania wymaganej mocy napędu mechanizmu urabiania wielonaczyniowych koparek kołowych. Redakcja Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław, 2000