

Marian DOLIPSKI, Piotr CHELUSZKA, Piotr SOBOTA
Politechnika Śląska, Gliwice

KOMPUTEROWE PROGNOZOWANIE ENERGOCHŁONNOŚCI URABIANIA GŁOWICĄ URABIAJĄCĄ KOMBAJNU CHODNIKOWEGO

Streszczenie. W referacie przedstawiono algorytm prognozowania energochłonności procesu urabiania głowicą urabiającą kombajnu chodnikowego. Opracowany na jego podstawie program komputerowy posłużył do wyznaczenia charakterystyk energetycznych głowic urabiających stosowanych w polskich kombajnach chodnikowych.

COMPUTER-AIDED FORECASTING OF THE SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF MINING WITH A CUTTING HEAD OF A ROADHEADER

Summary. An algorithm for forecasting of the specific energy consumption of mining effected with a cutting head of a roadheader has been presented in the paper. The computer program developed on the basis of this algorithm allowed characteristics of the energy consumption of cutting heads applied in Polish roadheaders to be determined.

1. Wprowadzenie

Jednym z najistotniejszych parametrów charakteryzujących proces urabiania skał głowicami urabiającymi kombajnu chodnikowego jest jego energochłonność. Łączy ona w sobie moc potrzebną na urabianie z ilością uzyskanego w jednostce czasu urobku, a więc z wydajnością tego procesu [2].

Energochłonność urabiania głowicami urabiającymi wyznaczona może być doświadczalnie na podstawie wyników pomiarów parametrów pracy kombajnu chodnikowego [4] bądź określona na drodze teoretycznej w oparciu o komputerową symulację procesu urabiania.

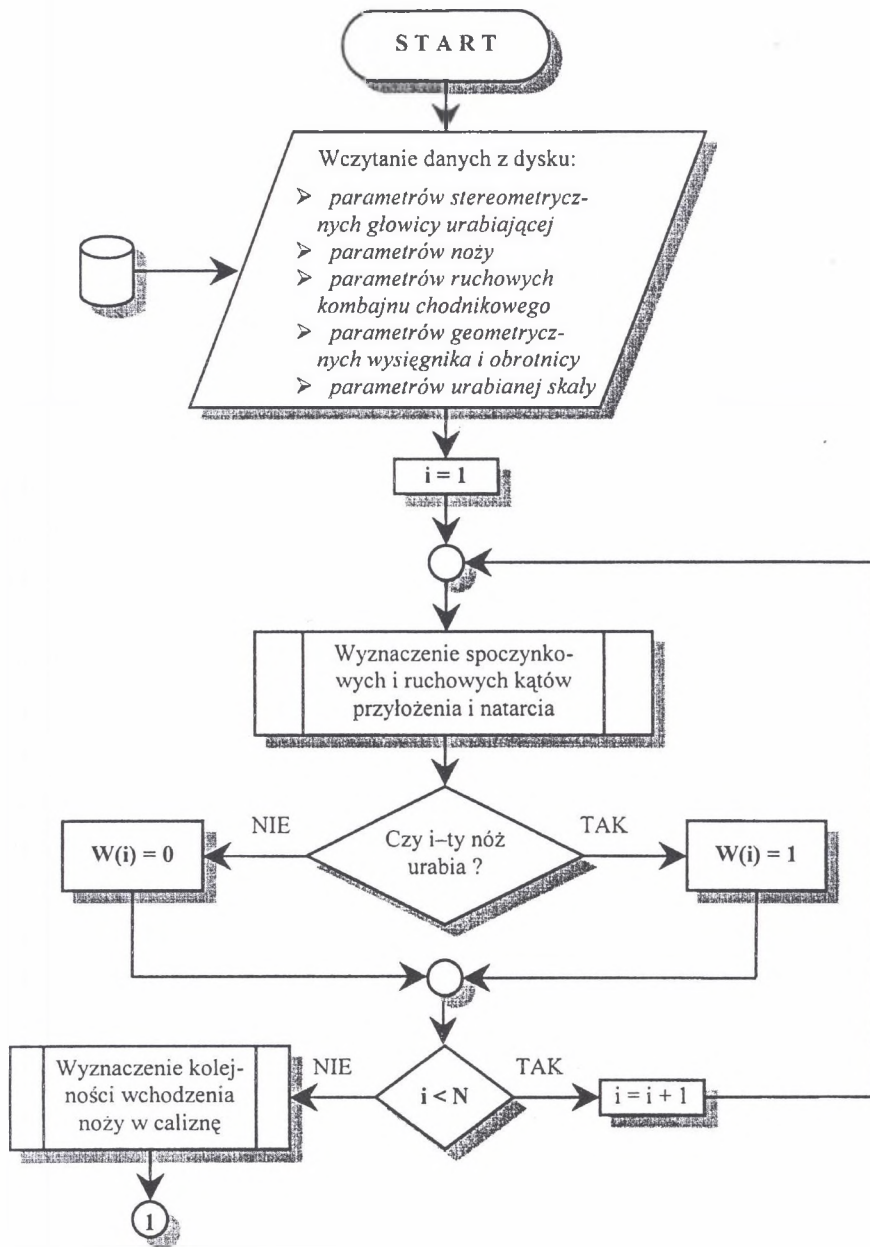
2. Algorytm procedury prognozowania energochłonności

Zagadnienie prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą kombajnu chodnikowego realizowane jest zasadniczo w czterech etapach. Stanowią one zbiór procedur powiązanych ze sobą w funkcjonalne bloki. Wyznaczenie energochłonności urabiania sprowadza się przy tym do jednego obrotu głowicy urabiającej, zakłada się bowiem, że urabianie czoła przodka jest procesem powtarzalnym w każdym jej obrocie.

Ze względu na dużą złożoność modelu matematycznego rozwiązanie tego zagadnienia możliwe jest jedynie metodami numerycznymi za pomocą komputera.

W pierwszym etapie prognozowania energochłonności urabiania następuje wprowadzenie danych oraz ich przygotowanie do dalszych obliczeń (rys.1). Wymagane jest zadeklarowanie wartości parametrów tworzących następujące grupy:

1. parametry stereometryczne głowicy urabiającej, do których zaliczyć należy:
 - liczbę noży skrawających – N ,
 - współrzędne wierzchołków ostrzy noży – l_i , r_i i ϑ_i oraz
 - kąty charakteryzujące przestrzenne ustawienie ich osi podłużnej – δ_i , ε_i ,
2. parametry noży skrawających, a więc kształt ostrza, kąt ostrza β oraz wysunięcie noża z uchwytu l_s ,
3. parametry ruchowe kombajnu chodnikowego, takich jak:
 - zabiór – z ,
 - wysokość urabianej warstwy – h ,
 - prędkość kątowa głowicy urabiającej – $\dot{\phi}_G$ oraz
 - prędkość przemieszczania głowicy urabiającej, czyli: prędkość obwodowa wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu – v_{ow} , prędkość obwodowa wychylania wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu – v_{pw} , prędkość przemieszczania głowicy urabiającej w stronę czoła przodka podczas wcinania – v_p ,
4. parametry geometryczne wysięgnika i obrotnicy kombajnu chodnikowego:
 - długość wysięgnika – L_1 ,
 - odległość osi obrotu obrotnicy od osi obrotu wysięgnika – L_2 .
5. parametry urabianej skały, to znaczy:
 - wytrzymałość na ściskanie – R_c ,
 - liczba kruchości – κ ,
 - kąt bocznego rozkruszenia – ψ ,
 - współczynnik wyłamania żebra – f_R .



Rys. 1. Schemat blokowy pierwszego etapu algorytmu procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą

Fig. 1. Block diagram of the first stage of algorithm of the procedure for forecasting of the specific energy consumption during mining with a cutting head

Odpowiednio przygotowane dane wejściowe mają postać pliku tekstowego wczytywanego z dysku do pamięci komputera.

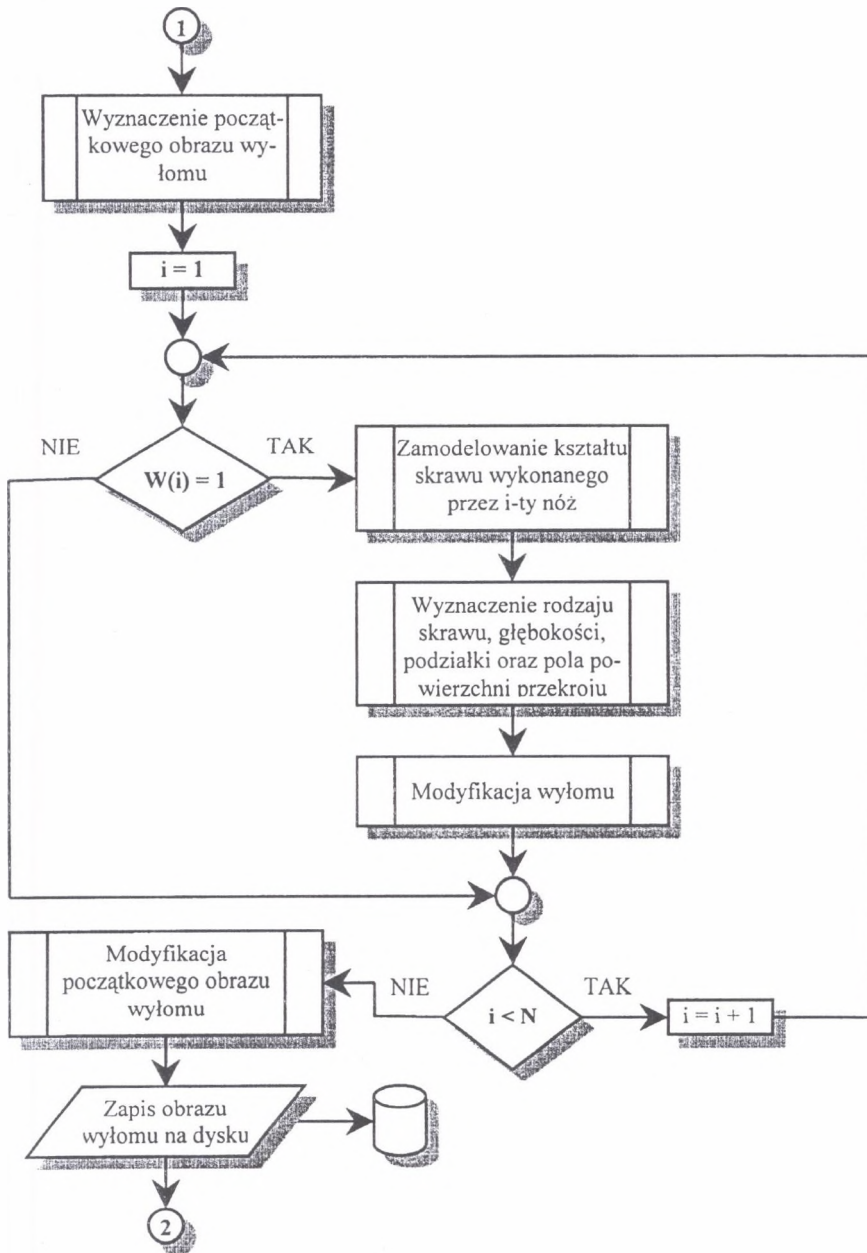
Po wprowadzeniu danych wyznaczane są następnie wartości spoczynkowe i ruchowe kątów: przyłożenia – α_{sp} i α_r oraz natarcia – γ_{sp} i γ_r . Kąty te określone są w celu sprawdzenia prawidłowości ustawienia noży skrawających na pobocznicy głowicy urabiającej. Musi być bowiem spełniony warunek, że kąty przyłożenia wszystkich noży osiągają wartości większe lub równe zero ($\alpha_{sp} \geq 0$ i $\alpha_r \geq 0$).

Kolejną procedurą jest sprawdzenie, które noże skrawające biorą udział w procesie urabiania. Jeżeli dany nóż urabia, to funkcja $W(i) = 1$, jeżeli nie – wówczas funkcja $W(i) = 0$. W końcowej fazie wyznaczana jest kolejność wchodzenia noży w kontakt z urabianą calizną w czasie obrotu głowicy urabiającej.

W drugim etapie procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą dokonywana jest projekcja skrawów wykonywanych przez noże biorące udział w procesie urabiania (rys.2). W tym celu wyznacza się w pierwszej kolejności początkowy obraz wylomu w urabianej caliznie, to znaczy obraz wylomu przed symulacją procesu urabiania głowicą urabiającą. Wylom początkowy ma przy tym formę linii łamanej. Ponieważ jednak z chwilą rozpoczęcia symulacji procesu urabiania rzeczywista postać tej linii nie jest jeszcze znana, przyjmuje się kształt uproszczony w formie linii przechodzącej przez punkty przenikania pobocznicy głowicy urabiającej z płaszczyzną, w której dokonywana jest projekcja skrawów (płaszczyzną projekcji). Następnie, począwszy od pierwszego do ostatniego noża skrawającego głowicy urabiającej ($i = 1, 2, \dots, N$) sprawdzany jest warunek: „Czy dany nóż urabia?”. Jeżeli jest on spełniony, czyli funkcja $W(i) = 1$, następuje wyznaczenie kształtu skrawu wykonanego przez i -ty nóż w czasie obrotu głowicy urabiającej.

Kształt rozpatrywanego skrawu modelowany jest w płaszczyźnie projekcji za pomocą linii łamanej, będącej krawędzią przenikania tej płaszczyzny przez jego powierzchnie boczne [1]. Określany jest dalej rodzaj skrawu wykonanego przez i -ty nóż skrawający (otwierający, półotwarty lub otwarty) oraz jego parametry, to znaczy: głębokość, podziałka skrawania i pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu. Parametry te decydują o obciążeniu rozpatrywanego noża skrawającego oraz objętości urobku uzyskanego w wyniku jego działania. Wpływają one w efekcie na wydajność urabiania i energochłonność tego procesu. Kolejną fazą jest modyfikacja wylomu uwzględniająca nowo wykonany skraw. Po tym następuje przejście do następnego noża. Cykl ten powtarza się do chwili zamodelowania

skrawu wykonywanego przez ostatni nóż skrawający głowicy urabiającej oraz wyznaczenia wartości charakteryzujących go parametrów.



Rys. 2. Schemat blokowy drugiego etapu algorytmu procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą

Fig. 2. Block diagram of the second stage of algorithm of the procedure for forecasting of the specific energy consumption during mining with a cutting head

Po zakończeniu modelowania skrawów, wykonanych przez wszystkie noże skrawające biorące udział w procesie urabiania, dokonywana jest modyfikacja początkowego obrazu wylomu. Linia odzwierciedlająca początkowy obraz wylomu w caliznie skalnej odpowiada co do kształtu linii stanowiącej końcowy obraz wylomu, uzyskanego po zakończeniu symulacji procesu urabiania czoła przodka głowicą urabiającą. Wynika to bowiem z przyjętego założenia, zgodnie z którym proces urabiania jest powtarzalny w każdym obrocie głowicy urabiającej. Wylom początkowy uzyskuje się zatem dzięki przesunięciu, przeciwnie do zwrotu prędkości przemieszczania głowicy urabiającej, linii będącej końcowym obrazem wylomu. Przesunięcie to jest przy tym równe przemieszczeniu głowicy urabiającej w czasie jednego jej obrotu. Wynika ono zatem ze złożenia prędkości przemieszczania głowicy urabiającej i jej prędkości kątowej. Wylom wykonany przez noże głowicy urabiającej w czasie jej obrotu zapisywany jest w końcu na dysku komputera, co umożliwia późniejszą jego wizualizację.

Wygenerowanie obrazu wylomu wykonanego przez głowicę urabiającą umożliwia wyznaczenie wielkości charakteryzujących strefę skrawania każdego z noży (rys.3). Strefa ta określona jest przez dwa kąty, to znaczy:

- kąt wejścia rozpatrywanego noża do strefy skrawania – ϑ_e oraz
- kąt wyjścia noża skrawającego ze strefy skrawania – ϑ_a .

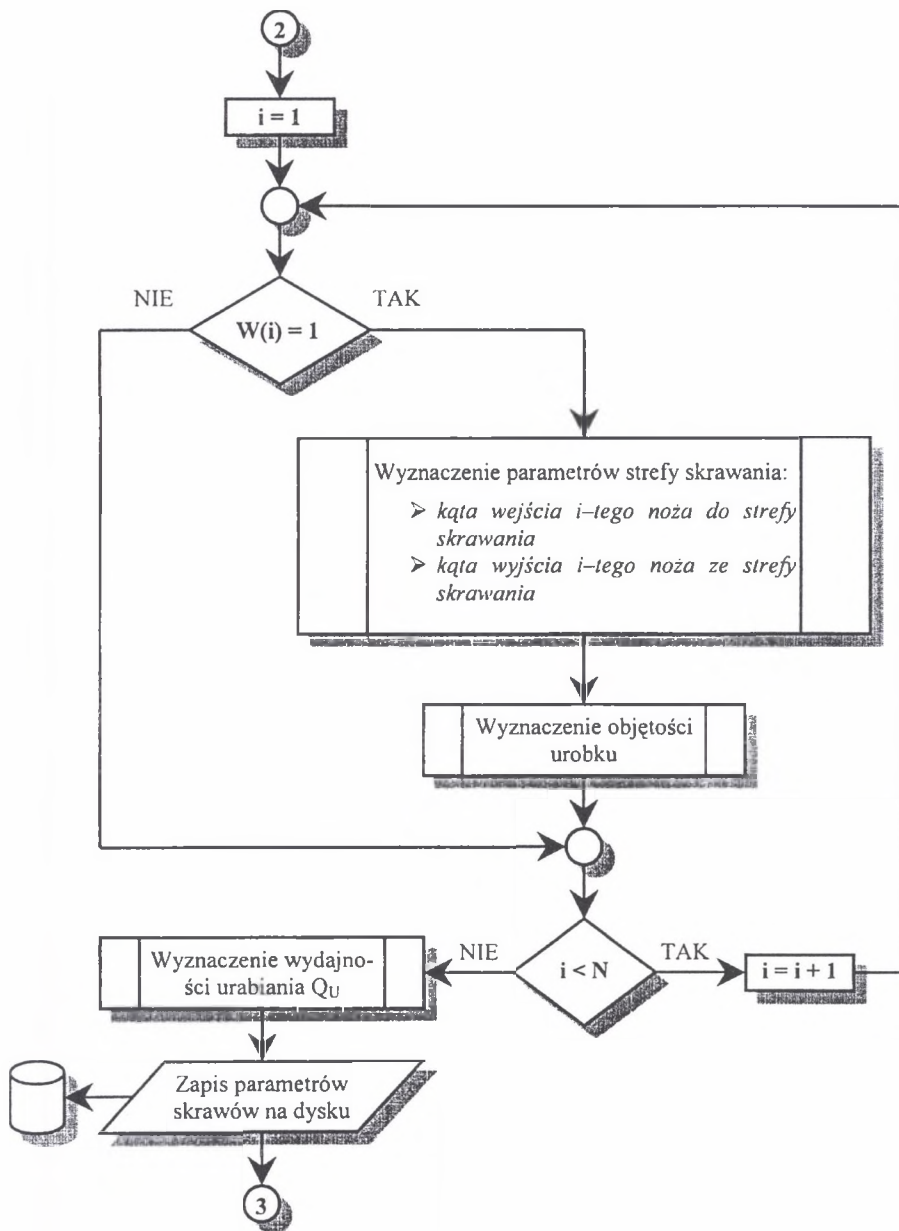
Pierwszy z wymienionych kątów determinuje moment, w którym dany nóż wchodzi w kontakt z urabianą calizną, drugi natomiast określa, dla jakiej wartości kąta obrotu głowicy urabiającej nóż ten traci kontakt z urabianą skałą.

Następnym krokiem jest obliczenie objętości urobku uzyskanego w wyniku działania i -tego noża skrawającego. Objętość ta zależy bowiem od pola powierzchni przekroju poprzecznego rozpatrywanego skrawu oraz wielkości strefy skrawania, a więc drogi, którą przebywa rozpatrywany nóż skrawający będąc w kontakcie z urabianą calizną.

Przedstawiony cykl obliczeń powtarzany jest do chwili wyznaczenia wartości kątów: wejścia do strefy skrawania i wyjścia ze strefy skrawania oraz objętości urobku dla wszystkich noży głowicy urabiającej biorących udział w procesie urabiania.

Ostatnią fazą tego etapu jest określenie całkowitej objętości urobku uzyskanego w czasie jednego obrotu głowicy urabiającej oraz wydajność urabiania Q_U . Całkowita objętość urobku jest przy tym równa sumie objętości urobku uzyskanego ze skrawów wykonanych przez wszystkie noże skrawające biorące udział w urabianiu w czasie rozpatrywanego obrotu głowicy urabiającej. Wydajność obliczana jest natomiast jako iloraz całkowitej objętości urobku i czasu trwania jednego obrotu głowicy urabiającej. Wyznaczone wartości parametrów

poszczególnych skrawów wykonanych przez noże skrawające głowicy urabiającej zapisywane są dalej do zbioru na dysku komputera.



Rys. 3. Schemat blokowy trzeciego etapu algorytmu procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą

Fig. 3. Block diagram of the third stage of algorithm of the procedure for forecasting of the specific energy consumption during mining with a cutting head

W czwartym etapie procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą wyznaczany jest przebieg obciążenia głowicy urabiającej generowany procesem urabiania skały (rys.4). Symulując obrót głowicy urabiającej o kąt $\Delta\varphi$, w zakresie od 0° do 360° , dla każdego noża skrawającego biorącego udział w procesie urabiania, znajdującego się w strefie skrawania, wyznaczane są kolejno wartości chwilowe:

- głębokości skrawu wykonywanego przez rozpatrywany nóż – $g(\varphi)$ oraz
- składowych oporów skrawania, to znaczy: siły skrawania – $P_s(\varphi)$, siły docisku – $P_d(\varphi)$ i siły bocznej $P_b(\varphi)$.

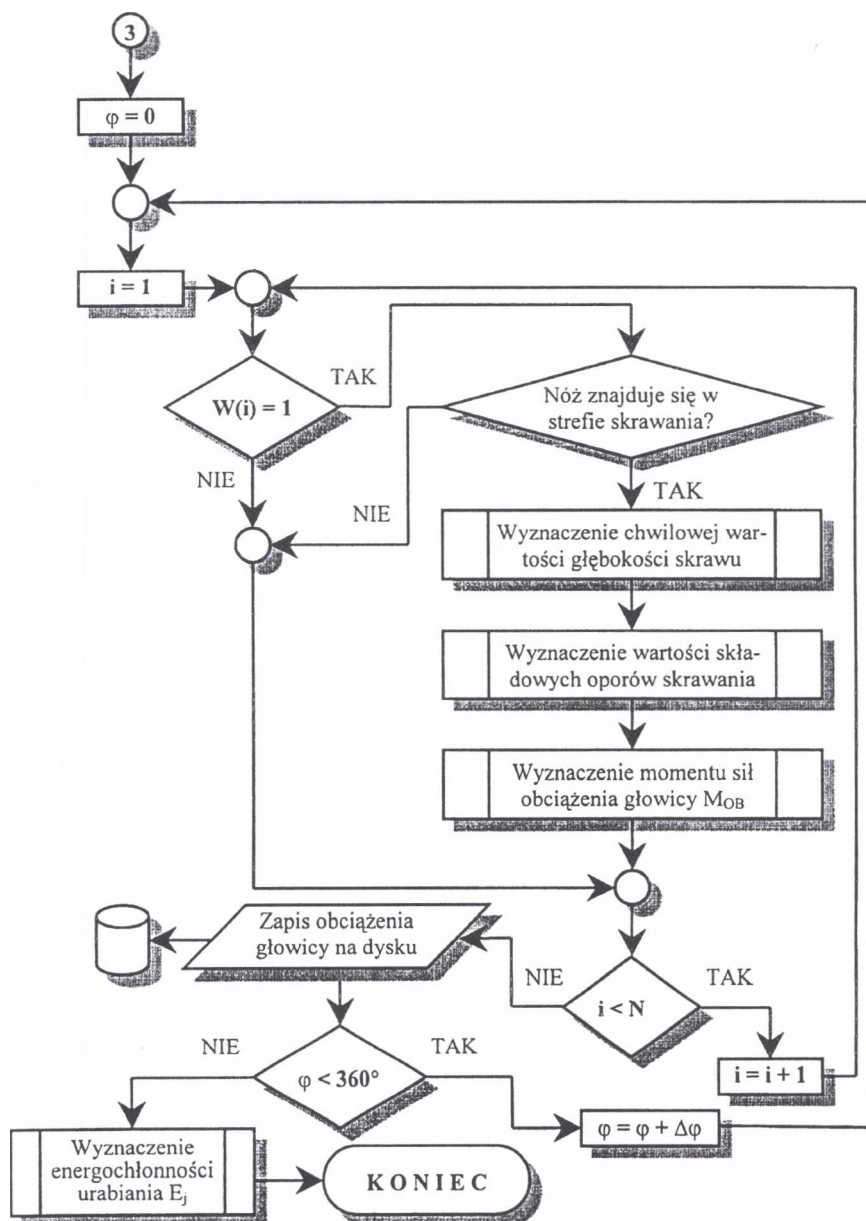
Obliczana jest następnie wartość momentu sił obciążenia głowicy urabiającej $M_{OB}(\varphi)$, będąca sumą momentów sił obciążenia noży skrawających znajdujących się w danej chwili (dla danej wartości kąta obrotu głowicy urabiającej φ) w strefie skrawania. Wyznaczone w ten sposób chwilowe wartości obciążenia głowicy urabiającej zapisywane są w zbiorze utworzonym na dysku komputera.

Po zakończeniu procesu generowania przebiegu obciążenia głowicy urabiającej wywołanego oporami urabiania skały określana jest jego wartość średnia (M_{OB}^m). Daje to podstawę do wyznaczenia średniej energochłonności urabiania. Obliczana jest ona przy tym jako stosunek średniej mocy mechanicznej zużywanej w tym procesie ($M_{OB}^m \cdot \dot{\varphi}_G$) do wydajności urabiania Q_U .

3. Wyznaczenie charakterystyki energetycznej procesu urabiania głowicą urabiającą

Opracowany, w oparciu o przedstawiony algorytm, program komputerowy posłużył do wyznaczenia charakterystyk energetycznych głowic urabiających cechujących się różną stereometrią, stosowanych w polskich kombajnach chodnikowych. Na rysunku 5 pokazano przykładowe zależności energochłonności urabiania od wydajności tego procesu dla czterech głowic urabiających o różnej stereometrii.

Głowica typu A wyposażona jest w 44 noże skrawające rozmieszczone wzdłuż czterech linii śrubowych o dużym kącie zwicia. Noże te tworzą jednocześnie dziesięć linii śrubowych o małym kącie zwicia [3]. Średnica maksymalna mierzona po wierzchołkach ostrzy noży skrawających wynosi tu 738 mm, zaś średnica minimalna jest równa 352 mm.

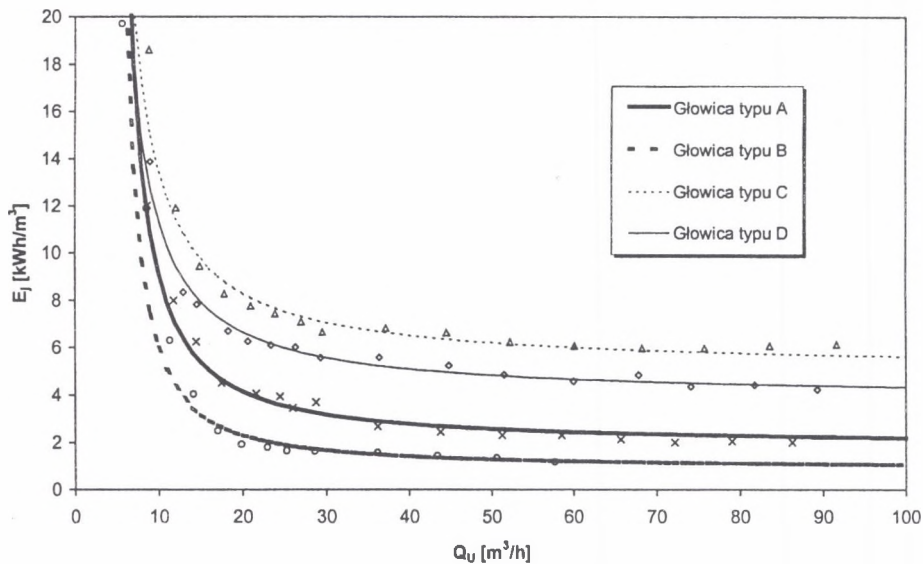


Rys. 4. Schemat blokowy czwartego etapu algorytmu procedury prognozowania energochłonności urabiania głowicą urabiającą

Fig. 4. Block diagram of the fourth stage of algorithm of the procedure for forecasting of the specific energy consumption during mining with a cutting head

Głowica typu B posiada jedynie 35 noży skrawających, uporządkowanych wzdłuż czterech linii śrubowych o dużym kącie zwięcia i jednocześnie wzdłuż siedmiu linii śrubowych

o małym kącie zwicia. Średnica maksymalna i minimalna wierzchołków ostrzy noży wynoszą tu odpowiednio: 738 mm i 302 mm. Głowica urabiająca typu C to głowica wyposażona w 48 noży skrawających rozmieszczonych jedynie wzdłuż linii śrubowych o dużym kącie zwicia. Średnica maksymalna wynosi tu 750 mm, natomiast średnica minimalna jest równa 246 mm. Głowica urabiająca typu D ma natomiast 43 uchwyty nożowe. W tym przypadku wierzchołki ostrzy noży ułożone są także jedynie wzdłuż linii śrubowych o dużym kącie zwicia. Średnica maksymalna i minimalna obwiedni wierzchołków ostrzy noży wynosi tu odpowiednio: 750 mm i 260 mm.



Rys. 5. Zależność jednostkowej energii urabiania od wydajności tego procesu

Fig. 5. Dependence of the specific energy consumption during mining upon performance of this process

Komputerowe symulacje procesu urabiania przeprowadzone zostały dla piaskowca o wytrzymałości na ścislenie R_c wynoszącej 60 MPa. Proces ten realizowany był z zabiorem $z=0,175$ m równoległe do spągu, a wysokość urabianej warstwy była przy tym maksymalna dla założonej wartości zaboru.

Zależność energii jednostkowej urabiania od wydajności ma postać hiperboliczną, co sprawia, że w przypadku dużych wydajności urabiania energochłonność tego procesu zmienia się w niewielkim stopniu. Przyrost obciążenia układu urabiania generowany urabianiem skały odpowiada więc w przybliżeniu przyrostowi wydajności tego procesu. Inaczej jest, gdy wydajność urabiania jest mała. Energochłonność urabiania zależy wówczas bardzo silnie od

wydajności tego procesu. Im większa przy tym jest wydajność, tym mniejsza jest energochłonność urabiania.

Przeprowadzone badania komputerowe wykazały, że charakterystyki energetyczne poszczególnych głowic urabiających istotnie się różnią. Najmniejszą ilość energii do urobienia jednostki objętości skały zużywa głowica urabiająca typu B. W przypadku gdy wydajność urabiania przewyższa $25 \text{ m}^3/\text{h}$, energochłonność tego procesu osiąga poziom średni $1,5 \text{ kWh/m}^3$. Nieco więcej energii zużywa w tym zakresie głowica typu A. Średnia energochłonność urabiania wynosi tu bowiem $2,4 \text{ kWh/m}^3$. Zdecydowanie najwyższa jest natomiast energochłonność urabiania głowicami typu C i D. W rozpatrywanym przedziale wydajności urabiania średnia energochłonność tego procesu osiąga wartość odpowiednio: $6,4 \text{ kWh/m}^3$ i $5,0 \text{ kWh/m}^3$. Energochłonność urabiania głowicą typu C jest zatem ponad 4-krotnie większa w stosunku do energochłonności urabiania głowicą typu A i ponad 2,5-krotnie większa w porównaniu do energochłonności urabiania głowicą typu B. Z kolei energochłonność urabiania głowicą typu D jest odpowiednio: o 230% i 100% większa w stosunku do energochłonności urabiania głowicami typu A i B.

4. Zakończenie

Przedstawiony algorytm prognozowania energochłonności urabiania głowicami urabiającymi kombajnu chodnikowego daje szerokie możliwości badawcze. Wykorzystywany jest on w praktyce badawczej i projektowej, w szczególności umożliwia zaś:

- prognozowanie energochłonności urabiania skał na etapie projektowania głowic urabiających dla konkretnych warunków zastosowania, co stwarza podstawy do optymalizacji ich parametrów konstrukcyjnych,
- generowanie grafiki wyłomów głowicy urabiającej w celu określenia głębokości oraz pola powierzchni przekrojów skrawów, objętości urobku oraz wydajności urabiania,
- komputerowe badanie procesu urabiania z możliwością dowolnej zmiany wartości poszczególnych parametrów głowicy oraz własności wytrzymałościowych skał,
- wyznaczanie wartości parametrów siłowych kombajnu chodnikowego niezbędnych do realizacji procesu urabiania skały o zadanych własnościach mechanicznych.

LITERATURA

1. Dolipski M., Cheluszka P., 2002: Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego. Wyd. Pol. Śl., Gliwice.
2. Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P., Mann R., 199 : Badania energochłonności procesu urabiania poprzecznymi głowicami urabiającymi kombajnu chodnikowego. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 3, s.5–9.
3. Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P., 2001: Neue Schneidköpfe für Teilschnittmaschinen. ERZMETALL 54 Nr 11, s.566–571.
4. Sikora W. i inni, 2000: Określenie sił i energochłonności urabiania nożami stożkowymi. Wyd. Pol. Śl., Gliwice.

Recenzent: Prof.dr inż. Włodzimierz Sikora

Abstract

Specific energy consumption is one of the most essential factors which characterize the process of rock mining with the aid of cutting heads of roadheaders. It is possible to determine the specific energy consumption experimentally on the basis of measurements of performance parameters of a roadheader or theoretically on the basis of computer simulation of the process of mining.

An algorithm for computer-aided forecasting of the specific energy consumption of the process of mining effected with a cutting head of a roadheader has been presented in the paper. There are four stages of the problem realization. They consist of a set of procedures related one to another within functional blocks. At the first stage the entry of data such as stereometric features of the cutting head, parameters of picks, motion parameters of the roadheader, geometric features of a boom and of a turret of the roadheader and properties of the rock to be cut is carried out. The second step consists in projection of cuts taken by the picks, which are active in the process of mining, and in evaluation of the parameters characterizing particular cuts. At the next stage values of parameters characterizing a cutting zone of each pick, volume of the cut material removed from particular cuts and mining performance are determined. Components of the pick load, a course of load on a cutting head and the specific energy consumption during the process of mining are defined at the fourth stage.

The computer program developed on the basis of this algorithm was used to determine energy consumption – related characteristics of cutting heads characterized by different stereometric features. The presented characteristics are in a hyperbolic form. The specific energy consumption of the process of mining depends to an essential degree upon design parameters of a cutting head.