

Analiza pracy koparek jednonaczyniowych i ładowarek łyżkowych w aspekcie ich automatyzacji

Analysis of the operation of single-bucket excavators and wheel loaders in terms of automation



Prof. dr hab. inż. Wiesław Kozioł^{*)}



Mgr inż. Adrian Borcz^{*)}



Mgr inż. Michał Patyk^{*)}

Treść: W artykule scharakteryzowano problematykę związaną z automatyzacją procesów urabiania i załadunku jednonaczyniowymi koparkami oraz ładowarkami łyżkowymi w cyklicznych technologiach wydobywczych. Zwrócono uwagę na parametry frontu roboczego, których bliższe poznanie ułatwi projektowanie i implementację algorytmów pracy wymienionych maszyn. Pókrócie opisano prace badawcze i doświadczenia prowadzone w tym kierunku. Ponadto scharakteryzowano wymagania stawiane systemom do zautomatyzowanej ich pracy.

Abstract: This paper describes the issues related to automation of mechanical mining and loading processes of single-bucket excavators and wheel loaders in cyclic mining technologies. Attention was paid to the parameters of working front, which will facilitate deeper understanding of the design and implementation of algorithms for the operation of these machines. The research and experience carried out in this direction were briefly described. The requirements of the systems for automated operation of these machines were also characterized.

Słowa kluczowe:

górnictwo odkrywkowe, surowce skalne, koparki jednonaczyniowe, ładowarki łyżkowe, automatyzacja

Key words:

opencast mining, rock materials, single-bucket excavators, wheel loaders, automation

1. Wprowadzenie

Górnictwo swoje początki miało w epoce kamienia, gdzie najpierw zbierano a następnie, z użyciem prymitywnych narzędzi, celowo pozyskiwano krzemienie. W ten oto sposób powstało jednocześnie górnictwo surowców skalnych. Postępujący rozwój człowieka związany był z pozyskiwaniem nowych kopalni, a tym samym koniecznością usprawniania techniki górniczej i zastosowania odpowiednich środków, a w okresie późniejszym coraz bardziej zaawansowanych maszyn i urządzeń.

Baza zasobowa Polski jest bogata i pod tym względem Polska zajmuje ważną pozycję w Europie. Surowce skalne wydobywane metodą odkrywkową w kraju stanowią najliczniejszą grupę spośród wszystkich eksploatowanych kopalni. Wraz z górnictwem węglowym tworzą podstawę funkcjonowania przemysłu narodowego, w zastosowaniu w wielu branżach przemysłowych.

Surowce skalne urabiane są na różne sposoby. Skąły związane są głównie urabiane z użyciem materiałów wybuchowych (o ile istnieje możliwość ich stosowania), natomiast skały średniozwięzłe i luźne urabiane są mechanicznie. Urabianie mechaniczne oraz załadunek urobku oparte są głównie o jednołyżkowe koparki i ładowarki na podwoziu oponowym lub gąsienicowym.

Podnoszenie jakości materiałów użytych do konstrukcji, modernizacja napędów i mechanizmów, ułatwienie sterowania itp. zwiększają trwałość i niezawodność stosowanych rozwiązań, ale przede wszystkim umożliwiają osiągnięcie lepszych wyników pracy (zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych, zwiększanie wydajności), uwzględniając tym samym zmniejszenie intensywności oddziaływania na środowisko. Osiągane wydajności często jednak ograniczane są przez umiejętności i zdolności operowania daną maszyną przez człowieka.

Od lat opracowywane są systemy wspomagające nadzór układów technologicznych m.in. w górnictwie, których zadaniem jest monitorowanie i analizowanie pracy układów, zespołów maszyn oraz pojedynczych jednostek wchodzących w skład całego procesu. Prace jednak postępują również

^{*)} AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

w kierunku pełnej automatyzacji ich pracy. Na chwilę obecną sprawdzają się już systemy autonomicznej pracy samochodów samowładowczych w światowym górnictwie odkrywkowym [8]. W dużych zachodnich koncernach górniczych jak np. Rio Tinto, testującym na szeroką skalę system AHS Front Runner firmy Komatsu, przetransportowano już za pomocą autonomicznie pracujących samochodów technologicznych ponad 200 mln Mg materiału skalnego. Korzystne wyniki testów przyczyniły się do podejmowania kolejnych prób w światowym górnictwie odkrywkowym, w ilości po kilka sztuk na kopalnię, a twórcy coraz szerszej gamy dostępnych rozwiązań z tego zakresu optymistycznie zapatrują się w ich przyszłość.

Na chwilę obecną sprawdzają się już systemy autonomicznej pracy samochodów samowładowczych w światowym górnictwie odkrywkowym [8]. W dużych zachodnich koncernach górniczych jak np. Rio Tinto, testującym na szeroką skalę system AHS Front Runner firmy Komatsu, przetransportowano już za pomocą autonomicznie pracujących samochodów technologicznych ponad 200 mln Mg materiału skalnego [7].

W przypadku jednonaczyniowych koparek i ładowarek, pomimo przeprowadzanych prób i badań różnego typu, od lat opracowywane są rozwiązania m.in. z zakresu automatyki i telematyki, które obecnie wspomagają sterowanie tymi maszynami, a w przyszłości zdolne będą do w pełni zautomatyzowanego kierowania nimi.

Niniejszy artykuł stanowi fragmentaryczny opis wymagań jakie stawiane są systemom do autonomicznej pracy maszyn urabiających i załadowczych w górnictwie skalnym oraz prace jakie prowadzone są w tym kierunku.

2. Wymagania od systemów sterowania koparkami i ładowarkami

Jednonaczyniowe koparki i ładowarki łyżkowe stosowane w polskim górnictwie skalnym są zazwyczaj maszynami wielozadaniowymi, a ich zadaniem jest głównie urabianie, ładowanie oraz transport materiału skalnego.

Koparki jednonaczyniowe pod- oraz nadsiębierne na podwoziu gąsienicowym są konstrukcjami zdolnymi do bezpośredniego urabiania calizny skalnej – w światowym górnictwie skalnym duże koparki stosowane są do urabiania mechanicznego nie tylko warstw nadkładowych, lecz również i złoża – np. kopalnie odkrywkowe węgla kamiennego (rys. 1).



Rys. 1. Urabianie mechaniczne koparką nadsiębierną Liebherr R 996 B [12]

Fig. 1. Mechanical mining with Liebherr R 996 B front shovel excavator [12]



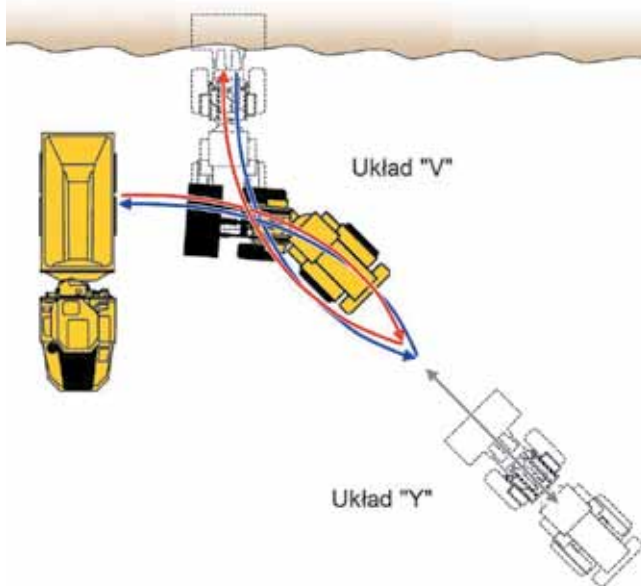
Rys. 2. Praca ładowarki łyżkowej Komatsu WA380-6 [11]

Fig. 2. Komatsu WA380-6 wheel loader operation [11]

Zaletą ładowarek łyżkowych jest z kolei duża elastyczność pracy. Zawdzięczają to mobilnemu podwoziu oponowemu, co umożliwia przystosowanie ich do wielu prac nie tylko w przodkach wydobywczych – do załadunku luźno usypanej kopaliny, ale także do transportu np. mas skalnych, czy do prac przeładunkowych na placach składowych itp. (rys. 2).

Cykle pracy koparek związane są głównie z napełnianiem łyżki, obrotem nadwozia do wyladunku, opróżnieniem zawartości łyżki oraz powrotem do pozycji wyjściowej. Natomiast w przypadku ładowarek dochodzą ruchy manewrowe i jazda z pełną oraz pustą łyżką (rys. 3). Jako przykład można podać również cztery główne cykle ładowarki, a to:

1. Urabianie calizny/nabieranie urobku.
2. Transport pod środek transportu (ewentualnie na składowisko).
3. Wyladunek.
4. Jazda powrotna.



Rys. 3. Przykładowe trasy jazdy ładowarki w układzie „V” oraz w powiększonym układzie „Y” przy załadunku materiału na transport samochodowy [5]

Fig. 3. Examples of wheel loader cycles in "V" and enlarged "Y" patterns when loading the excavated material on haul trucks [5]

Bez względu na to, którą z opisywanych maszyn bierzemy pod uwagę musimy uwzględnić cykliczność ich pracy. Generalnie doświadczenia przemysłowe wskazują na regularności pracy jednoznaczniowych koparek, opartej na ruchach roboczych wysięgnika, łyżki i na obrotach nadwozia. Ładowarki z kolei są maszynami dynamicznymi i znaczącą część ich cyklu stanowi faza ich przemieszczania się – zarówno z łyżką pełną jak i z opróżnioną.

Praca na danym typie maszyn umożliwia operatorowi łączenie poszczególnych etapów cyklu, a tym samym skracanie czasu jego trwania i odwrotnie proporcjonalnie zwiększanie wydajności. Jest to jednak zadanie, którego efektywność zależy od wiedzy i doświadczenia operatora. Dlatego, aby dorównać biegłości człowieka sterującego koparkami i ładowarkami, przed systemami komputerowym oraz osprzętem elektro-hydraulicznym, które będą nimi kierować, stoi wyzwanie bardziej skomplikowane niż w przypadku transportu samochodowego.

Automatyzacja jednoznaczniowych koparek i ładowarek wymaga spełnienia całego wachlarza różnych czynników, a spośród najważniejszych wymienić można:

- a) odpowiednie wyposażenie techniczne – czujniki, sterowniki, elementy napędowe (układy mechaniczne, hydrauliczne, elektroniczne itp.) – dostosowane do wyznaczonego celu i z uwagi na zmienność warunków pracy odporne na nie (temperatura, drgania, zapylenie itp.);
- b) przygotowanie odpowiednich algorytmów jednostki sterującej do zróżnicowanych i zmiennych warunków eksploatacji, jak:
 - rodzaj wykonywanej pracy – urabianie calizny, załadunek na środek transportu,
 - rodzaj urabianego/ładowanego materiału – frakcja, wilgotność,
 - warunki przestrzenne – najbliższe otoczenie maszyny podczas planowanej pracy – wykrywanie innych obiektów – maszyn i przede wszystkim ludzi,
 - sukcesywne rozpoznawanie przodka wydobywczego bądź przyzmy usypanego luźno materiału w celu odpowiedniego podjazdu/ustawienia maszyny względem niego;
- c) system autonomicznej pracy powinien generować wskaźniki pracy (efektywność, energochłonność itp.) minimalnie na poziomie doświadczonego operatora;
- d) zautomatyzowane koparki oraz ładowarki powinny być całkowicie autonomiczne;
- e) inne czynniki losowe.

Wspomniane czynniki losowe, to np. sytuacje w których dochodzi do napotkania na drodze maszyny na trudno urabialne elementy calizny, na różnego rodzaju elementy zabudowy, jak konstrukcje hydrotechniczne, przewody elektryczne itp.

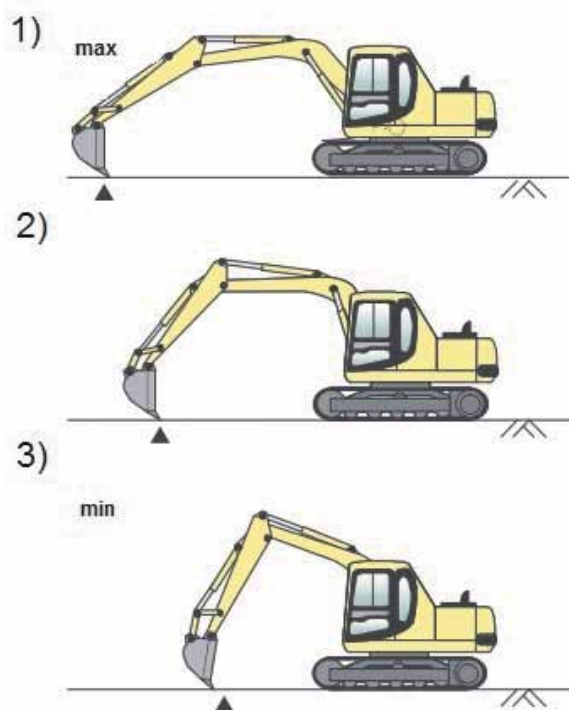
3. Autonomiczna praca maszyn wydobywczych

3.1. Jednołyżkowe koparki hydrauliczne

Testowane dotąd systemy telesterowania [8] potwierdzają swoją skuteczność w praktyce, jednak ograniczeniem takiego rozwiązania jest odległość operatora od maszyny. Co prawda jakość układu audiowizualnego jest na wysokim poziomie, jednak operator nie jest w stanie dokładnie rozpoznać otoczenia koparki, w tym np. podłoża, na którym pracuje, oporów stawianych naczyniom roboczym koparki przez ośrodek skalny będący przedmiotem pracy maszyny, dokładnej odległości elementów otoczenia od maszyny. W efekcie uzyskujemy wydajności gorsze od standardowych.

Możliwość wprowadzenia systemu autonomicznej pracy koparek związana jest z dokładnym poznanie charakteru jej pracy i kinematyką ruchów łyżki koparki. Prowadzone od lat badania w kraju, jak i na świecie [9] wskazują na wpływ zmienności parametrów materiału skalnego, np. współczynnika tarcia, poślizgu itp.

W celu rozwijania algorytmów sterowania należy poznać zasady efektywnej pracy koparek. W opracowaniu [9] podano testy porównawcze pracy dwóch doświadczonych operatorów koparek, z różnym stażem i pracujących w odmiennych warunkach. Przedmiotem badań była koparka jednoznaczniowa o pojemności łyżki 0,5 m³. W efekcie prowadzonych badań już na samym początku zauważyć można różne podejście operatorów do położeń łyżki (1 – bliskie, 2 – średnie, 3 – dalekie) – rysunek 4. W przypadku ustawień 1 oraz 3 sytuacja przedstawiała się niemal identycznie. Są to wartości ekstremalne, związane z konstrukcją wysięgnika koparki przy których możliwe jest urabianie i napelnianie łyżki.



Rys. 4. Ustawienia wysięgnika koparki [9]
Fig. 4. Configuration of the backhoe boom [9]

Z omawianych badań wynikają wnioski, mówiące o konieczności pełniejszego poznania ustawień łyżki w trakcie wykonywania przez nią pracy w materiale skalnym i zmienności tego ośrodka wraz z upływem czasu.

Automatyzacja jest również polem do popisu dla polskiej myśli technicznej. Polscy inżynierowie opracowują systemy do automatyzacji przemysłowej, a związane są głównie z kinematyką łyżki koparki oraz z bezpośrednim procesem skrawania [2].

Prekursorem realizowanych prac był System Wspomagania Operatora Maszyny Roboczej (WORM). Nie był to co prawda system do w pełni zautomatyzowanej pracy badanej maszyny jednak miał posłużyć do wspomagania operatora oraz do bardziej szczegółowego poznania samego procesu urabiania. Spośród najważniejszych jego funkcji wymienić można:

- monitorowanie narzędzia roboczego oraz oporów stawianych przez materiał skalny w którym pracuje,
- prowadzenie pomiarów wybranych parametrów wraz z ich analizą i zapisem,

– sterowanie silnikiem maszyny.

Zaletą systemu jest możliwość dostosowania do różnych maszyn z przystosowaniem do warunków ich pracy, a kolejne etapy rozwoju systemu WORM obejmowały [2]:

- cyfrowe sterowanie pracą maszyny i pełna automatyzacja cyklu pracy,
- bardziej efektywne wykorzystanie maszyny – usprawnianie przebiegu cyklu maszyny,
- analizowanie procesów zachodzących podczas urabiania,
- rozwijanie rozwiązań telematycznych i sterujących.

System sprawdził się i został zaimplementowany na koparce oraz palownicy.

3.2. Jednoślązkowe ładowarki na podwoziu oponowym

Opracowanie systemów automatyzacji pracy ładowarek jest podobnie, jak w przypadku koparek, zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym od osób je opracowujących zespojenia ze sobą wielu czynników w całość, a zaliczyć do nich można automatyzację: procesu ładowania, nawigacji ładowarki, detekcji przeszkód oraz ich omijania [3].

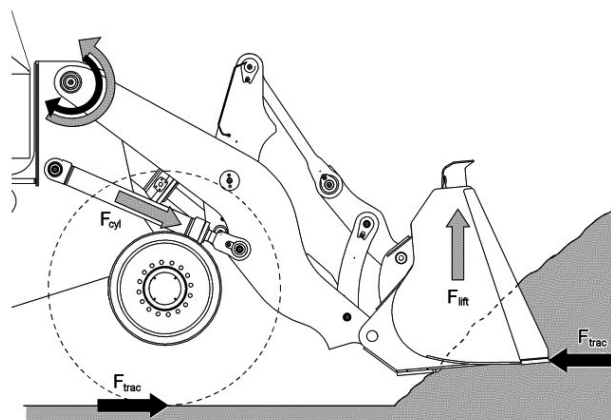
Automatyzacja pracy ładowarki podczas załadunku obejmuje zakres czynności:

1. dobór kierunku podjazdu ładowarki do usypanego materiału,
2. opuszczanie łyżki wraz z podjazdem ładowarki,
3. wybór punktu przyłożenia łyżki do przyzmy,
4. obrót łyżki w osi poziomej,
5. analiza poprawności procesu nabierania,
6. wykrywanie ruchów ładowarki (przód/tył) oraz stanu niekontrolowanego zerwania przyczepności kół jezdnych (tzw. „buksowania” kół),
7. moment zakończenia napełniania łyżki,
8. wycofanie ładowarki i jazda pod środek transportu – kolejny element układu technologicznego,
9. podjęcie trasy jazdy ładowarki,
10. jazda ładowarki z analizowaniem drogi transportowej celem uniknięcia ewentualnych przeszkód,
11. podnoszenie łyżki ładowarki do wyładunku
12. wyładunek materiału,
13. monitorowanie wydajności ładowarki.

Problemem jest charakterystyka sił oddziaływania łyżki na materiał skalny oraz siły jego reakcji w momencie jej napełniania – punkty od 3. do 7. (rys. 5 – F_{trac} to siła pociągowa przekazana z napędu ładowarki na koła – z III zasady dynamiki Newtona taka sama jest przeciwstawna siła reakcji usypanego materiału na łyżkę; F_{lift} – siła unoszenia łyżki do góry wywołana siłą F_{cyl} pochodząca od wypełnienia siłownika hydraulicznego cieczą). Przeważają tutaj siły penetracji łyżki oraz związane z tym przemieszczaniem się materiału w jej głąb. Ich wartość i kierunek uzależnione są od jakości materiału, kształtu przyzmy oraz kierunku podjazdu ładowarki, a wartości sił oporu materiału charakteryzuje szybkość efektu napełniania łyżki, czyli osiągnięcia wydajności.

Proces napełniania jest również zmienny wraz z postępowaniem penetracji łyżki w głąb przyzmy, kiedy to zmienia się kierunek jej przemieszczania (rys. 6). W pierwszym etapie łyżka ładowarki przemieszcza się po podłożu i w takiej pozycji następuje napełnianie, następnie ostrze łyżki podnosi się do góry wraz z postępowaniem ładowarki do przodu, a ostatnim elementem ładowania jest podnoszenie napełnionej łyżki w prawie pionowym kierunku.

Praktyka przemysłowa wskazuje na stosowanie maszyn w taki sposób, aby ich osiągnięcie było możliwie najefektywniejsze, a jednocześnie aby stan techniczny maszyny nie uległ pogorszeniu. Dlatego też podjazd do napełnienia łyżki powinien być w miarę możliwości jak najbardziej prostopadły



Rys. 5. Uproszczony schemat rozkładu sił w procesie napełniania łyżki ładowarki [4]

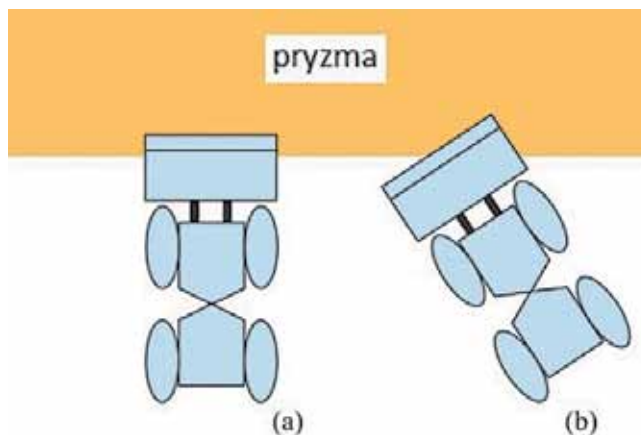
Fig. 5. Simplified diagram of force distribution in the process of filling the wheel loader bucket [4]



Rys. 6. Proces napełniania łyżki ładowarki [4]

Fig. 6. Process of filling the wheel loader bucket [4]

do przyzmy (rys. 7a), nie tylko z uwagi na osiągnięcie współczynników wypełnienia łyżki, ale również ze względu na obciążenia układu wysięgnika i hydrauliki siłowej. Takie zalecenia są również stosowane w podręcznikach dla operatorów maszyn. W przypadku podjazdu pod dużymi kątami (rys. 7b) układ mechaniczny ładowarki ulega asymetrycznym naprężeniom.



Rys. 7. Kierunki podjazdu ładowarki pod przyzmy: a) prostopadły, b) pod kątem ostrym [10]

Fig. 7. Directions of the approach road of the wheel loader to pile: a) perpendicular, b) at acute angle [10]

4. Podsumowanie

Podjęmowany w ostatnich czasach problem bezzałogowej „kopalni przyszłości” [1], jest rozwijany na skalę przemysłową głównie w zakresie automatyzacji transportu samochodowego.

Dzięki dużej konkurencji i łączeniu myśli technicznych na polu tym wykazać się może wiele firm od lat zajmujących się automatyzacją i pracy maszyn i urządzeń przemysłowych. Systemy te niejednokrotnie służą wyłącznie do monitorowania układów produkcyjnych, w celu ich optymalizacji ich pracy i dostosowania do aktualnych potrzeb.

Natomiast stawiane systemom automatyzacji pracy maszyn urabiająco-ładujących wymagania tworzą zupełnie inne wyzwanie dla ich twórców. Sprawdzone w środowisku laboratoryjnym, w warunkach zbliżonych do przemysłowych, w różnej skali maszyn, rozwiązania przechodzą pozytywne próby dotąd prowadzonych rozważań. Jednak zagadnienia te wymagają jeszcze dalszych prac rozwojowych i są stale rozwijane.

Kierowanie tego typu maszynami przez wyspecjalizowany system komputerowy, związane jest z wieloma wymaganiami jakie są im stawiane, a pośród nich wymienić możemy:

- projektowanie oraz podejmowanie wskazanych przez dyspozytora zadań,
- analizowanie założonego celu i przystąpienie do jego realizacji,
- rozwiązywanie problemów w sytuacjach losowych (np. wystąpienie przeszkody, awaria układu mechanicznego itp.),
- stały nadzór i weryfikacja wykonywanych działań,
- działania optymalizujące pracę maszyny zapobiegające zmniejszeniu wydajności i efektywności procesu wydobywczego.

Dążenie do utworzenia systemów do autonomicznej pracy koparek i ładowarek poparte powinno być odpowiednimi procedurami, regulującymi w odpowiedni sposób ich proces roboczy. Uogólniony algorytm postępowania przy prowadzeniu wydobywania dla jednonaczyniowych koparek i ładowarek nie jest trudny do sformułowania. Trudniejszym natomiast jest jego rozbudowa do pojedynczych elementów wchodzących w skład poszczególnych etapów pracy maszyn. To ich zadaniem jest dokładna identyfikacja problemu i znalezienie rozwiązań możliwych do zaistnienia sytuacji w trakcie eksploatacji maszyny.

Uniknięcie dowolnego problemu przez program, na chwilę obecną nie jest możliwe, jako że system tego typu musiałby posiadać sztuczną inteligencję, chociażby opartą na samouczących się sieciach neuronowych lub algorytmach genetycznych. Na chwilę obecną całkowicie samodzielna praca koparki może być prowadzona przy kształtowaniu obiektów liniowych o stałych parametrach. Natomiast w dłuższym czasie i w zmiennych warunkach pracy nie byłaby możliwa do przeprowadzenia bez ingerencji oraz wsparcia ze strony operatora. Należy mieć na uwadze fakt, iż w razie ewentualnej

usterki bądź uszkodzeniu np. układu mechanicznego maszyny musimy dokonać napraw z użyciem wiedzy i doświadczenia człowieka.

Artykuł opracowano w ramach realizacji projektu rozwojowego nr NR09-0061-10/2011, pt.:

„ZINTEGROWANY SYSTEM STEROWANIA TECHNOLOGIĄ ODKRYWKOWĄ WYDOBYCIA SUROWCÓW SKALNYCH”

Literatura

1. *Antoniak J.*: W kierunku kopalni przyszłości. Surowce i Maszyny Budowlane 2010, Nr 4
2. *Dąbrowski D., Dobrowolski H., Szlagowski J.*: Automatyzacja pracy maszyn roboczych – badania w IMRC PW. Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 10/2003, IMBiGS, Warszawa
3. *Hemami A.*: Robotic Excavation, Robotics and Automation in Construction. McGill University, Canada, 2008
4. *Filla R.*: Operator and Machine Models for Dynamic Simulation of Construction Machinery, LINKÖPING STUDIES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, THESIS NO. 1189, LINKÖPING 2005, Sweden
5. *Filla R.*: Optimizing the trajectory of a wheel loader working in short loading cycles, The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP2013, June 3-5, 2013, Linköping, Sweden
6. *Kozioł W., Borcz A., Machniak Ł.*: Innowacyjne satelitarne systemy monitorowania maszyn technologicznych w górnictwie odkrywkowym surowców skalnych. Górnictwo Odkrywkowe 1/2014, str.5-14
7. *Kozioł W. i in.*: Koncepcja systemu organizacji, zarządzania i monitorowania obiektami zautomatyzowanymi w kopalniach odkrywkowych. Zadanie 9.4 projektu rozwojowego pt.: "Zintegrowany system sterowania technologią odkrywkową wydobywania surowców skalnych" realizowanego przez konsorcjum naukowe reprezentowane przez "Poltegor-Institut" Instytut Górnictwa Odkrywkowego, AGH Kraków 2014
8. *Machniak Ł., Borcz A.*: Rola i zastosowanie nowoczesnych systemów dyspozytorskich w odkrywkowych kopalniach surowców skalnych. Przegląd Górniczy 12/2013, str.59-67
9. *Sakaida Y., Chugo D., Yamamoto H, Asama H.*: The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator - Extraction of common skills. SICE Annual Conference 2008, August 20-22, 2008, The University Electro-Communications, Japan
10. *Sarata S., Weeramhaeng Y. Tsubouchi T.*: Planning of scooping position and approach path for loading operation by wheel loader. 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2005 – September 11-14, 2005, Ferrara (Italy)
11. <http://www.komatsupoland.pl>
12. <http://www.liebherr.com>