

MODELOWANIE 3D CYKLICZNEJ ODSTAWY W JEDNEJ Z KOPALŃ ODKRYWKOWYCH W PROGRAMIE HAULSIM

3D MODELING OF CYCLICAL TRANSPORT BY DUMP TRUCKS IN THE OPEN PIT MINES IN THE HAULSIM PROGRAM

Marek Kondratowicz - Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska

Celem projektu było zamodelowanie cyklicznej pracy wozidel w kopalni odkrywkowej. Stworzone modele rzeczywistego oraz alternatywnego układu maszynowego posłużyły do porównania wydajności różnych układów maszynowych różniących się ilością maszyn i wielkością ich naczyń roboczych.

Publikacja posiada część teoretyczną opisującą kolejno oprogramowania symulacyjne, algorytm tworzenia modelu kopalni: budowę, programowanie przerw oraz sposób przydzielania zadań w programie HaulSim. W praktycznej części znajdują się dane wejściowe pozyskane z bezpośrednich pomiarów czasów pracy maszyn, wyniki symulacji rzeczywistego oraz alternatywnego scenariusza układu maszyn oraz ich porównanie.

Artykuł przedstawia etapy budowania modelu w programie HaulSim. Pozyskane mapy i modele kopalni pozwoliły na wierne odwzorowanie elementów infrastruktury kopalnianej oraz sieci dróg transportowych.

Symulacja cyklu roboczego wozidel opierała się na ich wspólnym działaniu oraz współpracy z koparkami oraz łamiarnią. Eksperyment przeprowadzono w dwóch scenariuszach. Pierwszy miał za zadanie w całości odzwierciedlić warunki panujące w kopalni. Drugi to utworzenie alternatywnego układu maszyn pracujących w istniejącej infrastrukturze kopalni.

Słowa kluczowe: górnictwo, modelowanie, transport, wozidla, program HaulSim

The purpose of the project was to model the cyclical work of haul trucks in the open-pit mine. Models of real and alternative machine systems were designed to compare the performance of various machine systems, which differ from one another in the number of machines and the size of their working container.

The publication has a theoretical part, which consists of the description of simulation software, the algorithm for creating the mine model: construction, programming stoppages and the method of scheduling tasks in the HaulSim program. The practical part includes input data obtained from direct measurements of machine working times, results of simulation of the real and alternative scenario of the machine system, and their comparison.

The article presents stages of building a model in HaulSim. The maps and mine models gave opportunity for a faithful reproduction of elements of the mine infrastructure and road network.

The dump truck's work cycle simulation was based on their joint operation and cooperation with excavators and crushers. The experiment was conducted in two scenarios. The first task was to precisely project the conditions in the mine. The second scenario was the creation of an alternative system of machines working in the existing mine infrastructure.

Keywords: mining, modeling, transport, haul trucks, HaulSim program

Symulacja komputerowa w transporcie górnictwem i logistyce

Multimedialne odwzorowanie rzeczywistych procesów i zjawisk staje się coraz popularniejsze. Obecnie na rynku

oprogramowania znajduje się wiele programów do komputerowego modelowania i wspomagania procesów logistycznych. Najnowsze programy oprócz modułu „dashboardowego” posiadają okno 3D, które w zależności od stopnia zaawansowania może stanowić element poglądowy analizowanego procesu

z różnej perspektywy. Model symulacyjny możemy uznać za poprawnie zaprogramowany, jeżeli wszystkie dane wejściowe zostaną zatwierdzone i zweryfikowane pod względem ich poprawności. Tak zamodelowany proces możemy uznać, za wierne odzwierciedlenie rzeczywistego procesu technologicznego (logistyczny.com/, 2019).

Oprogramowanie symulacyjne

Do przeprowadzania symulacji wykorzystywane są oprogramowania „simowskie”. Jednym z nich jest, szeroko stosowany w branży logistycznej, przemysłowej, produkcyjnej oraz usługowej, FlexSim. Pozwala na wizualizację, symulację, modelowanie oraz optymalizację złożonych procesów (Jurczyk, 2017).

Użytkownicy jako główne zalety programu FlexSim wskazują łatwość użycia, szybkość symulacji, menu „intuicyjne i zorientowane obiektowo”, prostą i elegancką koncepcję modelowania oraz pełną skalowalność procesu (logistyczny.com/, 2019).

Najnowszym programem dostępnym na rynku jest HaulSim. Narzędzie służy do tworzenia komputerowych modeli działalności górniczej. Pozwala na wierną wizualizację, analizę i optymalizację systemów transportowych. Jest to pierwszy symulator DES stworzony wyłącznie dla przemysłu wydobywczego. Procesy zachodzące w kopalni są odwzorowywane szybko i szczegółowo. Rozbudowana analityka oraz dokładna wizualizacja pozwala na podjęcie trafnych decyzji związanych z logistyką zakładu (flexsim.pl/haulsim/, 2019).

Autorzy programu przywiązują szczególną wagę do części ekonomicznej przedsięwzięcia górniczego (rpmglobal.com/, 2019).

Program dynamicznie przeprowadza obliczenia załadunku, przewozu oraz odbioru urobku. Możliwe jest zamodelowanie rozbudowanej infrastruktury drogowej, sieci transportowej dla wielu źródeł i miejsc docelowego rozładunku (rpmglobal.com/, 2019).

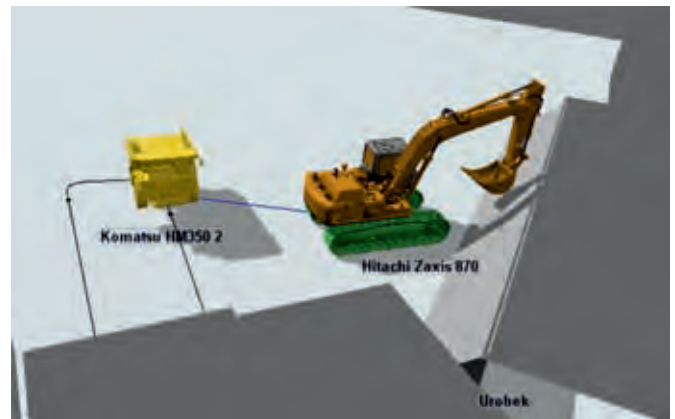
Algorytm tworzenia modelu

Pasek nawigacji to przewodnik, który pomaga w sposób intuicyjny zbudować wirtualną kopalnię. Wczytanie powierzchni terenu, sieci dróg oraz rodzaju transportowanego urobku to pierwszy krok w tworzeniu modelu. Następnie niezbędne jest uzupełnienie lokalizacji miejsc załadunku, wyładunku oraz pomocniczych. Kolejnym etapem jest załączenie do struktury spośród dostępnych w bazie danych maszyn ładujących i transportujących. Posiadając wszystkie wcześniejsze elementy pozostaje połączyć je poprzez nadanie im konkretnych zadań przewozowych. Opcjonalna funkcja to zaprogramowanie maszynom regularnych, bądź losowych przerw w pracy.

Etapy modelowania w programie HaulSim:

1. Tło modelu (features) - pozwala na import utworzonej przestrzeni, która reprezentuje ukształtowanie powierzchni obszaru kopalni.

2. Sieć dróg (road network) - umożliwia import gotowej sieci dróg do programu, bądź samodzielne jej narysowanie we wcześniej zaimportowany model terenu. Wykreślone na modelu ścieżki automatycznie dostosowały się do powierzchni terenu, a w przypadku przecięcia połączyły się tworząc skrzyżowania.

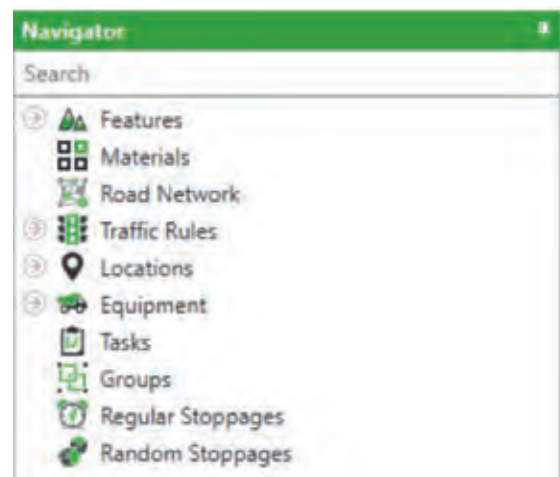


Rys. 1. Model załadunku i transportu kopalnianego w programie FlexSim
Fig. 1. Model of loading and transport in FlexSim



Rys. 2. Model frontów wydobywczych z punktami załadunku w programie HaulSim

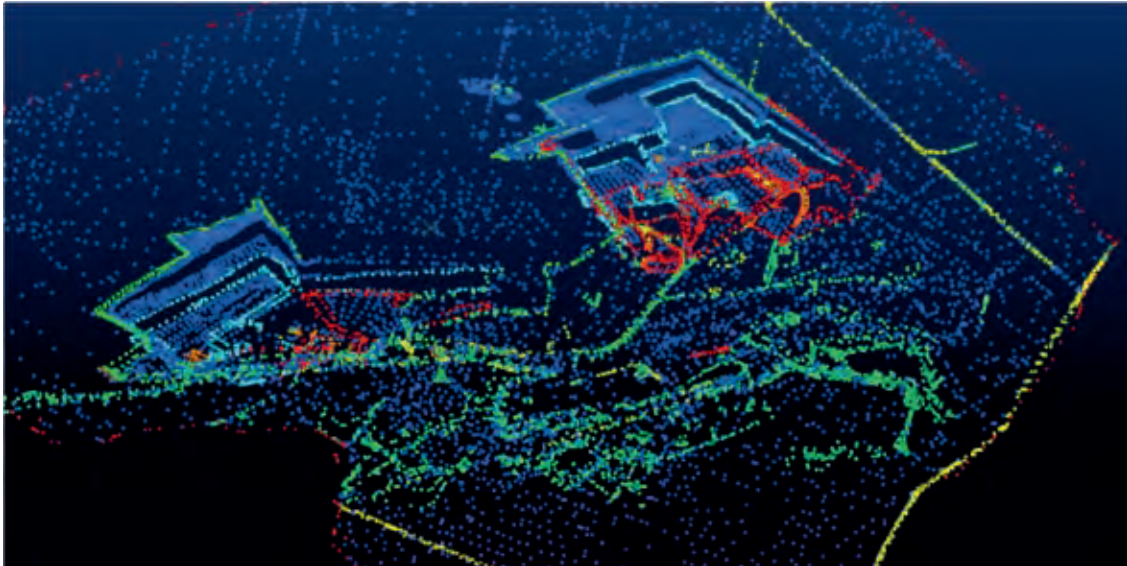
Fig. 2. Model of mining fronts with loading points in HaulSim



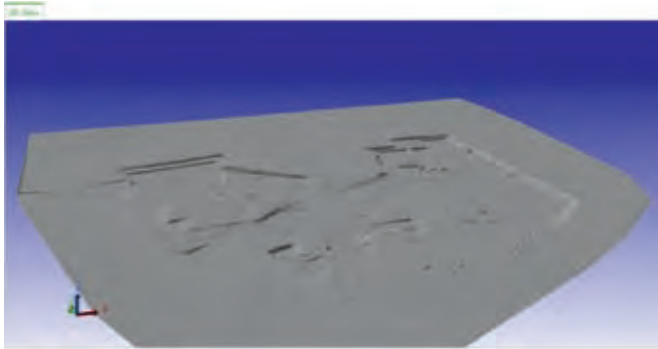
Rys. 3. Pasek nawigacji

Fig. 3. Navigation bar

3. Lokalizacje (locations) - wśród możliwych do zdefiniowania lokalizacji wyróżniono punkty załadunku, wyładunku oraz wymagane przez program lokalizacje pomocnicze, będące miejscami postoju i „startu” maszyn transportowych. Wyznaczone zostały trzy punkty załadunku. Pobór urobku w tych miejscach odbywa się przy podjeździe wozu odstawkowego tylko z jednej strony kopalni. Miejscem



Rys. 4. Chmura punktów niwelacyjnych na potrzeby utworzenia modelu sieciowego
 Fig. 4. Cloud of leveling points for creating a network model



Rys. 5. Zaimportowany do HaulSim model wyrobiska
 Fig. 5. Imported mine model to HaulSim



Rys. 6. Sieć dróg transportowych w wyrobisku
 Fig. 6. Road network in mine



Rys. 7. Załadunek woźdła
 Fig. 7. Loading a dump truck



Rys. 8. Miejsca wyładunku symbolizujące leje zasypowe w łamiarni
 Fig. 8. Unloading points symbolizing hoppers in the crushing plant

wyładunku w modelowanej kopalni jest łamiarnia, złożona z trzech lejów zasypowych. Lokalizacje pomocnicze, używane do zaprogramowanych przerw to np. budynek socjalny, plac manewrowy, serwis woźdła oraz stacja benzynowa woźdła.

4. Wyposażenie (equipment) – wyróżniamy jednostki ładujące, transportujące oraz pomocnicze. Niezbędne do prowadzenia eksploatacji maszyny zostały dodane z katalogów dostępnych w programie HaulSim. Modele koparek i ładowarek zostały wybrane takie, jak eksploatowane w modelowanej kopalni z edycją parametrów pracy zgodnie z otrzymaną

z zakładu dokumentacją techniczno-ruchową.

Maszyny pomocnicze wykonują w kopalni pracę wspomagającą np. zraszanie dróg (zmniejszenie zapylenia) oraz dowóz paliwa do koparek i ładowarek pracujących w wyrobisku.

5. Przydzielanie zadań (tasks) to proces polegający na nadaniu poszczególnemu sprzętowi zadań. Zgodnie z obłożeniem maszyn w dniu realizowanych pomiarów terenowych, urobek z każdego przodka do łamiarni dowoziły dwie wywrotki. Miejsce wyładunku było określone w zależności od piętra i związanego z nim rodzajem wydobywanej kopaliny.

Class	Manufacturer	Model	Speed (km/h)	Description	Animation Type
Backhoe	Liebherr	R 984	5,00	Liebherr R 984	Hydraulic Excavator Shovel
Backhoe	Hitachi	EX 1200-5 D	5,00	Hitachi EX 1200-5 D	Hydraulic Excavator Shovel
FrontEndLoader	Komatsu	WA 600-3	31,00	Komatsu WA 600-3	Front End Loader

Rys. 9. Wybrane z bazy maszyn koparki i ładowarki

Fig. 9. Excavators and loaders selected from the machine database

Description	Maximum Speed (km/h)	Travel Time Correction Factor	Payload (t)	Animation Type
Komatsu - HD 605-5	71,71	1,00	63,00	Small Truck
Hitachi - EH 1100-3	61,65	1,00	65,00	Small Truck

Rys. 10. Modele maszyn dodane do symulacji

Fig. 10. Machine models added to simulation

Active	Name	Type	Speed (km/h)	Iterations
<input checked="" type="checkbox"/>	Zraszacz dróg	Water Truck	20,00	20
<input checked="" type="checkbox"/>	Cysterna	Water Truck	20,00	2

Rys. 11. Wybrane maszyny pomocnicze

Fig. 11. Selected auxiliary machines

Group				Task						
Group Type	Primary Equipment	Dispatcher Target Rate (tph)	Group Cycles	Source	Destination	Material	Quantity (t)	Secondary Equipment	Task Cycles	Id
Load & Haul	Hitachi EX1200	1 000,00	∞	Przodek1E	Cementownia	Limestone ~...	100 000,00	Komatsu HD60	∞	1
					Cementownia	Limestone ~...	100 000,00	Komatsu HD60	∞	2
Load & Haul	Liebherr R984	1 000,00	∞	Przodek2E	Wapiennik1,W	Limestone ~...	100 000,00	Komatsu HD60	∞	7
					Wapiennik2,W	Limestone ~...	100 000,00	Komatsu HD60	∞	8
Load & Haul	Komatsu WA60	1 000,00	∞	Przodek1W	Cementownia	Limestone ~...	100 000,00	Hitachi EH 110	∞	4
					Cementownia	Limestone ~...	100 000,00	Hitachi EH 110	∞	6

Rys. 12. Przydzielanie zadań

Fig. 12. Scheduling tasks

Active	Name	Travel To	Location	State	Start At	Duration	Units	Repeat	Units	Group
<input checked="" type="checkbox"/>	Rozruch	Do not travel		Breakdown	06:00	40,00	Minutes	8,00	Hours	[All]

Rys. 13. Zaburzenia płynności pracy maszyn ładujących

Fig. 13. Malfunctions in the work smoothness of loading machines

Active	Name	Travel To	Location	State	Start At	Duration	Units	Repeat	Units	Group
<input checked="" type="checkbox"/>	Rozruch łamiarni	Closest Fuel Bay		Refuelling	06:00	20,00	Minutes	8,00	Hours	TG 01
<input checked="" type="checkbox"/>	Przerwa socjalna	Closest Lunch Room		Lunch	10:00	30,00	Minutes	8,00	Hours	[All]
<input checked="" type="checkbox"/>	Strzelanie przodków	Closest Fuel Bay		Refuelling	13:30	30,00	Minutes	8,00	Hours	TG 02
<input checked="" type="checkbox"/>	Strzelanie przodków2	Closest Fuel Bay		Refuelling	13:30	30,00	Minutes	8,00	Hours	TG 03

Rys. 14. Zaburzenia płynności pracy wozideł

Fig. 14. Malfunctions in the work smoothness of haul trucks

Active	Name	First Stop At (min)	Stop Interval (min)	Stop Time (min)	State	Destination
<input checked="" type="checkbox"/>	Zablokowanie lejca	normal(1440,120,1)	normal(1440,120,1)	normal(30,5,1)	Breakdown	[All]

Rys. 15. Przerwa związana z niewystarczającą wydajnością chwilową lub awarią lejca zasypowego

Fig. 15. Stoppages related to insufficient instantaneous performance or failure of the hopper

Active	Name	First Stop At (min)	Stop Interval (min)	Stop Time (min)	State	Group	Redirect Haulers
<input checked="" type="checkbox"/>	Tankowanie	normal(720,60,1)	normal(720,60,1)	normal(5,2,1)	Breakdown	[All]	<input checked="" type="checkbox"/>

Rys. 16. Tankowanie maszyn stacjonarnych wymuszające zatrzymanie cyklu produkcyjnego

Fig. 16. Refueling stationary machines, which causes stops of production cycle

6. Przerwy w pracy (stoppages) zaprogramować można jako regularne, czyli te zidentyfikowane podczas badań terenowych, przerwy pracy maszyn ładujących i transportujących. Czynności technologiczne związane z rozruchem kruszarni oraz przygotowywaniem przodków do strzelania są wykorzystywane przez kierowców m.in. do wykonywania drobnych napraw, przeglądu maszyn oraz tankowania. Wozy odstawcze zostały podzielone na grupy, ustalając w ten sposób harmonogram ich przyjazdów na stacje benzynowe. Założono, że wywrotki z grup TG2 i TG3 pracują w przodkach, na których pod koniec zmiany planuje się wykonywać roboty strzałowe i w związku z tym zakończą pracę szybciej. Przyjęto zatem, że skrócony czas pracy w wyrobisku poświęcony zostanie przez operatorów tych pojazdów na ich zatankowanie.

Drugim rodzajem przerw są przerwy losowe (nieregularne), które opisano przy pomocy normalnego rozkładu prawdopodobieństwa. Dotyczą one zablokowania leja zasypowego łamiarni oraz tankowania jednostek ładujących w wyrobisku. Ustalono (w minutach) czasy rozpoczęcia, powtarzania oraz trwania przerw zapisane są w formacie (*średnia; odchylenie standardowe; liczba strumieni generatora liczby losowych*).

Wizyta terenowa w kopalni

Dane wykorzystane w modelowaniu dotyczące parametrów technicznych i ruchowych maszyn oraz czasów trwania poszczególnych składowych cyklu zostały zmierzone w dniu 12.06.2019 roku. Pomiary zaprezentowano w tabelach 1-2.

Tab. 1. Czas składowych cyklu pracy wozu Komatsu HD605
Tab. 1. Time components of the work cycle of the Komatsu HD605 dump truck

Czynność/Próba	Czas, s			
	I	II	III	Średnia
Manewry i załadunek	136	154	150	147
Jazda z ładunkiem	256	261	255	257
Jazda bez ładunku	260	256	261	259
Manewry i rozładunek	40	34	37	37

Tab. 2. Czas składowych cyklu pracy wozu Hitachi EH1100
Tab. 2. Time components of the work cycle of the Hitachi EH1100 dump truck

Czynność/Próba	Czas, s			
	I	II	III	Średnia
Manewry i załadunek	191	185	189	188
Jazda z ładunkiem	259	255	261	258
Jazda bez ładunku	268	266	261	265
Manewry i rozładunek	35	33	37	35

Model rzeczywisty

Pierwszy eksperyment (scenariusz rzeczywisty) został przeprowadzony w oparciu o istniejącą infrastrukturę, posiadającą flotę maszyn oraz zaprogramowane zmierzone czasy poszczególnych składowych cyklu pracy wozideł w kopalni. Gęstość przewożonego urobku to odpowiednio 2,40 Mg/m³ (do

cementowni) oraz 2,70 Mg/m³ (do wapienników).

Transport urobku realizuje sześć wozów odstawczych dwóch typów: Komatsu HD605 oraz Hitachi EH1100. Wozidła oznaczone numerami B3 i B4 realizują dostawy z piętra niższego materiału wejściowego do wapienników, natomiast samochody A2, A1, B2 oraz B1 dowożą do kruszarni wapienie z pięter górnych obu wyrobisk. Załadunku urobku dokonują dwie koparki przedsiębiorne: Liebherr R984HD i Hitachi EX1200 5D oraz ładowarka łyżkowa Komatsu WA600-6.

Analiza wyników symulacji

Wyniki zostały przedstawione w formie tabelarycznej i graficznej. Dotyczą wielkości przewiezonego urobku, wydajności jednostek transportowych, stanów pracy maszyn oraz zmianowego przebiegu kilometrowego pojazdów.

W ciągu 8-godzinnej zmiany roboczej przewieziono 8 563,76 Mg urobku, średnio na jedno wozidło przypadło 1427,29 Mg. Jednostki B3 i B4 przetransportowały tonaż o ilości zdecydowanie poniżej średniej. Jest to związane z większą gęstością przewożonego materiału oraz obsługującą je koparką Liebherr R984HD, której pojemność łyżki wynosi 5,4 m³. Jest to wielkość mniejsza o 1,0 m³ od dwóch pozostałych maszyn ładujących.

Tab. 3. Objętość oraz tonaż przewiezonego urobku przez poszczególne samochody

Tab. 3. Volume and tonnage of material transported by each car

Sprzęt	Tonaż, (Mg)	Objętość, (m ³)
Hitachi EH 11003 A1	1 455,10	606,29
Hitachi EH 11003 A2	1 408,97	587,07
Komatsu HD6055 B1	1 512,75	630,31
Komatsu HD6055 B2	1 521,77	634,07
Komatsu HD6055 B3	1 366,27	506,02
Komatsu HD6055 B4	1 298,91	481,08
Suma	8 563,76	3 444,85

Tab. 4. Ilość załadowanego urobku przez jednostki ładujące
Tab. 4. Amount of material loaded by the loading machines

Sprzęt	Tonaż, (Mg)	Objętość, (m ³)
Hitachi EX12005D	3034,52	1264,38
Komatsu WA6003	2910,23	1212,60
Liebherr R984HD	2665,17	987,10
Razem	8609,92	3464,08

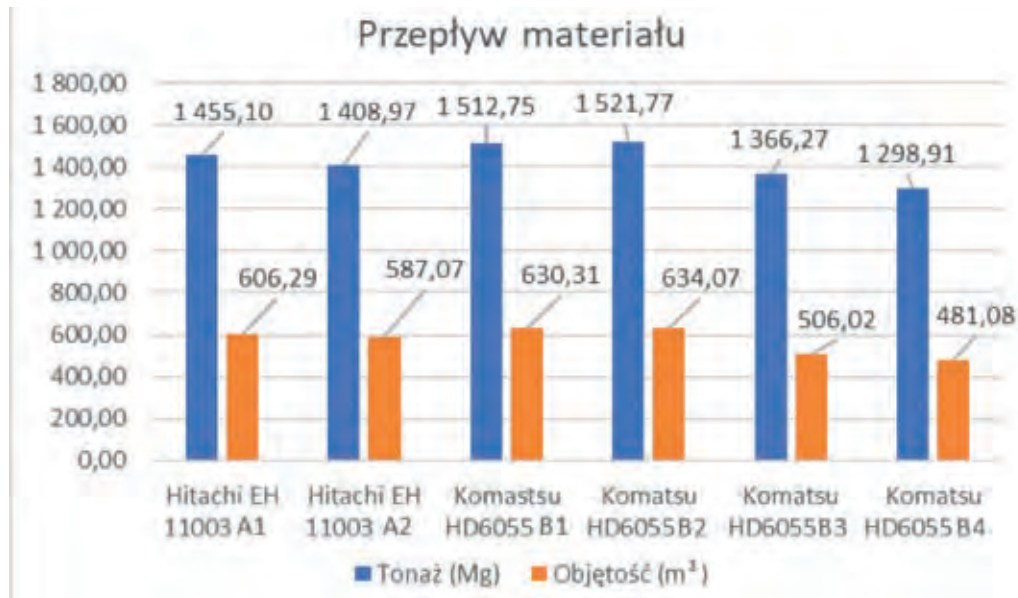
Ilość załadowanego przez koparki i ładowarki urobku jest powiązana z wielkością naczyń roboczych, a uzyskane wyniki idealnie odzwierciedlają zachodzące między nimi proporcje.

Przodek wyrobiska zachodniego znajduje się bliżej łamiarni dzięki czemu wywrotki A1 oraz A2 w ciągu godziny przewiozły więcej kopalin, niż te pracujące w wyrobisku wschodnim. Należy wziąć pod uwagę, że wpływ na ten wynik mogła mieć skrzynia o ładowności większej o 2 Mg. Średnia godzinowa produktywność całego układu maszynowego wynosi 1069,82 Mg.

Czynnością trwającą najdłużej w przypadku wszystkich wozideł był czas załadunku. Jest to stan związany z pracą innej maszyny, zatem z jej cyklem. Na cykl pracy maszyny ładują-

Tab. 5. Zestawienie procentowego udziału składowych czynności cyklu całej 8-godzinnej zmiany
 Tab. 5. Percentage summary of cycle states of work throughout the 8-hour shift

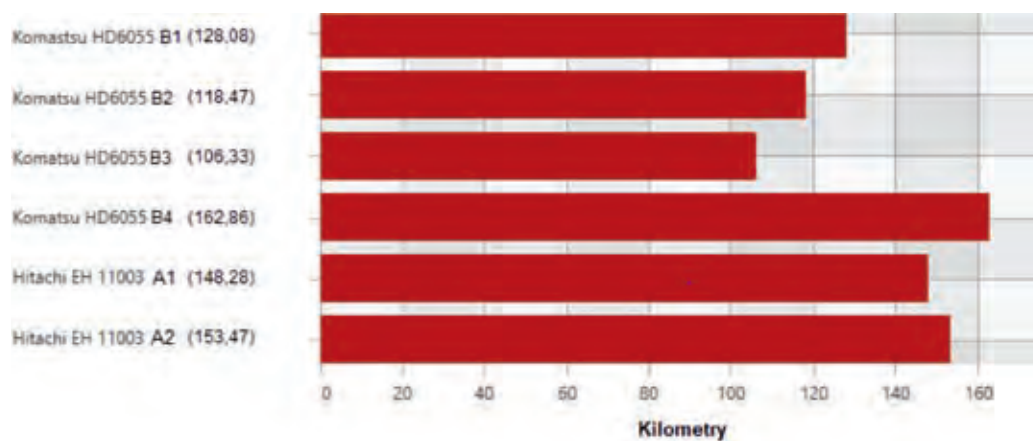
Sprzęt	Rozładunek	Blokada jazdy z ładunkiem	Jazda z ładunkiem	Blokada jazdy bez ładunku	Jazda bez ładunku	Tankowanie	W kolejce przy załadunku	W kolejce przy rozładunku	Przerwa socjalna	Załadunek	Bieg jałowy
Komatsu HD6055 B4	0,92	0,00	22,97	4,39	24,00	5,42	3,24	0,00	6,25	28,22	4,60
Komatsu HD6055 B3	0,96	0,00	24,09	3,46	25,18	4,38	1,11	0,00	6,25	29,61	4,97
Komatsu HD6055 B2	1,09	0,00	24,40	3,90	24,97	3,97	1,85	0,02	6,25	29,04	4,51
Komatsu HD6055 B1	1,09	0,05	24,13	2,24	25,66	5,76	1,27	0,06	6,25	28,80	4,69
Hitachi EH 11003 A2	1,24	0,01	26,66	3,16	27,37	4,17	2,03	0,36	6,25	28,52	0,24
Hitachi EH 11003 A1	1,29	0,58	27,18	3,94	26,97	4,17	0,91	0,03	6,25	28,47	0,21
Razem	6,59	0,65	149,44	21,09	154,14	27,86	10,41	0,46	37,50	172,65	19,21
Średnia	1,10	0,11	24,91	3,51	25,69	4,64	1,74	0,08	6,25	28,78	3,20



Rys. 17. Porównanie przewiezionej ilości urobku przez wozidła z ukazaniem relacji objętość-tonaż
 Fig. 17. Comparison of the amount of material transported by the haul truck with the volume-tonnage relationship



Rys. 18. Wygenerowane w raporcie symulacyjnym poglądowe wykresy czasów trwania stanów pracy wozidel
 Fig. 18. Demonstrative graphs of haul trucks stages of work duration generated in the simulation report



Rys. 19. Całkowita droga przejechana przez wozidła podczas 8-godzinnej zmiany roboczej
Fig. 19. Total distance traveled by haul trucks during an 8-hour work shift

cej składa się kilka czynności, których suma czasów trwania wpływa na długość postoju samochodów. Średnio załadunek wyniósł 28,78% całkowitego czasu w trakcie 8-godzinnej zmiany roboczej, czyli 2 godziny i 18 minut. Rozładunek był czynnością technologiczną, która trwała najkrócej ok. 1,1%, czyli 5 minut. Stanem, który trwał w równym czasie (30 minut) w stosunku do każdej maszyny była przerwa socjalna (śniadaniowa) zaprogramowana w sposób deterministyczny w narzędziu „Regular Stoppages”.

Narzędzie „Reports” programu HaulSim oprócz generowania tabel tworzy diagramy (Rys. 18), ukazujące graficznie zebrane w tabelach wyniki.

Okno „dashboard” umożliwia dynamiczny podgląd na parametry pracy maszyn. Dzięki temu narzędziu możemy śledzić aktualne prędkości maszyn, wydajności chwilowe oraz ilości przejechanych kilometrów (Rys. 19). Wartość średnia przebytej drogi dla wozideł jeżdżących do wyrobiska wschodniego wynosi 128,94 km, natomiast do wyrobiska zachodniego – 150,88 km.

Wnioski

Zmiana wydajności ze względu na korektę czasu wyładunku ma charakter zbliżony do liniowego. Amplituda wyników badanych zmian wyniosła 26,6 Mg. Wydłużenie czasu wyładunku powoduje kolejkowanie się wozideł w miejscach wysypu, natomiast skrócenie wpływa pozytywnie na obciążenie pracy kruszarni, ze względu na posiadaną i niewykorzystywaną rezerwę wydajności.

W przypadku czasu załadunku dostrzec można dużą nieliniowość zmian. Odchylenie od wartości bazowej jest największe po stronie skrócenia czasu załadunku, co spowodowane jest długim czasem trwania cyklu załadunkowego. Przy bazowym czasie załadunku dochodziło do kolejek wozideł przy koparce, zatem skrócenie tych postojów wpływa pozytywnie na produktywność układu transportowego. Wydłużenie czasu załadunku wykazuje minimalny wpływ na wydajność zmianową. Może być to związane z tym, że każda koparka współpracuje wyłącznie z dwoma wozidłami, a więc kolejkuje się maksymalnie jedno wozidło. Aby udowodnić powyższą tezę należałoby stworzyć symulację, w której do miejsca załadunku podjeżdżają więcej niż dwa wozidła i przeprowadzić jej analizę wrażliwości.

Czas jazdy został zidentyfikowany jako najbardziej wrażliwy spośród analizowanych parametrów pracy. Zwiększenie,

bądź zmniejszenie odległości transportowych to kluczowy czynnik wpływający na wydajność. Różnica między najwyższą, a najniższą wartością w dokonanej analizie wynosi 34,44 Mg. Zmiana wydajności pod wpływem skrócenia lub wydłużenia jazdy o 20% charakteryzuje się wartościami zbliżonymi do funkcji liniowej.

Nieliniowość zmian powstała w wyniku kilkukrotnej replikacji pozwala na wykluczenie sprzeczności danych wejściowych i założeń stworzonego modelu.

Model alternatywny

Przeprowadzona symulacja alternatywnego scenariusza polegała na kontynuowaniu pracy na podstawie stworzonego modelu. Zmianie poddana została pracująca flota maszyn, dotychczasowe wozidła (o ładowności 63 Mg i 65 Mg) zostały zastąpione jednostkami posiadającymi możliwości przewozowe 101 Mg. W miejsce obecnie eksploatowanych ładowarek i koparek łyżkowych (o pojemności łyżki odpowiednio 6,4 m³, 6,5 m³ oraz 5,4 m³) wprowadzono koparki o pojemności naczynia 11 m³. Gęstość przewożonego urobku nie uległa zmianie: na potrzeby cementowni – 2,40 Mg/m³ oraz do wapienników – 2,70 Mg/m³.

Urobek jest transportowany za pomocą czterech pojazdów jednego typu Komatsu HD985-5 (Tab. 6). Samochód o numerze N4 dowozi do wapiennika wapienie z piętra niższego. Wozy N1 i N3 stale współpracują z koparkami ładującymi wapienie piętra wyższego. Zadaniem wywrotki N2 jest wspomaganie wozideł wykonujących swoje zadania na piętrach górnych obu wyrobisk. Przyjęto, że N2 połowę zmiany roboczej pracuje w wyrobisku wschodnim, a drugą część w wyrobisku zachodnim. Ze względu na transport wapieni dolnego piętra jednym samochodem wykorzystywany jest tylko jeden lej zaspowoy wapiennika.

Analiza wyników symulacji

Przy użyciu czterech wozideł, o ładowności powyżej 100 Mg, w trakcie zmiany roboczej (8h) można przetransportować 10 518,92 Mg urobku. Oznacza to, że jeden wóz ma możliwość przewiezienia około 2 629,73 Mg. Pracujące maszyny, zarówno samochody i koparki, były tego samego typu, dlatego wszystkie przeniosły podobną ilość materiału.

Droga transportowa z wyrobiska zachodniego do kruszarni jest krótsza, niż do wyrobiska wschodniego, co pozwoliło N3 uzyskać wyższą, niż maszyny N1 i N2 wydajność go-

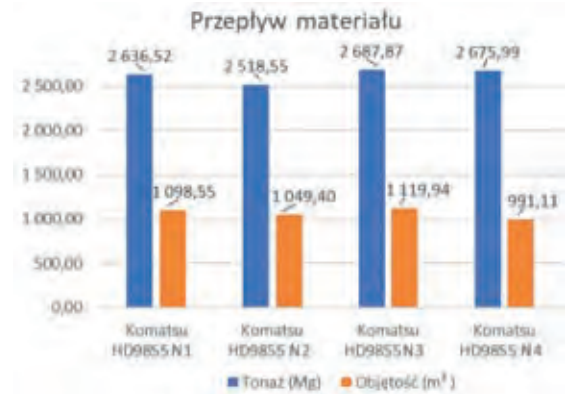
dzinową. Najwyższą wydajność uzyskało wozidło N4, które współpracowało z koparką i lejem zasypowym w wariancie 1:1. Pozwoliło to na maksymalną efektywność pracy, poprzez uniknięcie przerw związanych z oczekiwaniem w kolejce na załadunek, bądź rozładunek.

Koparka (Komatsu PC 1800-6) nr 1 i 2 współpracowała stale z dwoma wozidłami co spowodowało jej stałe obłożenie pracą i uzyskanie wysokiej wartości rzeczywistej wydajności zmianowej. Różniąc się od pozostałych wartość załadowanego tonażu przez jednostkę ładującą nr 3 jest związana z powiązaniem jej w układzie maszynowym wyłącznie z jedną wywrotką.

Jazda z ładunkiem oraz bez ładunku były czynnościami trwającymi najdłużej. Wielkość naczynia ładującego pozwoliła na szybki załadunek urobku. Ze względu na nałożone przez zakładowy regulamin transportu ograniczenie prędkości na drogach zakładowych, to długość dróg transportowych ma decydujący wpływ na czas trwania przyjazdu na stanowisko załadunku i rozładunku. Całkowity czas jazdy z ładunkiem wynosi 2 godziny i 18 minut, czyli 29% całej 8-godzinnej zmiany roboczej, natomiast jazda bez ładunku trwała 2 godziny i 17 minut (28%). Najkrócej trwającym stanem był rozładunek – 6 minut, czyli 1,2%. Analogicznie jak w modelu rzeczywistym przerwa śniadaniowa trwała równo 30 minut (6,25%), dokładnie tyle ile narzucono „odgornie”.

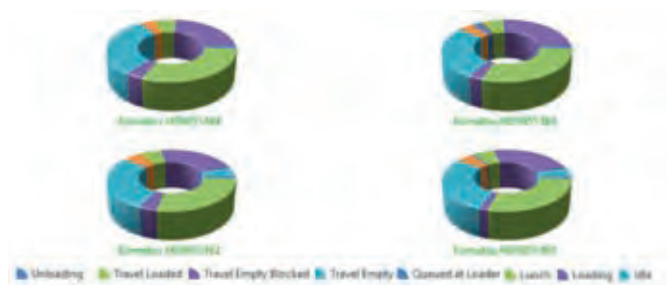
Program HaulSim pozwolił na wygenerowanie poglądowych diagramów kołowych ukazujących pracę wszystkich maszyn.

Na rysunku 22 przedstawiono sumaryczną ilość przejechanych kilometrów podczas zmiany roboczej. Samochód N4 przejechał największy dystans, spośród wszystkich zleconych zadań transportowych w tym modelu, który wynika z najdłuż-



Rys. 20. Graficzne porównanie przewiezionej ilości urobku przez wozidła z przedstawieniem relacji objętość-tonaż w alternatywnym układzie maszyn

Fig. 20. Graphic comparison of the amount of material transported by the dump trucks with a representation of the volume-tonnage relationship in an alternative machine system



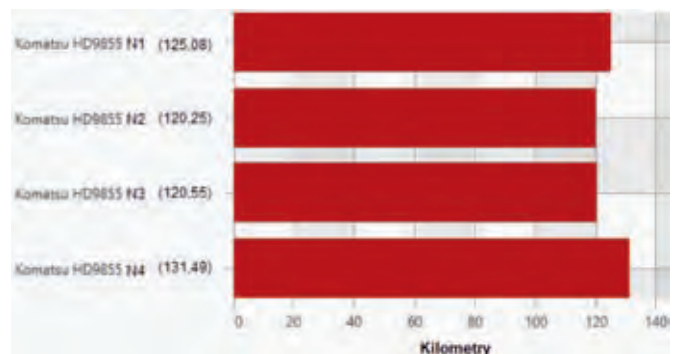
Rys. 21. Wygenerowane w raporcie symulacyjnym poglądowe wykresy czasów trwania stanów pracy wozidel

Fig. 21. Demonstrative graphs of haul truck stages of work duration generated in the simulation report

Tab. 6. Objętość oraz tonaż przewiezionego urobku przez poszczególnego samochodu

Tab. 6. Volume and tonnage of material transported by each car

Sprzęt	Tonaż (Mg)	Objętość (m³)
Komatsu HD9855 N1	2 636,52	1 098,55
Komatsu HD9855 N2	2 518,55	1 049,40
Komatsu HD9855 N3	2 687,87	1 119,94
Komatsu HD9855 N4	2 675,99	991,11
Suma	10 518,92	4 259,00



Rys. 22. Całkowita droga przejechana przez wozidła podczas 8-godzinnej zmiany roboczej

Fig. 22. Total distance traveled by haul trucks during an 8-hour work shift

Tab. 7. Zestawienie procentowego udziału składowych czynności w całym cyklu pracy podczas 8-godzinnej zmiany

Tab. 7. Percentage summary of cycle states of work throughout the 8-hour shift

Sprzęt	Rozładunek	Blokada jazdy z ładunkiem	Jazda z ładunkiem	Blokada jazdy bez ładunku	Jazda bez ładunku	Tankowanie	W kolejce przy załadunku	W kolejce przy rozładunku	Przerwa socjalna	Załadunek	Bieg jałowy
Komatsu HD985-5 N1	1,18	0,00	30,41	3,75	30,68	4,17	0,00	0,00	6,25	23,32	0,24
Komatsu HD985-5 N2	1,25	0,00	29,33	2,91	26,88	4,17	2,63	0,52	6,25	25,87	0,21
Komatsu HD985-5 N3	1,17	0,00	27,04	3,94	28,15	5,32	0,00	0,08	6,25	23,33	4,72
Komatsu HD985-5 N4	1,20	0,00	27,92	2,04	28,27	4,70	0,79	0,06	6,25	24,28	4,48
Razem	4,80	0,00	114,69	12,64	113,98	18,35	3,42	0,67	25,00	96,80	9,64
Średnia	1,20	0,00	28,67	3,16	28,50	4,59	1,71	0,22	6,25	24,20	2,41

szej drogi między punktem załadunku i wyładunku.

Wartości dostarczonego urobku z każdego przodka różnią się od siebie. Koparki pracujące na przodkach nie są obciążone równomiernie tj. na przodki pięter górnych przyjeżdżały dwa wozy, podczas gdy koparkę z piętra dolnego obsługiwało tylko jedno.

Porównanie wyników wykonanych symulacji scenariuszy

Zgodnie z oczekiwaniami kierownictwa zmniejszenie ilości maszyn i zastąpienie ich większymi pozytywnie wpłynęło na wydajność. W tabeli 8 porównano wyniki symulacji scenariuszy.

W przypadku każdego parametru odnotowano poprawę. Ilość przejechanych kilometrów zmalała prawie dwukrotnie co jest związane ze zmniejszoną flotą maszyn pracujących podczas zmiany. Pomimo mniejszej średniej ilości pokonanych kilometrów i ilości maszyn, wydajność godzinowa zwiększyła się o ponad 300 Mg. Większe skrzynie pojazdów przyczyniły się do większej ilości przewiezonego przez nie urobku. Przeprowadzona analiza miała na celu sprawdzenie czy i w jaki sposób możliwa jest redukcja ilości pracujących maszyn w wyrobisku przy zachowaniu wymaganego dzien-

Podsumowanie

Celem projektu było wykonanie symulacji cyklicznej pracy wozy w kopalni odkrywkowej w programie HaulSim. Dzięki wczytaniu do programu modelu kopalni i starannemu naniesieniu sieci dróg na podstawie mapy transportu, otrzymano wiernie odzwierciedlający rzeczywistość model.

Utworzenie dwóch modeli układów maszynowych miało na celu sprawdzenie zmiany wydajności układu w wyniku zmniejszenia ilości pracujących maszyn przy jednoczesnej wymianie ich na posiadające pojemniejsze naczynia robocze (łyżka i skrzynia). Potwierdzeniem zrealizowania założonego celu pracy oraz dokładności wykonanego modelu rzeczywistego było zestawienie wyników otrzymanych z symulacji z informacjami uzyskanymi z kopalni.

Największy wpływ na czas trwania ładowania ma wielkość skrzyni oraz stosunek jej objętości do łyżki koparki lub ładowarki (Czaplicki, 2006).

Jako czynność najkrótszą, będącą jedną z czterech głównych składowych cyklu, należy wyróżnić rozładunek skał – 1,1% całkowitego czasu cyklu. W obydwu analizowanych scenariuszach

Tab. 8. Zestawienie osiągniętych rezultatów w rzeczywistym i alternatywnym scenariuszu

Tab. 8. Summary of results achieved in a real and alternative scenario

Parametr	Scenariusz	
	Rzeczywisty	Alternatywny
Produktywność, Mg/h	1 069,82	1 386,92
Całkowita ilość przejechanych kilometrów, km	817,49	497,37
Średnia ilość przejechanych kilometrów, km	136,25	124,34
Suma przewiezonego urobku, Mg	8 563,76	10 518,92
Średnia przewiezonego urobku na jedno wozy, Mg	1 427,29	2 629,73
Ilość przyjętego urobku przez wapienniki	2 665,18	2 675,99
Ilość przyjętego urobku przez cementownię	5 898,59	7 842,94

Tab. 9. Porównanie procentowego czasu trwania części cyklu w dwóch scenariuszach

Tab. 9. Comparison of the percentage duration of a states of work in two scenarios

Czynność	Scenariusz	
	Rzeczywisty	Alternatywny
Załadunek, %	28,78	24,20
Wyładunek, %	1,10	1,20
Jazda z ładunkiem, %	24,91	28,67
Jazda bez ładunku, %	25,69	28,50

negu wydobycia. Zaprojektowany i zamodelowany układ maszynowy pozwolił na utrzymanie, a nawet zwiększenie obecnego stanu dziennego wydobycia.

Analizując procentowe udziały składowych cyklu pracy dla dwóch scenariuszy (Tab. 9) można zauważyć, że czas załadunku uległ skróceniu. Powodem jest wprowadzenie maszyny ładującej, której stosunek pojemności łyżki do skrzyni jest większy. Z tego samego powodu wydłużeniu uległ czas wyładunku (większa skrzynia to dłużej trwający wysyp).

W obu scenariuszach symulacja przeprowadzona była w odniesieniu do 8-godzinnej zmiany roboczej. Ilość maszyn i ich współpraca z poszczególnymi przodkami zależy od zgłoszonego przez zakład przerobczy zapotrzebowania. Aby ustalić jak zmiana wielkości maszyn wpłynęłaby rzeczywistości na wydajność tygodniową, bądź miesięczną należałoby wykonać kilka symulacji z różnymi układami maszyn.

zajmuje on procentowo najmniejszą ilość czasu całego cyklu.

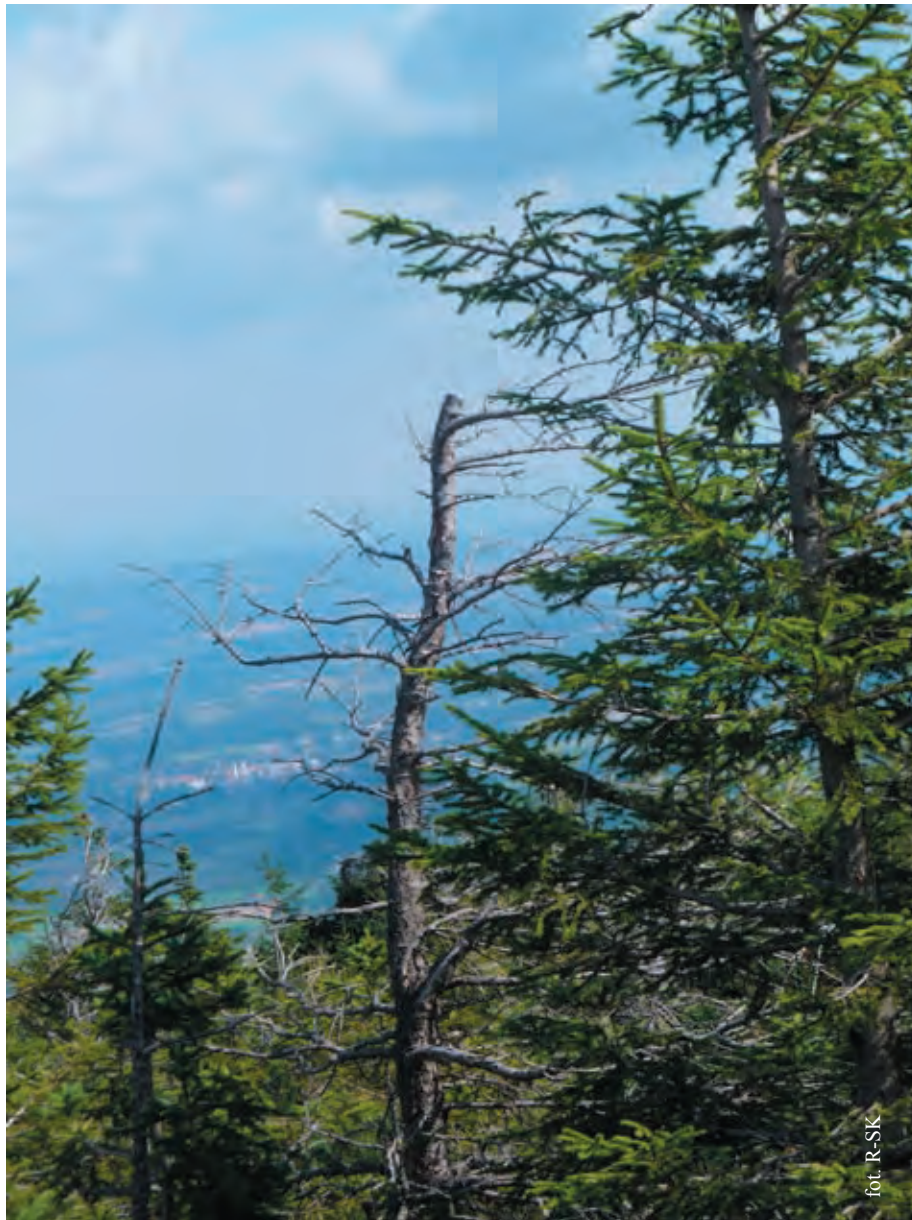
Awaryjność, blokady oraz przerwy w pracy mają bardzo duży wpływ na parametry systemu maszynowego. Działaniem, mającym na celu niwelowanie skutków powstałych przestojów, może być wprowadzanie do układu maszyn rezerwowych (Czaplicki, 2006).

Udział czasowy przerw i blokad (około 12% całkowitego czasu) w trakcie zmiany roboczej przewyższa sumaryczny czas wyładunku, zatem to ich zmiana w większym stopniu powoduje wzrost lub spadek wydajności.

Symulacja utworzona w oparciu o alternatywny układ maszyn charakteryzuje się dwukrotnie mniejszą ilością przejechanych kilometrów podczas zmiany roboczej. Fakt ten może pozytywnie wpłynąć na żywotność ogumienia, a tym samym koszty inwestycyjne poniesione przez kopalnię.

Literatura

- [1] Czaplicki, J., 2006. Modelowanie procesu eksploatacji systemu koparki – wywrotki. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej Gliwice
- [2] Jurczyk, K., Granie w symulacje, „Czasopismo: Kaizen”, 2017, nr 2, str. 50-53
- [3] Strona internetowa <http://www.rpmglobal.com/> [Dostęp 17.05.2020]
- [4] Strona internetowa <https://flexsim.pl/wp-content/uploads/2017/05/Granie-w-symulację-KAIZEN-2-2017.pdf> [Dostęp 17.05.2020]
- [5] Strona internetowa <https://flexsim.pl/haulsim/> [Dostęp 17.05.2020]
- [6] Strona internetowa <http://www.logistyczny.com/biblioteka/w-magazynie/item/3752-symulator-efektow?fbclid=IwAR067UBFmIsAQBeRsIEbIry4kumMLHvMmcc2TrAtmRR4UYjgHxRHJV9pAJ8> [Dostęp 17.05.2020]



Dolny Śląsk. Piękno Gór Izerskich odrodzonych po katastrofie ekologicznej