

Promotor: dr hab. inż. Piotr Kulinowski
Promotor pomocniczy: dr inż. Jerzy Kicki

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Rafał Polak

Modele symulacyjne w wielokryterialnej analizie procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych

Sprawna logistyka to jeden z głównych czynników determinujących sukces przedsiębiorstw. Sposób realizacji wewnętrznych procesów transportowych wpływa nie tylko na wydajność systemu produkcyjnego, lecz również określa jego efektywność, wytyczając tym samym jeden z kluczowych kierunków doskonalenia działalności operacyjnej. Zważając na charakter i warunki prowadzenia eksploatacji złóż, badania nad realizacją procesów transportowych urobku w kopalniach podziemnych, pomimo iż obejmują złożone i rozległe systemy transportowe, wykonywane są z pewnymi ograniczeniami. W głównej mierze wynika to z istnienia naturalnych ograniczeń w zakresie kontroli operacyjnej oraz z konieczności planowania techniczno-organizacyjnych środków realizacji procesu w warunkach wysokiej niepewności. Pożądana eliminacja ryzykownych eksperymentów i ograniczenie ingerencji w poprawnie funkcjonujący układ transportowy, w tej sytuacji znajdują szczególne zrozumienie i przemawiają wprost za zastosowaniem metod symulacyjnych. Zważając jednak na złożoność strukturalną, dynamikę i niepewność przebiegu procesów transportowych, opracowanie w pełni użytecznych modeli symulacyjnych, wymaga dostosowania do specyficznych warunków i potrzeb analitycznych. Stopień skomplikowania ów modeli oraz ilość danych wejściowych niezbędnych w celu osiągnięcia zadowalającego stopnia pewności wyników, definiują jednocześnie ciężar związany z ich docelowym utrzymaniem w przestrzeni informacyjnej przedsiębiorstwa. Ukierunkowuje to uwagę w głównej mierze na użytkowe atrybuty modeli symulacyjnych – głównie zakres ich stosowalności, gdzie modele symulacyjne wspierające wielokryterialną analizę procesu transportowego poza aspektem poznawczym, umożliwić powinny najpełniejsze osiągnięcie celu praktycznego.

Jako nieodzowny czynnik sprzyjający realizacji tematyki pracy wskazać należy rosnącą liczbę maszyn i urządzeń transportowych wyposażonych w aparaturę kontrolno-pomiarową. Dotyczy to również wzrostu dostępności szerokopasmowych sieci teletransmisyjnych umożliwiających wymianę informacji z powierzchniowymi systemami akwizycji na niespotykaną wcześniej skalę. Rozpatrując dodatkowo rosnące wymagania ze strony rynku surowców, można stwierdzić, że wielokryterialna analiza przebiegu procesów transportowych z wykorzystaniem modeli symulacyjnych stała się obecnie zarówno bardziej uzasadniona jak i osiągalna technicznie. Niemniej jednak problematyka wykorzystania symulacji w ujęciu systemowym, wymaga przedłożenia metod praktycznego wykorzystania istniejących zbiorów danych pomiarowych, przez ich translację na warunki spodziewane w przyszłości, celem pokrycia zróżnicowanych potrzeb wsparcia w ruchomym horyzoncie decyzyjnym. Powołane kwestie, zyskują na znaczeniu przedkładając ponad wszystko potrzebę wielokryterialnej analizy i oceny procesu transportu urobku realizowanego w sposób ciągły lub cykliczny, gdzie sposób sterowania, organizacji i współpracy środków transportowych tworzyć może złożone systemy wzajemnych interakcji na poziomie nadrzędnym i lokalnym. Stochastyczna natura procesu wydobycia urobku, zdolność kontrakcji i ekspansji w czasoprzestrzeni, stanowią w tym zakresie kluczowe warunki realizacji tematyki pracy, które zadecydowały o potrzebie wykonania dodatkowych badań nad przebiegiem procesów transportu urobku w kopalniach podziemnych.

Badanie to, przeprowadzone zostało z użyciem własnych technik analizy danych, poprzedzając etap formułowania założeń względem modeli symulacyjnych.

Zważywszy na istotność i skalę oddziaływania założeń popełnionych na etapie formułowania wymagań funkcjonalnych, realizacja badań z wykorzystaniem wyłącznie jednego modelu symulacyjnego stanowiłaby spore utrudnienie, zwiększając istotnie ryzyko niepowodzenia. Jako rozwiązanie tego problemu zaproponowano opracowanie wyodrębnionych modeli symulacyjnych, których zróżnicowane cechy funkcjonalne zapewnić powinny szeroką stosowalność w kontekście zdywersyfikowanych obszarów wsparcia decyzyjnego. W rezultacie podstawowe zagadnienie badawcze podjęte w pracy stanowiło opracowanie użytecznych decyzyjnie modeli, umożliwiających przeprowadzenie wielokryterialnych analiz procesu transportowego w aspekcie głównych kryteriów: kosztu, ciągłości i cech technologicznych. Kierunek prowadzonych badań potwierdzony został przez przegląd literatury, który wykazał nade wszystko brak kompleksowych rozwiązań w postaci modeli symulacyjnych, przeznaczonych do zastosowania w szerokim spektrum zastosowań analizy wielokryterialnej procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych.

Przeprowadzona dekompozycja jedno i wieloetapowych problemów decyzyjnych, pozwoliła na określenie podstawowych scenariuszy użytkowych a w rezultacie sformułowanie założeń modeli generycznych cechujących się wysokim stopniem wyrażalności. Rozwój modeli symulacyjnych prowadził kolejno do opracowania i weryfikacji różnych sposobów symulacji przestrzeni, masy, prawdopodobieństwa oraz upływu czasu. Towarzyszyła temu budowa systemu wzajemnych interakcji i oddziaływań dynamicznych w przestrzeni stanu procesu na poziomie koncepcyjnym a finalnie implementacji w języku programistycznym. Przedsięwzięto w tym zakresie zróżnicowane mechanizmy przebiegu symulacji, uwzględniając złożoność strukturalną i funkcjonalną modelu. Ostateczny rezultat pracy stanowią dwa sformułowane od podstaw modele, realizujące symulację metodą zdarzeń dyskretnych (ang. *Discrete Event Simulation* – DES). Opracowane modele: Rekurencyjny Model Symulacyjny (RMS) oraz Interakcyjny Model Symulacyjny (IMS), umożliwiają analizę procesu transportowego w krótkim, jak i długim horyzoncie czasowym z zachowaniem wysokiej skalowalności. Łącznie z nimi opracowana została metodyka ich współpracy i zastosowania w celu szczegółowego odwzorowania i oceny przebiegu procesu transportowego urobku, bądź generalizacji wiedzy we wsparciu zróżnicowanych obszarów decyzyjnych.

Podstawowy aspekt funkcjonalny różnicujący sformułowane i zaimplementowane modele stanowiła dynamika i zakres wzajemnych interakcji obiektów zdefiniowanych w przestrzeni symulacyjnej. Z poznawczego punktu widzenia celowe zastosowanie zróżnicowanych podejść w zakresie symulacji, opracowanych algorytmów oraz środowisk, w których przeprowadzono implementację, umożliwiło porównanie działania oraz przeprowadzenie testów współpracy dwóch rozwiązań, działających w ujęciu makro- i mikroskopowym. Dualizm ten po części wynikał z potrzeby dostarczenia modeli realizujących ocenę wielu kryteriów, częściowo również z zakresu pracy uwzględniającego dowolne środki realizacji procesu odstawy urobku a tym samym potrzebę odwzorowania zaawansowanego systemu ich wzajemnych interakcji. Zróżnicowanie wymagań funkcjonalnych doprowadziło w rezultacie do synergii obu podejść, odmiennych pod względem szczegółowości odwzorowania, jak i wydajności obliczeniowej, co pozwoliło na opracowanie kompleksowego rozwiązania podjętego problemu, w drodze skomunikowania ze sobą obu modeli. W pracy zawarto opis wielowarstwowej budowy rozwiązania docelowego z uwzględnieniem niepewności wieloetapowych procesów decyzyjnych oraz wpływu procesów losowych. Niektóre z warstw stanowiły obszar parametrów wejściowych, których konfiguracja przewidziana została jako docelowa przestrzeń optymalizacji, częściowo także przez bezpośrednie osadzenie w strukturze funkcjonalnej modelu symulacyjnego. Ostatecznie w celu walidacji działania modeli, przeprowadzono eksperymenty symulacyjne z użyciem opracowanych w tym celu interfejsów, procedur przetwarzania oraz technik wizualizacji danych wejściowych oraz wyjściowych. Badania symulacyjne

przeprowadzone z użyciem opracowanych modeli potwierdziły ich praktyczną przydatność w zakresie wielokryterialnej analizy procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych.

Supervisor: Piotr Kulinowski, dr hab. inż.

Assistant Supervisor: Jerzy Kicki, dr inż.

SUMMARY OF THE DOCTORAL DISSERTATION

Rafał Polak, M.Sc.

Simulation models in multi-criteria analysis of the haulage process in underground mines

Efficient logistics is one of the main factors determining the success of industrial enterprises. Internal transport processes influences not only the performance of the production system, but also determines its effectiveness, setting one of the key directions for operational activity improvement. Taking into account the nature and conditions of deposit exploitation, research on the implementation of haulage processes of the excavated material in underground mines, despite the fact that it involves complex and extensive transport systems, is performed with certain limitations. This is mainly due to the existence of natural limitations in terms of operational control and the necessity of planning technical and organizational means of the process realization under conditions of high uncertainty. Desired elimination of risky experiments and limitation of interference in correctly functioning haulage system, in this situation find particular understanding and speak directly for application of simulation methods. Taking into account the structural complexity, dynamics, and uncertainty of the course of transport processes, the development of fully useful simulation models requires adjustment to specific conditions and analytical needs. The degree of complexity of these models and the amount of input data necessary to achieve a satisfactory degree of certainty of the results, define at the same time the burden associated with their ultimate maintenance in the information space of the enterprise. This directs the attention mainly to the useful attributes of simulation models - mainly the scope of their applicability, where simulation models supporting the multi-criteria analysis of the haulage process, in addition to the cognitive aspect, should enable the fullest achievement of the practical goal.

As an indispensable factor supporting the realization of the work's was the growing number of transport machines equipped with control and measurement apparatus. It also concerns the increasing availability of broadband teletransmission networks enabling the exchange of information with surface acquisition systems on an unprecedented scale. Considering additionally the growing requirements of the raw materials market, it can be concluded that the multi-criteria analysis of the course of haulage processes with the use of simulation models has now become both more reasonable and technically achievable. Nevertheless, the problem of using simulation in the systemic approach requires the development of methods of practical utilization of the existing datasets of measurement, by their translation into the conditions expected in the future, in order to cover the diversified needs of support in the moving decisions horizon. These issues gain in importance by placing above all the need for multi-criteria analysis and evaluation of the excavated material transport process realized in a continuous or cyclic way, where the manner of control, organization and cooperation of transport equipment can create complex systems of mutual interactions on the superior and local level. The stochastic nature of the excavation process, its capacity for contraction and expansion in space-time, are in this respect the key conditions for the realization of the subject of the work, which determined the need for additional research on the course of excavated material transport processes in

underground mines. This research has been carried out with the use of own techniques of data analysis, preceding the stage of formulation of assumptions towards simulation models.

Taking into account the significance and scale of influence of assumptions made at the stage of formulating functional requirements, the realization of research with the use of only one simulation model would be a considerable difficulty, significantly increasing the risk of failure. As a solution to this problem, it was proposed to develop separate simulation models, whose diverse functional characteristics should ensure wide applicability in the context of diversified areas of decision support. As a result, the basic research issue undertaken in this study was the development of decision-useful models, enabling multi-criteria analysis of the transport process in terms of the main criteria: cost, reliability and technological features. The direction of the research has been confirmed by the literature review which has shown, above all, the lack of comprehensive solutions in the form of simulation models to be applied in a wide range of applications of multi-criteria analysis of the haulage process in underground mines.

The decomposition of single- and multi-stage decision problems allowed to define basic usage scenarios and, as a result, to formulate assumptions for generic models characterized by a high degree of expressibility. The development of simulation models led successively to the development and verification of different ways of simulating space, mass, probability and time lapse. This was accompanied by the construction of a system of mutual interactions and dynamic interactions in the process state space at the conceptual level and, finally, implementation in a programming language. Different mechanisms of the simulation were undertaken, taking into account the structural and functional complexity of the model. The final results of the work are two models formulated from scratch, realizing the simulation by the *Discrete Event Simulation* (DES) method. The developed models: Recursive Simulation Model (RMS) and Interaction Simulation Model (IMS), allow the analysis of the transport process in short as well as long time horizon with high scalability. Additionally, there was developed methodology for their cooperation and application in order to map and evaluate in detail the course of the excavated material transport process or to generalize knowledge in support of diverse decision-making areas.

The basic functional aspect differentiating the formulated and implemented models was the dynamics and range of mutual interactions of objects defined in the simulation space. From the cognitive point of view, the purposeful use of different approaches in the field of simulation, developed algorithms and environments in which the implementation was carried out, made it possible to compare the operation and cooperation tests of two solutions, operating in the macroscopic and microscopic approach. This duality partly resulted from the need to provide models realizing the evaluation of many criteria, partly also from the scope of work taking into account any means of execution of the spoil haulage process and thus the need to map an advanced system of their mutual interactions. The diversity of functional requirements resulted in a synergy of both approaches, different in terms of mapping details and computational efficiency, which allowed for the development of a comprehensive solution to the problem, by combining both models. The work also contains a description of multilayer construction of the target solution taking into account uncertainty of multistage decision processes and influence of random processes. Some of the layers were the area of input parameters, whose configuration was predicted as the target optimization space, partly also by direct embedding in the functional structure of the simulation model. Finally, in order to validate the accuracy of the models, simulation experiments were carried out using the interfaces, processing procedures and input and output data visualization techniques developed for this purpose. Simulation studies carried out using the developed models confirmed their practical usefulness in terms of multi-criteria analysis of the haulage process in underground mines.