



**Instytut Gospodarki
Surowcami Mineralnymi
i Energią**
Polskiej Akademii Nauk

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Rafał Polak

Modele symulacyjne w wielokryterialnej analizie procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych

Promotor:

dr hab. inż. Piotr Kulinowski

Promotor pomocniczy:

dr inż. Jerzy Kicki

Kraków 2021

Spis treści

Spis treści	2
Wykaz najważniejszych pojęć i oznaczeń.....	5
1. Wprowadzenie.....	7
2. Teza, cel i zakres pracy na tle stanu wiedzy.....	15
2.1. Przegląd zastosowań modeli symulacyjnych w analizie procesów transportu urobku w górnictwie.....	15
2.1.1. Przedmiotowa klasyfikacja piśmiennictwa	15
2.1.2. Wczesne modele symulacyjne.....	17
2.1.3. Rozwój środowisk symulacyjnych.....	23
2.1.4. Popularyzacja badań symulacyjnych.....	27
2.1.5. Badania symulacyjne jako integralny element zarządzania procesem transportu urobku	33
2.1.6. Modele symulacyjne stosowane poza górnictwem podziemnym	38
2.2. Identyfikacja docelowych zastosowań i kryteriów analitycznych	41
2.3. Teza, cel i zakres pracy	43
3. Charakterystyka procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych.....	47
3.1. Proces transportu urobku w systemie logistyki produkcji.....	47
3.2. Środki realizacji transportu kopalnianego.....	49
3.2.1. Transport przenośnikowy	49
3.2.2. Transport maszynami samojezdnymi	64
3.2.3. Transport wyciągiem szybowym.....	68
3.2.4. Transport koleją szynową.....	69
3.2.5. Zbiorniki urobku	70
3.2.6. Przesiewacz i przesyp.....	74
3.3. Źródła nadawy.....	75
3.3.1. Kombajnowy system ścianowy	75
3.3.2. Strugowy system ścianowy	86
3.3.3. Kombajn chodnikowy	88
3.3.4. Punkt przesypowy	91
3.3.5. Pozostałe punkty nadawy	93
3.4. Uogólnione wytyczne dla modeli symulacyjnych.....	94
4. Symulacja procesów transportowych.....	95
4.1. Wprowadzenie do symulacji komputerowej	95
4.1.1. Definicja symulacji komputerowej	96
4.1.2. Narzędzia badań symulacyjnych	97

4.1.3.	Etapy badań symulacyjnych	99
4.1.4.	Symulacje procesów transportowych	101
4.2.	Klasyfikacja modeli symulacyjnych	104
4.3.	Modele z masą ciągłą	111
4.3.1.	Model z równaniami różniczkowymi cząstkowymi	111
4.3.2.	Model z równaniami różniczkowymi zwykłymi	113
4.3.3.	Numeryczne sposoby rozwiązywania równań różniczkowych	115
4.3.4.	Praktyczna implementacja rozwiązań – podstawowe kwestie problematyczne	119
4.4.	Modele z masą dyskretną	122
4.4.1.	Model z czasem ciągłym	123
4.4.2.	Model inicjowany zdarzeniami	125
5.	Charakterystyka opracowanych modeli symulacyjnych	127
5.1.	Ogólne wymagania	127
5.2.	Elementy wspólne modeli	130
5.2.1.	Struktura połączeń	131
5.2.2.	Konwersja zapisu ruchu mas dyskretnych	132
5.2.3.	Odwzorowanie przepływu za pomocą funkcji przeniesienia	133
5.2.4.	Cechy obiektów funkcjonalnych	134
5.3.	Rekurencyjny model symulacyjny (RMS)	135
5.3.1.	Założenia	135
5.3.2.	Opis działania	135
5.3.3.	Cechy funkcjonalne i oczekiwana stosowalność	140
5.4.	Interakcyjny model symulacyjny (IMS)	141
5.4.1.	Założenia	141
5.4.2.	Opis działania	142
5.4.1.	Cechy funkcjonalne i oczekiwana stosowalność	147
5.5.	Uogólniony model punktów załadunkowych	147
5.6.	Użyte oprogramowanie	150
6.	Metodyka badań i analiz wielokryterialnych	152
6.1.	Klasyfikacja kluczowych scenariuszy wsparcia decyzyjnego	153
6.2.	Uogólniony przykład wsparcia decyzyjnego	155
6.3.	Wsparcie operacyjne i testy (Scenariusz WOT)	158
6.4.	Uzupełniające zadania badawcze (Scenariusz UZB)	159
6.5.	Wsparcie procesów planistycznych (Scenariusz WPP)	162
6.5.1.	Ogólna charakterystyka scenariusza	162
6.5.2.	Wymagania funkcjonalne	164
6.5.3.	Użyte komponenty i ich współpraca	165

6.5.4.	Przebieg badań symulacyjnych	167
7.	Walidacja opracowanych modeli symulacyjnych	182
7.1.	Przygotowanie danych wejściowych.....	182
7.1.1	Przestrzenna struktura wyrobisk	183
7.1.2	Przestrzenne dane górnicze	184
7.1.3	Założenia procesów stochastycznych.....	186
7.2.	Symulacja i wielokryterialna analiza wyników.....	187
7.2.1.	Weryfikacja w formie wstępnych badań symulacyjnych.....	188
7.2.2.	Wyniki symulacji długookresowej.....	192
7.2.3.	Określenie wariantów poddanych analizie.....	197
7.2.4.	Badanie wydajności i efektywności procesu transportowego z użyciem modelu rekurencyjnego (RMS).....	200
7.2.5.	Badanie ciągłości procesu transportowego z użyciem modelu interakcyjnego (IMS).....	205
7.2.6.	Badanie cech technologicznych procesu transportowego z użyciem modelu interakcyjnego (IMS)	209
7.2.7.	Wielokryterialna ocena przebiegu procesu transportowego.....	211
8.	Podsumowanie i wnioski końcowe	213
	Literatura	223

Wykaz najważniejszych pojęć i oznaczeń

Stosowane skróty:

AKPiA – Aparatura Kontrolno-Pomiarowa i Automatyka

APC (ang. *Advanced Process Control*) – zaawansowana kontrola procesu

CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) - Obliczeniowa mechanika płynów

CM (ang. *Continuous Miner*) – kombajn chodnikowy urabiający liniowo

DEM (ang. *Discrete Element Method*) - symulacja metodą elementów dyskretnych

DES (ang. *Discrete Event Simulation*) – symulacja metodą zdarzeń dyskretnych (kolejnych zdarzeń)

FIFO (ang. *First In, First Out*) – kolejka typu pierwszy wchodzi, pierwszy wychodzi

IMS – Interakcyjny Model Symulacyjny

LHD (ang. *Load, Haul, Dump machine*) – ładowarka realizująca operację ładowania, przewozu i zrzutu

LIFO (ang. *Last In, First Out*) – kolejka typu ostatni wchodzi, pierwszy wychodzi

MPC (ang. *Model Predictive Control*) – sterowanie predykcyjne z modelem systemu

ODE (ang. *Ordinary Differential Equation*) – symulacja numeryczna o zmiennych skupionych

OT (ang. *Operational Technology*) – system nadzoru operacyjnego (m.in. SCADA)

PDE (ang. *Partial Differential Equation*) – symulacja numeryczna o zmiennych rozproszonych

RHC (ang. *Receding Horizon Controller*) – kontroler realizujący sterowanie w przesuwym horyzoncie

RMS – Rekurencyjny Model Symulacyjny

SC (ang. *Shuttle Cars*) – przodkowe wozy odstawcze

SCADA – (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) – system informatyczny nadzorujący przebieg procesu technologicznego lub produkcyjnego

UzB – Scenariusz użytkowy: Uzupełniające Zadania Badawcze

WOT – Scenariusz użytkowy: Wsparcie Operacyjne i Testy

WPP – Scenariusz użytkowy: Wsparcie Procesów Planistycznych

Stosowane oznaczenia:

L – długość trasy transportowej [m],

q – masa jednostkowa nosiwa [kg/m],

Q_{we} – przepływ wejściowy strugi materiału [Mg/h],

Q_{wy} – przepływ wyjściowy strugi materiału [Mg/h],

R – ilość urobku zgromadzonego w obrębie obiektu [Mg],

t – czas [s],

t_s – krok czasowy symulacji [s],

$u(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ – gęstość jednostkowa masy urobku w punkcie \mathbf{x} i czasie t [kg],

V – prędkość liniowa ruchu taśmy [m/s],

$\mathbf{x}(\mathbf{t})$ – wektor stanu symulacji,

\mathbf{x}_0 – położenie początkowe,

$\mathbf{x}_i(\mathbf{t})$ – położenie jednostkowe,

ρ – gęstość masy [kg/m^3],

v – prędkość przepływu masy [m/s],

$v_i(\mathbf{t})$ – prędkość jednostkowa [m/s].

Pojęcia:

Blok obliczeniowy symulacji – wyodrębniony czasowo okres symulacji w modelu RMS

Licznik masy – ciąg impulsów zapisanych w formie zdarzeń dyskretnych informujących o czasie przejścia kolejnej, jednostkowej masy urobku w danym punkcie pomiarowym.

Wątki symulacyjne – realizowane w sposób niezależny symulacje mikroskopowe w modelu RMS

Współczynnik zmienności – klasyczna miara zróżnicowania rozkładu cechy, wynik odniesienia odchylenia standardowego do średniej arytmetycznej z próby

Wykres uporządkowany z skumulowaną wartością opisową – wykres tworzony w sposób zbliżony do tzw. wykresu skumulowanego przepływu, stosowanego w zakresie analizy procesów transportowych z użyciem teorii kolejek oraz dystrybuanty empirycznej (ang. *empirical Cumulative Distribution Function*, eCDF). Każdy obiekt w populacji statystycznej reprezentuje para wartości Y i X . W pierwszym kroku próby statystyczne zostają uporządkowane według wartości zmiennej Y i zostają w tej kolejności nanoszone na wykres. Wartość Y zostaje naniesiona bezpośrednio bez skumulowania. Położenie na osi poziomej wykresu, w odróżnieniu od dystrybuanty, nie zostaje zwiększane jednostkowo, lecz w sposób skumulowany z przyrostem wybranej wartości cechy X . Oznacza to, że długość linii wyznaczonej w kierunku poziomym, na wysokości wartości Y , opisuje udział cechy X w łącznej sumie cechy X w populacji pomiarów. Ta metoda ilustracji danych została uznana jako właściwa w celu wizualizacji obejmujących m.in. przenośniki taśmowe, których długość jednostkowa może stanowić wielokrotność innych przenośników.

Wyzwalacze – elementy warunkujące interakcje w modelu IMS

Znormalizowane wydobycie – wartość wydobywania (zmianowa lub dobową) odniesiona do wartości średniej wyliczonej dla obiektu dekretacji m.in. pola ścianowego lub kopalni.

1. Wprowadzenie

W dobie wzmoczonej presji na rzecz efektywnego wykorzystania zasobów w celu minimalizacji kosztów produkcji, logistyka stała się kluczowym czynnikiem mającym wpływ na sukces wielu przedsiębiorstw. W odniesieniu do górnictwa podziemnego realizacja procesów logistycznych, w tym głównie procesów transportu urobku oraz materiałów, począwszy od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, dostarcza nieustannie wielu problemów badawczych. Stanowi tym samym jeden z obszarów, wykazujących wysoki potencjał dalszego doskonalenia działalności operacyjnej. Niemniej, zważając na charakter i warunki prowadzenia eksploatacji podziemnej złóż, badania nad procesami transportowymi realizowane są w tym przypadku z pewnymi ograniczeniami. Przypuszczać można, że w najwyższym stopniu wynika to z warunków prowadzonej działalności górniczej, jak również z pragmatyzmu, który koncentruje uwagę na rozwiązaniach sprawdzonych i dopracowanych. Eliminacja ryzykownych eksperymentów i ingerencji w poprawnie funkcjonujący układ transportowy znajduje w tej sytuacji wielostronne uzasadnienie. Niewątpliwie jednak system transportowy kopalń wciąż ewoluuje, co obejmuje również przestrzenne i strukturalne komplikacje związane z ekspansją w kierunku głębiej zalegających złóż. Poza warunkami naturalnymi prowadzonej działalności górniczej, w intensywny sposób zmieniają się technologiczne aspekty realizacji procesów wydobywczych oraz transportowych, jak i ogólne wytyczne względem ich organizacji i przebiegu. Zdaniem autora obecne uwarunkowania techniczno-organizacyjne oraz rynkowe działalności górniczej wyznaczają tym samym nowe kierunki badań, uzasadniając dogłębną analizę procesów realizowanych pod ziemią, czemu dodatkowo sprzyja towarzyszący rozwój technologii cyfrowej.

Zmiany obserwowane w górnictwie w Polsce w ciągu ostatnich dwóch dekad trudno zwięźle i jednoznacznie scharakteryzować. Z pewnością z perspektywy techniczno-organizacyjnej zauważalny jest wzrost wykorzystania technologii strugowej w kopalniach węgla kamiennego, co pozwoliło uzyskać nieosiągalne wcześniej wydajności i koncentrację wydobywania. W obrębie kopalń rud metali w ślad za rozwiązaniami stosowanymi na powierzchni eksploatację rozpoczynają maszyny transportowe samojezdne z napędem elektrycznym, zasilane akumulatorowo. Coraz bardziej powszechne stają się wyposażenie kopalń w systemy identyfikacji i radiowej lokalizacji pracowników oraz maszyn transportowych. W niektórych kopalniach na stałe wprowadzony został transport pracowników na przenośnikach taśmowych, zabudowanych w ciągach odstawy urobku. Na szeroką skalę realizowane są programy poprawy energochłonności konstrukcji, jak i napędów przenośników taśmowych. Postępujący wraz ze szczytowaniem się zasobów naturalnych spadek miąższości pokładów węglowych oraz zawartość złóż metali, sprawiają natomiast, że kwestie zarządzania jakością urobku nabierają szczególnego znaczenia, co ma odzwierciedlenie między innymi w poszukiwaniu nowych możliwości eliminacji zanieczyszczenia urobku.

Jako kluczowy i nieodzowny czynnik sprzyjający realizacji tematyki niniejszej pracy należy postrzegać rosnącą ilość maszyn i urządzeń transportowych wyposażonych w aparaturę kontrolno-pomiarową. Pomimo iż tego typu rozwiązania, wykorzystujące technikę cyfrową, były obecne już wcześniej, to dopiero budowa szerokopasmowych, dołowych sieci teletransmisyjnych z użyciem techniki światłowodowej obserwowana w okresie ostatniej dekady, umożliwiła wymianę informacji z powierzchniowymi systemami akwizycji na niespotykaną dotąd skalę. Pozyskanie fragmentu tych danych w przeszłości celem opracowania modeli symulacyjnych, wymagałoby bowiem realizacji ogromnej ilości pomiarów manualnych, angażujących trudne do oszacowania zasoby ludzkie. Tego rodzaju doraźny wysiłek i tak nie przełożyłby się na zakres i jakość danych dostępnych dzisiaj natychmiastowo w systemach klasy technicznej, określanych również mianem tzw. technologicznych systemów operacyjnych (ang. *Operational Technology*, OT), stanowiących w kopalniach najczęściej

oprogramowanie klasy SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) lub dedykowane bazy danych procesowych. Wskutek tego, realizacja niniejszej pracy zakłada wprost wykorzystanie nowego i niebagatelnego źródła danych, a powyższe czynniki stanowią kluczową motywację podjęcia problematyki modelowania symulacyjnego i wielokryterialnej analizy procesów transportowych. Założone na wstępie szerokie wykorzystanie danych rejestrowanych zdalnie na etapie badań symulacyjnych wynika również z faktu, że skromna, lecz wymierna część prac koncepcyjnych związanych z realizacją systemów akwizycji, wymiany i przetwarzania danych pochodzących z maszyn i urządzeń transportowych stosowanych w górnictwie podziemnym realizowana była z udziałem autora. Realizacja prac takich jak m.in. (Kicki, i Polak 2018; Kicki, Dyczko, i Polak 2009; 2011b; 2011a) pozwoliła na sformułowanie własnego podejścia badawczego korespondującego z rzeczywistym zapotrzebowaniem informacyjnym oraz dostępnością danych niezbędnych w celach realizacji badań symulacyjnych, co ma bezpośrednie odzwierciedlenie w podjęciu tematyki pracy, jak i jej rezultatach.

Należy zauważyć, że zwiększona wymiana danych pomiędzy podziemną aparaturą kontrolno-pomiarową a systemami powierzchniowymi oddziaływać może w dwojaki sposób. Z jednej strony stanowiąc źródło cennych danych, lecz również umożliwiając zastosowanie nadrzędnego sterowania procesem transportowym m.in. z użyciem modeli symulacyjnych we względnie krótkim horyzoncie czasowym. W tym przypadku można mówić o zupełnie nowych, niegdyś nieosiągalnych, z przyczyn technicznych, możliwościach wsparcia decyzyjnego. Należy podkreślić, że przy obecnym stanie techniki uzyskanie podobnych rezultatów w zakresie kontroli operacyjnej w warunkach stacjonarnej działalności produkcyjnej na powierzchni nie stanowi aż tak uciążliwego problemu jak ma to miejsce w górnictwie podziemnym. Kontrola wizyjna oraz dostępne systemy rejestracji położenia wykorzystujące właściwości pasma fal elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości pozwalają obecnie na dokładną lokalizację obiektu – przykładowo samojezdnej maszyny transportowej w ograniczonej przestrzeni wewnątrz budynku z dokładnością do kilku centymetrów. W przypadku działalności realizowanej w otwartym terenie na dużym obszarze, podobnej funkcjonalności dostarcza technologia GPS (ang. *Global Positioning System*). W kontekście typowych zastosowań na powierzchni transport masy urobku w obrębie sieci rozległych podziemnych wyrobisk na przestrzeni kilkudziesięciu kilometrów stanowi odrębne zagadnienie badawcze. Skutkiem czego rozwiązania techniczne stosowane na powierzchni z uwagi na środowisko działalności znajdują tu ograniczone lub całkowity brak zastosowania. Ograniczona kontrola może być w tym przypadku realizowana za pośrednictwem istniejącej aparatury rejestrującej przebieg procesów transportowych w sposób mniej bezpośredni. Obejmuje tym samym dane dostarczane przez: elektroniczne moduły sterujące pracą maszyn, przekładniki prądowe zainstalowane w układzie zasilania maszyn górniczych i urządzeń transportowych, czujniki odległości oraz prędkości. Dołowe ciągi odstawy urobku rzadko wyposaża się w wagi tensometryczne, lidary i analizatory urobku. Należy jednak podkreślić, że pozyskiwane dane mają w większości charakter rozproszony, przeznaczone są do wsparcia realizacji zróżnicowanych celów zarządczych, a stosowana w tym celu aparatura kontrolno-pomiarowa tworzy często rozwiązania o charakterze „wyspowym”. Efektem czego całościowa analiza i ocena procesu transportowego nie jest wprost osiągalna bez opracowania wspólnej płaszczyzny, którą w domyśle może stanowić model symulacyjny.

Warunki realizacji procesu odstawy urobku w kopalni podziemnej są specyficzne również z uwagi na wysoką dynamikę zmian układu transportowego w następstwie przemieszczania punktów wydobywania wraz ze szczypaniem się złoża. Ograniczone gabaryty wyrobisk czy częste przebudowy ciągów odstawy urobku nie sprzyjają tu zastosowaniu wielu nowych rozwiązań technologicznych o charakterze stacjonarnym. Stan ten komplikuje regulację całego procesu za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej i systemów automatyzacji pracy obiektów oraz zadanie koordynacji pracy maszyn samojezdnych. Na wstępnym etapie analizy zagadnienia pozwala to sformułować ogólną opinię, w ramach której o procesach transportu urobku w kopalniach podziemnych można powiedzieć, że

formułują charakterystyczne zagadnienie badawcze. Stąd też realizację niniejszej pracy postanowiono rozpocząć od szczegółowego podsumowania stanu wiedzy poprzez przegląd piśmiennictwa poświęconego tematyce badań procesów transportowych urobku, realizowanych w kopalniach podziemnych. Wykonany przegląd został zamieszczony w rozdziale drugim. Przegląd wraz z podsumowaniem umożliwił ostateczne sformułowanie celu i tezy niniejszej pracy, które zawarto w podsumowaniu rozdziału.

Kwestią wielokrotnie poruszaną przez autora w niniejszej pracy jest podstawowa właściwość procesu transportowego urobku w kopalni podziemnej – niepewność odnośnie do jego przebiegu zarówno w najbliższej, jak i najbardziej odległej przyszłości. Zasadniczo, ograniczając się wyłącznie do otoczenia zewnętrznego, można zauważyć, że warunki rynkowe z jednej strony wymuszają na przedsiębiorstwach górniczych opracowanie sprawnego i efektywnego systemu odstawy urobku, a z drugiej strony stanowią dodatkowe, niekontrolowane źródło niepewności oddziaływujące na proces wydobywania, a więc i proces transportu urobku. Czynnikiem o stochastycznej naturze jest jednak zdecydowanie więcej i obejmują one niepożądane zdarzenia wynikające z niepewności w zakresie rozpoznania warunków naturalnych, jak i tych o charakterze eksploatacyjnym. Co istotne, cechują one zarówno proces urabiania i transportu kopaliny, jak i proces użytkowania i obsługi stosowanych w tym zakresie maszyn oraz urządzeń. Przebieg eksploatacji złóż powiązany jest bezpośrednio z warunkami geologiczno-górnictwymi, kwestiami organizacyjnymi i technicznymi, bądź też posiada indywidualny charakter będący wynikiem decyzji i zdarzeń mających miejsce w przeszłości. Wobec czego rzeczywisty przebieg procesu transportowego urobku staje się wypadkową wielu czynników, również takich, których związki przyczynowo – skutkowe nie są do końca rozpoznane. W tej sytuacji zadanie dostarczenia danych wejściowych do modeli symulacyjnych nie może zostać ograniczone wyłącznie do rezerwacji przestrzeni zmiennych na podstawie dalece uproszczonych założeń funkcjonalnych i modelowych przykładów dostępnych w literaturze poświęconej tematyce górniczej. Treść danych wejściowych do modelu, parametryzująca przebieg eksploatacji stosowanych maszyn i urządzeń oraz charakterystyki procesów transportowych powinny korespondować z pozyskanymi w konkretnych warunkach danymi empirycznymi. Znajdując tym samym bezpośrednie odzwierciedlenie w uprzednio przygotowanej przestrzeni logicznej, metodach obliczeniowych i procedurach przetwarzania danych, realizowanych przez zaproponowane w pracy modele analityczne i symulacyjne. W związku z tym, badaniu procesów transportowych realizowanych w kopalniach poświęcono w całości rozdział trzeci niniejszej pracy. W tym rozdziale zostały omówione wyszczególnione kwestie w celu dostarczenia ogólnej charakterystyki warunków oraz środków realizacji procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych, dla szerszego wprowadzenia do tematyki pracy.

Jak wcześniej zaznaczono, osiągnięcie celu praktycznego pracy poniekąd wymusza konieczność pozyskania i praktycznego wykorzystania szeregu danych pomiarowych zarejestrowanych w sposób zdalny. W wielu przypadkach oznacza to konieczność wczesnego zastosowania modeli analitycznych w celu właściwego odwzorowania i zrozumienia przebiegu procesów transportowych, który został częściowo zarejestrowany w postaci pomiarów. Przykłady tego rodzaju zastosowań znaleźć można w pracach (Kruczek i in. 2018; Stefaniak i in. 2019; Polak 2011). W tej sytuacji szersze wykorzystanie znaleźć mogą również sposoby przetwarzania i wizualizacji danych, opisane przez autora w pracach ukierunkowanych na ogólną ocenę efektywności pracy maszyn górniczych m.in. (Polak 2014). Należy zaznaczyć, że obszerna ilość danych źródłowych, których wyłącznie fragment został przedstawiony w rozdziale trzecim, jest domeną młodej oraz wciąż doskonalonej i rozwijanej metody badawczej, a mianowicie – symulacji komputerowej. W szczególności dotyczy to sytuacji, gdy model symulacyjny obejmuje działanie złożonych struktur funkcjonalnych, tak jak ma to miejsce w niniejszej pracy. Wprowadzeniu do tej tematyki badań symulacyjnych i problematyce budowy samych modeli symulacyjnych poświęcono rozdział czwarty, w którym skoncentrowano uwagę na zagadnieniu

odwzorowania ruchu masy urobku, jak i stosowanych w tym celu maszyn. W tym rozdziale przybliżono kwestie formułowania koncepcyjnego i algorytmizacji modeli symulacyjnych, opisano podstawowe podejścia obliczeniowe oraz stosowane w tym zakresie techniki modelowania procesów transportowych.

Pozostając w tematyce symulacji, należy zaznaczyć, że chęć głębszego poznania i szczegółowego odwzorowania przebiegu procesów towarzyszących produkcji to działanie aktualne i powszechne, dotyczące wielu gałęzi produkcji przemysłowej. Podobnie jak ma to miejsce w górnictwie, działania w tym zakresie systematycznie zyskują na znaczeniu wraz z upowszechnieniem systemów mikroprocesorowych. Rosnąca dostępność danych zgodnie z zarysem tzw. czwartej rewolucji przemysłowej ugruntowała koncepcję tzw. cyfrowego bliźniaka – cybernetycznego konstrukt, realizującego funkcje wsparcia decyzyjnego, wykorzystującego dane procesowe podlegające rejestracji w sposób zdalny (Hermann, Pentek, i Otto 2016). Koncentrując uwagę na aplikacyjnym charakterze pracy, należy się spodziewać, że analogicznie jak ma to obecnie miejsce w przypadku technik tzw. rozszerzonej rzeczywistości, opracowane w pracy modele symulacyjne mogą posiadać wiele zastosowań, które można opisać poprzez potencjalne scenariusze ich użycia. Idąc krok dalej, można także przewidywać, że ich praktyczna użyteczność i stosowność w głównej mierze podyktowana będzie liczbą kryteriów analitycznych, jak i właściwościami funkcjonalnymi konkretnego modelu. W tej sytuacji modele wspierające analizy wielokryterialne z definicji zyskują na znaczeniu, pomimo że ich opracowanie potencjalnie wykazywać będzie spodziewanie wyższy stopień trudności. W rezultacie niniejszych rozważań w pracy skoncentrowano uwagę na opracowaniu modeli symulacyjnych uwzględniających wiele kryteriów analitycznych procesu transportowego. Zrezygnowano przy tym z opracowania pojedynczego, uniwersalnego rozwiązania, na rzecz co najmniej dwóch modeli symulacyjnych. Uzasadnić to można oczekiwaniem, że w wielu aspektach analizy wielokryterialnej wymagane będzie uzyskanie wzajemnego uzupełnienia funkcjonalnego. Szczegółową charakterystykę opracowanych modeli symulacyjnych zawarto w treści rozdziału piątego, gdzie, oprócz założeń, opisano szczegółowo metody ich działania oraz kluczowe z perspektywy tematu pracy cechy funkcjonalne.

Należy zaznaczyć, że obecnie w większości spółek górniczych prowadzących podziemną eksploatację w Polsce planowanie kierunków rozwoju, doboru technologii i doskonalenia posiadanych układów transportowych nie stanowi systematycznych działań realizowanych z użyciem innych metod niż uproszczone obliczenia, na ogół obejmujące plan obciążenia maszyn i urządzeń. Ewentualne symulacje procesów transportowych wykonywane są wyłącznie jako działania reaktywne, tj. w ujęciu post factum w momencie stwierdzenia niepokojącego zdarzenia lub też negatywnego zjawiska, ograniczającego zdolności wydobywcze kopalni. Zatem kluczowe decyzje absorbujące spore środki inwestycyjne i nakreślające przyszłe kanwy funkcjonowania układu transportowego, podejmowane są bez użycia dedykowanych narzędzi wsparcia. Tym samym bez dostępu do informacji opisującej długofalowe skutki wdrożenia różnych scenariuszy realizacji procesu transportowego. Stan ten wynika w głównej mierze z faktu, że w warunkach ruchowych zakładu górniczego na ogół priorytetowo traktowane są działania związane z nadążnym planowaniem technicznych środków, umożliwiających realizację nieodległych w czasie założeń produkcyjnych. Ma to związek z dynamicznym charakterem działalności górniczej, który wymusza ciągle zmiany układu odstawy urobku. Obejmuje to zarówno budowę, jak i likwidację tras odstawy urobku, jak również wymaganą przebudowę istniejącego układu z uwzględnieniem bieżących potrzeb w zakresie użytkowania i obsługi maszyn oraz obiektów realizujących proces transportowy. Zorientowanie w tej dynamicznej przestrzeni modelu symulacyjnego nie jest proste, wymaga bowiem zrównoważenia organizacyjnego „ciężaru” jego utrzymania i uwzględnienia ogólnych warunków niepewności co do wieloletniego przebiegu eksploatacji złoża. Należy zauważyć, że zastosowanie długofalowego horyzontu analizy procesu

transportowego przekraczającego okres kilku najbliższych lat eksploatacji kopalni, chociaż jest korzystne, w opisanych warunkach nastręcza wiele trudności w realizacji, przez co nie jest w praktyce wykorzystywane. Sam proces systematycznego i ciągłego planowania rozwoju układu transportowego bez dedykowanych narzędzi jest wysoce złożony i pracochłonny. Stąd też, jako mniej pilne – niestanowiące wprost zagrożenia dla realizacji planów produkcyjnych, postrzegane są działania związane z racjonalizacją procesu transportu w obrębie funkcjonującego systemu, które mają charakter długo- i średniofalowy. Dotyczy to decyzji podejmowanych w obrębie oddziałów mechanicznych, jak i systematycznego doskonalenia procesu transportowego, poprzez kształtowanie ogólnych wytycznych dla kierowców wozów, dyspozytorów kopalnianych, definiowania nastaw układów regulujących przepływ strugi urobku. W tym miejscu należy zadać pytanie, czy jest to stan należyty, a w szczególności, czy istnieje możliwość uzasadnionego biznesowo wdrożenia, utrzymania i wykorzystania nowych narzędzi wsparcia decyzyjnego.

Opisane uprzednio kwestie problematyczne uświadamiają holistyczny stan zagadnienia. Efektywność realizacji procesu transportowego może być rozpatrywana jako złożenie wielu płaszczyzn racjonalizacji. W ocenie autora sytuacja ta uzasadnia opracowanie i włączenie w cykl zarządzania transportem urobku kompleksowych narzędzi wsparcia decyzyjnego – korzystających z modeli symulacyjnych. Jednak działanie jakichkolwiek modeli symulacyjnych zastosowanych w tym zakresie stanowić powinno odpowiedź na rzeczywiste zapotrzebowanie w zakresie wsparcia procesów zarządczych. Tu też należy się odwołać do kwestii pracochłonności badań symulacyjnych. Samo użycie modeli symulacyjnych nie może być postrzegane jako panaceum na problemy w zakresie zarządzania procesem transportu urobku. Właściwa budowa i wybór modeli symulacyjnych, szeroko rozumiane kwestie użytkowe muszą co najmniej zrównoważyć koszt poniesiony w związku z ich opracowaniem, rozwojem i utrzymaniem w przestrzeni informacyjnej przedsiębiorstwa. W aspekcie trudności związanych z opracowaniem i utrzymaniem aktualności modeli symulacyjnych, przypuszczać można, że istnienie zróżnicowanych zastosowań skojarzonych modeli symulacyjnych, umożliwić może w praktyce wielokrotne wykorzystanie niezbędnej do ich działania struktury informacyjnej. Zastosowanie wielu płaszczyzn analitycznych, tym samym stanowić może o zapewnieniu optymalnych warunków użytkowych. Wymaga to jednak kompleksowo zaprojektowanej architektury informacyjnej, korespondującej bezpośrednio z przestrzenią funkcjonalną modeli. Formułuje to szerokie wymagania względem funkcjonalności oraz precyzji stosowanego w tym celu narzędzia badawczego. Konstrukcja docelowych modeli symulacyjnych, musi równoważyć potrzeby, umożliwiając realizację zróżnicowanych zadań racjonalizatorskich i projektowych, w tym również tych o dużym stopniu skomplikowania. Niniejszym realizacja tematu pracy nie może zostać przeprowadzona w oderwaniu od wymagań obejmujących zakres zarządzania procesem transportowym sformułowanych przez kopalnię. Powołane kwestie organizacyjne normują zapisy ujęte w zakresie obowiązków poszczególnych działów kopalni lub departamentów powołanych w obrębie Biura Zarządu Spółki, które zostały opisane bardziej szczegółowo w rozdziale 6.

Zagadnienia analizy i optymalizacji procesów transportu urobku nie można podejmować zupełnie oddzielnie, pomijając inne, kluczowe procesy realizowane w kopalni. Tematyka analizy procesów transportowych wiąże się nierozdzielnie z kwestiami modelowania geologicznego, planowaniem i projektowaniem procesu wydobycia kopaliny, eksploatacją obiektów technicznych, organizacją pracy maszyn i ich obsługi. Przedmiotowa analiza wyników uzyskanych z modeli symulacyjnych powinna tworzyć w rezultacie kompleksową przestrzeń wsparcia procesów zarządzania transportem urobku, w pewnym stopniu polaryzującą wymagania i przepływy informacyjne w obrębie istniejącego i planowanego systemu logistyki wewnętrznej kopalni. Przy czym docelowa analiza prowadzona może być zarówno w krótkim, jak i długim horyzoncie czasowym, a jeśli jest to uzasadnione, również uwzględniając pełen cykl życiowy kopalni i potencjalne scenariusze jej rozwoju oraz likwidacji opisane

dynamicznym modelem. W ujęciu syntetycznym, podejmując tematykę wielokryterialnej analizy procesów transportowych urobku zgodnie z tzw. cyklem PDCA (ang. *Plan Do Check Act*) lub pokrewnym podejściem opisanym m.in. przez prof. Lisowskiego (Lisowski 2015), należałoby mówić o zintegrowanym i systemowym ujmowaniu istniejących lub planowanych ciągów transportowych, ruchu maszyn, urządzeń oraz samego urobku w funkcji planowania, organizowania, sterowania i kontrolowania procesu odstawy urobku. W ocenie autora wielokryterialna analiza procesów transportowych, realizowana jako wsparcie działań planistycznych, powinna mieć charakter systematyczny, prowadząc od jednej decyzji do kolejnej, czemu towarzyszyć powinno rozbudowywanie i aktualizacja modelu symulacyjnego. Tego rodzaju podejście, przyjęte jako najbardziej uzasadnione i wiodące w niniejszej pracy, zważywszy na potrzebę utrzymania i praktycznego wykorzystania modeli symulacyjnych. Nie oznacza to jednak całkowitego wykluczenia fragmentarycznych lub generalizujących badań symulacyjnych, które jak opisano w dalszej części pracy, mogą pełnić funkcję uzupełniającą w procesie poznawczym. Nowa wiedza pozyskana w trakcie badań symulacyjnych może posłużyć do rozwiązania wielu różnorodnych problemów w obrębie mniej lub bardziej kompleksowych struktur oraz cech funkcjonalnych ciągu transportowego, uwzględniając przy tym zarówno przeszłe, aktualne jak i przyszłe warunki realizacji procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych.

Na wstępnym etapie prac pozwala to wytypować cztery inicjalne kierunki realizacji analiz wielokryterialnych, wykonywanych z użyciem modeli symulacyjnych:

- zapewnienie bieżącej kontroli nad przebiegiem procesów transportu urobku, celem szybkiej i trafnej identyfikacji stanu obecnego, zagrożeń ciągłości procesu lub eliminacji przyczyn strat efektywności (tzw. wąskich gardeł);
- umożliwienie ciągłego doskonalenia operacyjnych metod działania związanych z transportem urobku, mając na uwadze maksymalnie efektywne i logiczne wykorzystanie zdolności transportowych w funkcji kosztów;
- systematyczne wsparcie zadań planistycznych związanych m.in. z przebudową lub rozbudową układów transportowych, w kontekście obecnych, jak i spodziewanych w przyszłości warunków działania;
- optymalizację istniejących układów transportowych, w tym m.in. redukcję długości dróg transportowych i uproszczenie struktury systemu, planowanie obciążeń kluczowych węzłów i urządzeń, weryfikację parametrów techniczno-ruchowych maszyn i urządzeń transportowych, planowanie zbiorników retencyjnych, właściwą regulację i koordynację procesu transportowego (m.in. z perspektywy efektywności energetycznej).

Zaproponowany podział nie jest rozstrzygający, zastępczo można wyszczególnić bardziej złożone grupy działań związanych stricte z przestrzenną i funkcjonalną lokalizacją obiektów, takie jak wyznaczanie przebiegu wyrobisk transportowych, lokalizacja miejsc obsługowych maszyn samojezdnych, punktów retencji urobku. Podobnie wskazać można zadania obejmujące wyłącznie przydział zasobów technicznych, takie jak dobór ilościowy maszyn i urządzeń niezbędnych w celu realizacji procesu transportowego lub też konfigurację ich parametrów techniczno-ruchowych. W innym ujęciu, działanie modeli może obejmować wyłącznie doskonalenie metod organizacji pracy zasobów transportowych lub w ujęciu holistycznym, sprawowanie nadrzędnej kontroli nad przebiegiem procesu transportowego. Należy tutaj wyraźnie zaznaczyć, że wymienione zastosowania wymagają zróżnicowanych konfiguracji modelu lub modeli symulacyjnych użytych w dedykowanym danemu celowi środowisku analitycznym. Wymienione zastosowania różnią się przede wszystkim: czasową, przestrzenną i funkcjonalną precyzją odwzorowywanego procesu w modelu lub ilością i rodzajem danych wejściowych oraz zmiennych sterujących. Co więcej, modele symulacyjne będą przydatne w celu rozwiązania zadań o różnym stopniu szczegółowości. Zdolność uogólnienia – pożądana w pewnych

warunkach, m.in. podczas badań w warunkach wysokiej niepewności, może stanowić wadę w zastosowaniu wymagającym precyzyjnego odwzorowania stanu procesu w przestrzeni i czasie. Pozwala to wyróżnić zadania o charakterze względnie uniwersalnym takie jak opracowanie zasad organizacji współpracy maszyn samojezdnych lub ogólnych wytycznych w zakresie projektowania ciągów transportowych, ale także zadania bardzo precyzyjne. Jako przykład wskazać można oszacowanie korzyści związanych z modernizacją istniejących ciągów odstawy urobku, jak też implementację modeli symulacyjnych w operacyjnym sterowaniu procesem transportowym z użyciem przesuwnego horyzontu (ang. *Receding Horizon Control*, RHC).

Jak wynika z powyższego wprowadzenia do zagadnienia, można domniemywać, że kwestie praktycznego zastosowania badań symulacyjnych powinny uzyskać bezpośrednie odzwierciedlenie w konstrukcji samych modeli, w szczególności rozpatrując konieczność osiągnięcia aplikacyjnej wartości pracy. W rozdziale szóstym opisującym docelowe scenariusze badań i analiz wielokryterialnych, podjęto w efekcie próbę systematyzacji i uogólnienia zastosowań praktycznych z podziałem podyktowanym przez docelowy sposób użycia opracowanych modeli symulacyjnych.

Zagadnieniom kompleksowej oceny procesów transportowych towarzyszy pewna dodatkowa trudność. Wynika ona bezpośrednio z faktu, że tematyka ta w sposób nierozzerwalny łączy się z aspektami eksploatacyjnymi stosowanych rozwiązań technicznych. Stąd też analizie procesu transportu urobku wykonywanej w warunkach rzeczywistych towarzyszą na ogół działania z obszaru optymalizacji gospodarki majątkiem produkcyjnym, wśród których wymienić można główne kierunki obejmujące:

- racjonalizację i stabilizację planów zakupu i wymian maszyn oraz urządzeń,
- ujednocianie stosowanych rozwiązań,
- doskonalenie budowy maszyn, reguł ich doboru do warunków naturalnych i zadań produkcyjnych,
- zmniejszenie rezerw w środkach produkcji i materiałach,
- zwiększenie efektywności wykorzystania maszyn,
- zapewnienie jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa,
- racjonalizację przebiegu użytkowania maszyny w czasie,
- utrzymanie odpowiedniej kultury obsługi i użytkowania wyposażenia (w szczególności wykorzystania maszyn zgodnie z przeznaczeniem i w obrębie dopuszczalnych parametrów pracy).

Tym samym, należy zwrócić uwagę, że optymalny przebieg procesów transportowych w licznych przypadkach może być z powodzeniem utożsamiany z optymalnym przebiegiem cyklu życiowego maszyny lub urządzenia transportowego. Stąd też pewne długookresowe eksperymenty symulacyjne mogą koncentrować uwagę na horyzoncie czasowym obejmującym cykl życia obiektu uwzględniając elementy polityki gospodarki środkami transportowymi od etapu: specyfikacji potrzeb, projektowania, zakupu wyposażenia, jego montażu i rozruchu, poprzez użytkowanie i obsługę aż do likwidacji. W takim przypadku, uzasadniony horyzont obserwacji modelu może wynosić w przybliżeniu 5 do 8 lat dla ładowarki przodkowej lub 50 lat lub więcej w przypadku rozpatrywanej budowy zbiornika retencyjnego urobku. Prace poświęcone zagadnieniu modelowania i optymalizacji obsługi obiektów technicznych, których przegląd został dokonany w artykule (Alrabghi i Tiwari 2015) przemawia wprost za podejściem obejmującym pełny cykl życia. W kopalni podziemnej racjonalizacja zarządzania majątkiem produkcyjnym nabiera szerszego znaczenia zważywszy na dynamikę zmian układu dróg transportowych wynikającą z harmonogramu wydobywania kopaliny. Nieciągłość procesu wydobywczego skutkuje w praktyce czasowym wyłączeniem części odcinków dróg transportowych z ruchu, wymaganymi przebudowaniami tychże dróg, zmianą obciążenia, a w rezultacie wymagań odnośnie do zdolności transportowych. Odpowiednia synchronizacja zapotrzebowania na środki realizacji procesu

transportowego oraz cyklu życiowego obiektów technicznych tworzy jedną z wielu płaszczyzn potencjalnej optymalizacji. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w wielowariantowym scenariuszu wykonanym na potrzeby walidacji działania modeli, zawartym w rozdziale siódmym poświęconym walidacji opracowanych rozwiązań. W tym rozdziale, bazując na danych charakteryzujących przebieg procesów transportowych w kopalni podziemnej w funkcji czasu, przeprowadzono walidację zaproponowanego zestawu modeli w celu określenia, czy symulacja dynamiczna oraz związane z nią dane wyjściowe są właściwymi reprezentacjami procesów transportowych z punktu widzenia zamierzonych wcześniej zastosowań.

W generalnym ujęciu zagadnienie analizy wielokryterialnej procesów transportowych może być realizowane z perspektywy kluczowych wskaźników opisujących działanie obiektów transportowych, takich jak m.in. miary ich efektywności i niezawodności. Powyższe wskaźniki wydają się mieć główne odzwierciedlenie w jednostkowych kosztach produkcji, toteż miary te można zastąpić odpowiednią wyceną kosztów procesu tak jak zostało to zrealizowane na przykładzie kompleksu ścianowego w publikacji autora (Polak 2015). Jednocześnie bezsprzeczna przewaga wykorzystania modeli symulacyjnych nad analitycznymi wynikać może z perspektywy ich zastosowania nie tylko w zakresie oceny kosztów procesu, lecz wyceny wartości uzyskiwanego produktu końcowego. Szeroko rozumiana jakość urobku, pomijając kwestie organizacyjno-technologiczne powiązane z harmonogramem i sposobem urabiania kopaliny, zależna jest od procesów transportowych realizowanych przed wydobyciem na powierzchnię. Modele symulacyjne procesów odstawy urobku mogą w tym zakresie z powodzeniem realizować funkcje numerycznego śledzenia przepływu masy urobku o zdefiniowanych w modelu lub zmierzonych w rzeczywistości parametrach charakterystycznych dla jego źródła. W dalszej perspektywie pozwala to na identyfikację przepływu masowego o zadanym profilu jakościowym z uwzględnieniem procesu retencji, separacji lub mieszania masy urobku, które to mogą stanowić płaszczyznę realizacji algorytmów zaawansowanego sterowania (APC, ang. *Advanced Proces Control*).

Argumenty przytoczone we wprowadzeniu do tematyki pracy pozwalają przypuszczać, że wielokryterialna analiza przebiegu procesów transportowych z wykorzystaniem modeli symulacyjnych jest dzisiaj zarówno bardziej osiągalna, jak i uzasadniona. Podstawową kwestię niniejszej pracy stanowi jednak opracowanie w pełni funkcjonalnych modeli, które korespondować powinny z zastosowaniami praktycznymi – dostarczając tym samym możliwość wielokryterialnej analizy procesu transportu urobku. Zasadność jak najszerszego wykorzystania dostępnych danych źródłowych, także potrzeba zróżnicowania docelowych scenariuszy użytkowych modeli symulacyjnych, muszą znaleźć odzworowanie w ich funkcjonalności, co stanowi główny punkt ciężaru niniejszej pracy. Jak starano się dowieść osiągnięcie tego celu przy istniejących uwarunkowaniach, jest zadaniem złożonym.

Realizacja tematu pracy rozpoczęto usystematyzowaniem stanu wiedzy z szczególnym uwzględnieniem doświadczeniach kopalń prowadzących eksploatację podziemną w Polsce. Zadanie to wykonano w następnym rozdziale, dokonując przeglądu literatury oraz w dalszej części pracy, zamieszczając liczne interpretacje danych pomiarowych.

2. Teza, cel i zakres pracy na tle stanu wiedzy

W niniejszym rozdziale podjęto się podsumowania stanu wiedzy w obrębie tematyki analizy procesów transportowych realizowanych w kopalniach podziemnych. Działanie to zakończono sformułowaniem tezy, celu i zakresu niniejszej pracy.

2.1. Przegląd zastosowań modeli symulacyjnych w analizie procesów transportu urobku w górnictwie

Literaturę dotyczącą zastosowania symulacji w analizie procesów transportu urobku ramowo podzielono na zastosowania w górnictwie odkrywkowym i podziemnym. W rozdziale tym, ujęto zdecydowaną większość pozycji literaturowych, które dotyczyły górnictwa podziemnego oraz nieliczne pozycje opisujące górnictwo odkrywkowe oraz inne branże produkcyjne.

Wykonany w dalszej części rozdziału przegląd literatury z powodu braku zdecydowanych przesłanek w tym zakresie, podzielono na uporządkowane chronologicznie okresy publikacji i podsumowano zgodnie z cechami modeli w formie tabelarycznej. Zachowanie porządku chronologicznego pozwoliło na zastosowanie umownego podziału na etapy rozwoju metod symulacyjnych procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych na przestrzeni ostatnich 50 lat. Dotyczy to w szczególności rodzaju wykorzystanych narzędzi oraz zmian w podejściu w zakresie odwzorowania i celu symulacji procesu transportowego. W efekcie wyodrębniono cztery etapy rozwoju badań symulacyjnych procesów transportu urobku w kopalniach podziemnych:

- Etap I. Wczesne modele symulacyjne (okres 1969 do 1995 roku).
- Etap II. Rozwój środowisk symulacyjnych (okres od 1996 do 2005 roku).
- Etap III. Upowszechnienie badań symulacyjnych (okres od 2006 do 2012 roku).
- Etap IV. Badania symulacyjne jako integralny element zarządzania procesem transportem urobku (okres od 2013 do dzisiaj).

2.1.1. Przedmiotowa klasyfikacja piśmiennictwa

Na wstępie należy nadmienić, że pomimo iż symulacja procesów transportu urobku w kopalniach odkrywkowych nie stanowi przedmiotu niniejszej pracy, z uwagi na ich przeważającą liczebność, dobrze udokumentowane metody analityczne (Burt i Caccetta 2018) oraz zakres prowadzonych badań na powierzchni, ich co najmniej częściowe wykorzystanie na zasadzie podobieństwa w realizacji procesów odstawy urobku wozami i przenośnikami wydaje się uzasadnione.

Analogicznie można dokonać podziału na pozycje literaturowe dotyczące stricte analizy procesów odstawy maszynami samojezdnymi, kolejkami górnictwymi, przenośnikami taśmowymi, jak i te traktujące proces transportowy w sposób kompleksowo uwzględniający zastosowanie mieszanych rozwiązań technicznych. Wykonując klasyfikację rozwiązań, wstępnie wyróżnić zatem można przypadki dotyczące transportu ciągłego (m.in.: przenośniki zgrzeblowe, przenośniki taśmowe, zbiorniki retencyjne, hydrotransport) lub cyklicznego (m.in.: maszyny samojezdne, wyciągi szybkie, transport kolejną, transport linowy, transport spycharkami), jak również przypadki mieszane.

Inną kategorią podziałową – potencjalnie ważną z punktu widzenia budowy modeli symulacyjnych – jest mobilność środków realizacji procesu, z rozróżnieniem obiektów zabudowanych stacjonarnie oraz ruchomych, w tym również maszyn samojezdnych – których ścieżki ruchu ograniczają wyłącznie gabaryty, pochylenie i stan spągu wyrobiska. W wielu przypadkach elementy ruchome takie jak m.in. naczynie skipowe podobnie jak zgrzebła przenośnika, modelowane być mogą z powodzeniem jako obiekt stacjonarny o działaniu ciągłym. Można zatem przyjąć, że określenie którą maszynę, urządzenie lub podzespół traktujemy jako funkcjonalny obiekt transportowy a które elementy nie znajdują bezpośredniego odwzorowania w modelu – zależy w głównej mierze od celu badań symulacyjnych. Podział ten można traktować jako umowny i zasadny wyłącznie względem obiektów których drogi i kierunki przemieszczania stanowią istotne zagadnienie decyzyjne ujęte w pracy. Ma to miejsce głównie w odniesieniu do górniczych wozów samojezdnych stosowanych w odstawie urobku lub pociągów kopalnianych funkcjonujących w rozbudowanym układzie tras kolejowych, których ruch opisać można mniej lub bardziej złożonymi regułami decyzyjnymi. Zasady te, mogą zostać opisane w postaci złożonych drzew decyzyjnych sporządzonych na podstawie zbioru zarejestrowanych danych lub też z użyciem metod eksploracji procesów (ang. *Process Mining*), bazujących na dziennikach zdarzeń dyskretnych. Obszerność tego zagadnienia sprawia jednak że stanowić może osobne zadanie badawcze.

Tabela 2.1. Wstępne kryteria podziału publikacji związanych z tematyką pracy (opracowanie własne).

Kategoria podziału	Wyszczególnienie
Rodzaj eksploatacji	Odkrywkowy, podziemny.
System eksploatacji	System ubierkowo-zabierkowy (ang. <i>cut and fill</i>), system ścianowy (ang. <i>longwall</i>), system podpiętrowy (ang. <i>sub level caving</i>), systemy z urabianiem poprzez zwiercanie pokładu, system komorowo filarowy, system blokowy z wypuszczeniem urobku przez leje wysypowe (ang. <i>system block caving</i>).
Mobilność obiektów transportowych	Pełna, ograniczona, brak.
Rodzaj procesu	Ciągły, cykliczny, mieszany.
Zastosowane podejście badawcze	Symulacja dyskretna, symulacja ciągła, optymalizacja parametryczna, model analityczny
Cel badań	Dobór parametrów fizycznych i ocena oddziaływania na obiekty techniczne, ocena niezawodności procesu, ocena stopnia wykorzystania majątku, ocena produktywności majątku, ocena efektywności procesu, maksymalizacja wydobywania (przez eliminację wąskich gardeł), śledzenie parametrów urobku, szacunek kosztów procesu, wsparcie sterowania procesem.
Zakres czasowy badań	Ocena sytuacyjna, ocena z tzw. ruchomym horyzontem.
Sposób dostarczania danych wejściowych do modelu	Ocena ekspercka, wyniki modeli optymalizacyjnych, rzeczywiste dane pomiarowe w postaci rozkładów, testy wrażliwości.
Użyte oprogramowanie	Język ogólnego przeznaczenia, biblioteki lub środowiska symulacyjne ogólnego zastosowania, dedykowane górnictwu narzędzia symulacyjne.

Należy zaznaczyć, że wielu przypadkach treść publikacji nie pozwoliła jednoznacznie na jej przypisanie do kategorii wyszczególnionych w tabeli 2.1, co stanowiło jeden z argumentów przemawiających za wprowadzeniem podziału chronologicznego. W dużym stopniu zależy to od uwagi jaką autor pracy postanowił poświęcić opisowi użytego modelu.

Literatura zastosowań metod analitycznych, symulacyjnych i optymalizacyjnych poza nielicznymi publikacjami obejmującymi stricte wielokryterialną analizę procesów transportu, pozwala wyróżnić publikacje, które koncentrują uwagę na bardzo szczegółowych problemach badawczych dotyczących

wybranych obiektów lub związanych z konkretnym systemem eksploatacji ewentualnie środkami transportu. Dotyczy to w szczególności modelowania: zbiorników, przesypów, spiętrzenia urobku na przenośniku zgrzeblowym lub stanów nieustalonych w przenośnikach taśmowych. Dokonany przegląd literatury pozwala na dokonanie syntetycznego podziału wszystkich zastosowań symulacji w analizie procesów transportowych urobku na:

- symulację procesów transportu urobku w obrębie konkretnych maszyn i urządzeń stosowanych w górnictwie podziemnym, w tym m.in.:
 - symulację stanów dynamicznych (w tym nieustalonych) urządzeń transportowych,
 - symulację elementarnego ruchu urobku, najczęściej z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych – DEM (*ang. Discrete Element Method*)
- symulację procesów transportowych w obrębie kompleksowych, górniczych systemów odstawy urobku:
 - racjonalizację przebiegu tras i struktury systemu obejmująca dobór środków transportowych lub ich parametrów techniczno-ruchowych,
 - operacyjne zarządzanie posiadanym parkiem samojezdnych maszyn transportowych – przykładowo zasady alokacji, przydzielania zadań i współpracy wozów samojezdnych,
 - badania ogólnej dynamiki procesów transportowych w obrębie ciągłych, cyklicznych lub mieszanych systemów transportowych w celu wyznaczenia warunków skutkujących przekroczeniem przyjętych wartości krytycznych.

W dalszej części przeglądu literatury omówiono wybrane pozycje literaturowe, związane z tematyką niniejszej pracy ze wskazaniem na zastosowania modeli symulacyjnych w analizie procesów transportu urobku w obrębie kompleksowych, górniczych systemów lub ich fragmentów.

2.1.2. Wczesne modele symulacyjne

Pierwsze modele symulacyjne procesów transportu urobku w kopalniach podziemnych sformułowane zostały w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX-wieku. Należy zaznaczyć, że właśnie w okresie tym opracowane zostały koncepcje modelowania zorientowanego obiektowo, modelowania procesów oraz symulacji procesów dyskretnych, które mają swoje następstwo w pojawieniu się języków takich jak: GPSS, SIMSCRIPT, SIMULA, GASP (1968-1969) oraz SLAM (1978). Bardziej szczegółowy przegląd rozwoju podejść w zakresie symulacji znaleźć można w pracy (Roberts i Pegden 2017).

Jedną z pierwszych publikacji poświęconych tematyce symulacji komputerowej procesów transportu urobku w warunkach podziemnego zakładu górniczego, jest publikacja (Firganek i Pszczółka 1969). W pracy tej dla potrzeb optymalizacji procesów transportu urobku opracowano algorytm pozwalający na wykonanie symulacji działania: punktów załadunku urobku w przodkach ścianowych, kolei kopalnianej, punktów załadunkowych i magazynowania urobku, górniczych wyciągów wydobywczych. Autorzy publikacji krytycznie odnoszą się do zastosowania uproszczonych metod analitycznych w celach optymalizacji procesu transportowego argumentując to istotną, silnie stochastyczną naturą przebiegu procesów transportowych oraz ograniczoną dokładnością wynikającą z stosowanych uproszczeń. Podkreślają jednocześnie, że jednym z warunków prawidłowego funkcjonowania systemu transportowego kopalni jest właściwe zaprojektowanie i zdolność dostosowania do zmian, które mogą być skutecznie wspomagane przez użycie metod symulacyjnych. Algorytm symulacji transportu kopalnianego opracowano w Ośrodku Naukowo-Badawczym d.s.

Mechaniki i Cybernetyki Górniczej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach, jego budowę oparto na zasadzie „event sequencing” w systemie zdarzeń dyskretnych. Obliczenia wykonano na komputerze Mińsk-22. Autorzy wyszczególniają następujące podprogramy symulacji:

- modelowanie spływu urobku z przodków,
- symulacja przejazdu pociągów na trasie podszybie — stacje załadowcze — podszybie,
- symulacja załadunku wozów na stacjach załadowczych i magazynowania urobku w zbiornikach oddziałowych,
- symulacja przetaczania i opróżniania składów w podszybiu,
- modelowanie pracy szybu wydobywczego oraz magazynowania urobku w zbiorniku przyszybowym,
- dysponowanie ruchem pociągów.

Interesującym elementem badań było odwzorowanie spływu urobku z przodków, na podstawie 26 punktów pomiarowych na stacjach załadowczych oraz statystycznej analizy pomiarów, autorzy opisali ją zależnością funkcyjną, dzieląc czas zmiany produkcyjnej na określoną liczbę interwałów:

$$\Omega_i = \alpha_i + \beta_i W_{i-1} + X\delta(\varpi_i) \sqrt{i - \gamma_i^2} \quad 2.1$$

gdzie:

- Ω_i - przyrost produkcji w interwale czasu,
- i - numer interwału czasowego,
- α_i, β_i - współczynniki regresji liniowej pomiędzy zmiennymi losowymi,
- γ_i - współczynnik korelacji,
- ϖ_i - średni przyrost produkcji,
- W_i - wydobywanie średnie,
- W_{i-1} - wielkość wydobywania na początku interwału i ,
- X - zmienna losowa o rozkładzie normalnym $N(0, 1)$,
- δ - odchylenie standardowe.

Opracowany przez autorów model symulacyjny pozwalał na określenie wielkości zbiorników, długości dworca wozów próżnych na podszybiu oraz stopnia wykorzystania lokomotyw. Dodatkowo model uwzględniał zasady dysponowania ruchem pociągów kolei kopalnianej oraz niezawodnościowych wskaźniki dla szybu wydobywczego. Autorzy publikacji w swoich badaniach nad opracowaniem modelu korzystali z pracy (Achtstien i Stine 1964), będącej pierwszym odnotowanym w niniejszym przeglądzie wykorzystaniem metod symulacji komputerowej w zakresie analizy procesów transportowych w górnictwie. Publikacja ta została zamieszczona zaledwie 15 lat po publikacji współautorstwa profesora Stanisława Ulama opisującej po raz pierwszy metodę Monte Carlo.

Kolejną odnotowaną w przeglądzie pozycją, jest artykuł traktujący o podziemnej kopalni rud złota (Touwen i Joughin 1972). Autorzy publikacji motywują użycie metod symulacyjnych tym, iż problemy natury organizacyjnej występujące w kopalni podziemnej, w szczególności obejmujące dobór wyposażenia technicznego oraz całościowy model kopalni wraz z harmonogramowaniem wydobywania stanowią kwestie tak szerokie i kompleksowe, że stosowane metody programowania liniowego lub teorii kolejek są użyteczne wyłącznie w ograniczonych przypadkach. Użyty model obejmował ciąg produkcyjny wyróżniając subsystem załadunku i transportu urobku, który technicznie odwzorowany był sekwencją zdarzeń. Główna pętla repetycyjna symulacji obejmowała również prawdopodobieństwo wejścia w stan awaryjny. Jako dane źródłowe do przygotowania symulacji wykorzystano charakterystyki pozyskane poprzez obserwację rzeczywistych wskaźników czasowych i

wydajnościowych. Struktura użytego modelu przypominała przetwarzanie potokowe w którym każda rozpoczęta operacja została odnotowana poprzez odpowiedni zapis w zdefiniowanym kalendarzu zdarzeń. Dotyczyło to między innymi czynności takich jak: wykonanie odwiertu, załadunek materiałów wybuchowych, strzelanie, czyszczenie i wybieranie przodka. Model dotyczył ok. 150 zmiennych wejściowych. Realizacja wymagała budowy „banku danych” obejmującej rozkłady czasowe zmiennych uzyskane empirycznie. Lokomotywy realizujące odstawę urobku były modelowane niezależnie, program komputerowy odwzorowywał przebieg zmian produkcyjnych oraz działania logiczne oddziaływujące na proces, które odwzorowywać mogły metody jego sterowania. Podobnie uwzględniona była interakcja między lokomotywami oraz elementami infrastruktury takimi jak m.in. tamy wentylacyjne. Program przeznaczony był do używania przez inżyniera, którego rola była znacząca. Wykorzystując posiadaną wiedzę na temat rzeczywistego systemu, modelu oraz danych wejściowych wykonywał on eksperymenty metodą prób i błędów oraz przeprowadzając analizę wrażliwości, modyfikował układ, stosując zdaniem autorów zdecydowanie bardziej innowacyjne rozwiązania niż te wynikające wyłącznie z metod matematycznej optymalizacji.

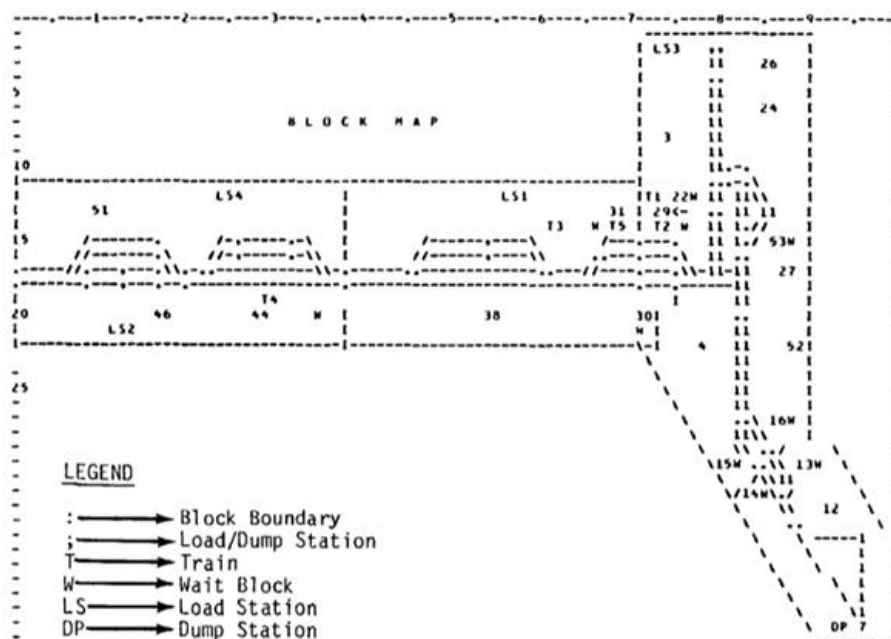
W nieodległym czasie opublikowana została praca, która obejmowała przykład zastosowania symulacji w procesie transportowym realizowanym w sposób ciągły w zakładzie górniczym Rudna (Bernardyn i Bernardyn 1978). Formuła modelu obejmowała tzw. elementy zredukowane stanowiące szeregowe połączenie urządzeń transportowych, zbliżone lub tożsame w aspekcie wydajności. Opracowany model koncentrował uwagę wokół kwestii niezawodnościowych, wynikłych głównie ze struktury połączeń, angażując w to specjalny, rozbudowany, hierarchiczny układ przestrzeni stanów poszczególnych elementów systemu i wykorzystując dane rejestrowane w raportach zmianowych. Powstały system informatyczny nazwany SEPAT pozwalał również wyznaczyć charakterystyki takie jak: wykorzystanie zdolności transportowych i tzw. rytmikę wydobywania.

Praca (Wianecki 1978) stanowi kontynuację prowadzonych od 1971 roku badań nad cyfrowym odwzorowaniem i badaniami numerycznymi systemów maszynowych z transportem ciągłym w głębinowych kopalniach węgla kamiennego i jest kontynuacją prac autora publikowanych w latach 1973 i 1974. Koncentruje ona uwagę wokół kwestii wpływu właściwości niezawodnościowych głównych ciągów produkcyjnych zlokalizowanych na poz. 830, tj. kombajnów, przenośników i wyciągów szybowych na zdolność wydobywczą i przepustowość transportową KWK Pniówek. Opracowany na komputer Odra 1305 w języku FORTRAN program TG-10 obejmował swoim zakresem analizę przebiegu procesów wydobywczych i transportowych kopalń jednopoziomowych z ciągłym transportem poziomym od przodków do szybu i zbiornikami wyrównawczymi o ograniczonej ładowności. Program wykonywał obliczenia z 60 lub 300 sekundowym krokiem obliczeniowym. Szczególna uwaga została skoncentrowana na zależności maksymalnych stanów napełnienia zbiorników połowych od wskaźnika gotowości przodków do pracy, co wymagało zaimplementowania interakcji zwrotnej zbiorników w sytuacji ich przepełnienia. Jak zauważył autor, cecha ta miała kluczowy wpływ i wymagała gruntownej zmiany wcześniej stosowanych programów symulacyjnych. Elementarną częścią publikacji jest analiza krytycznego czasu usunięcia awarii przenośników magistralnych niewywierającego przeważającego wpływu na utratę wolumenu produkcji. Przeprowadzone badania zdaniem autora wykazały, że „każdy system maszynowy należy analizować indywidualnie – nie da się na podstawie jednego systemu wyciągnąć wniosków ogólnych obowiązujących w warunkach innych kopalń”. Jak stwierdza autor publikacji – przeanalizowanie związku pomiędzy awaryjnością a wynikłymi z niej stratami potencjału produkcyjnego już na etapie projektowania systemu pozwala na racjonalny dobór poszczególnych maszyn i urządzeń, co ma bezpośrednie odzwierciedlenie w pracy w zamieszczonych charakterystykach opisujących czułość systemu na zmianę parametrów krytycznych.

Autorzy pracy (Hayashi i Robinson 1981) podkreślają małą stosowalność modeli symulacyjnych kopalń odkrywkowych w zastosowaniu do badań podziemnej kopalni węgla kamiennego. Jednocześnie przedstawiają własny model, który na podstawie 19 rodzajów interakcji i zdarzeń dyskretnych odwzorowuje zasady i warunki realizacji procesu transportu urobku kolejną kopalnianą. W publikacji autorzy zamieszczają kompleksowy opis podsystemów symulacji, które współtworzą:

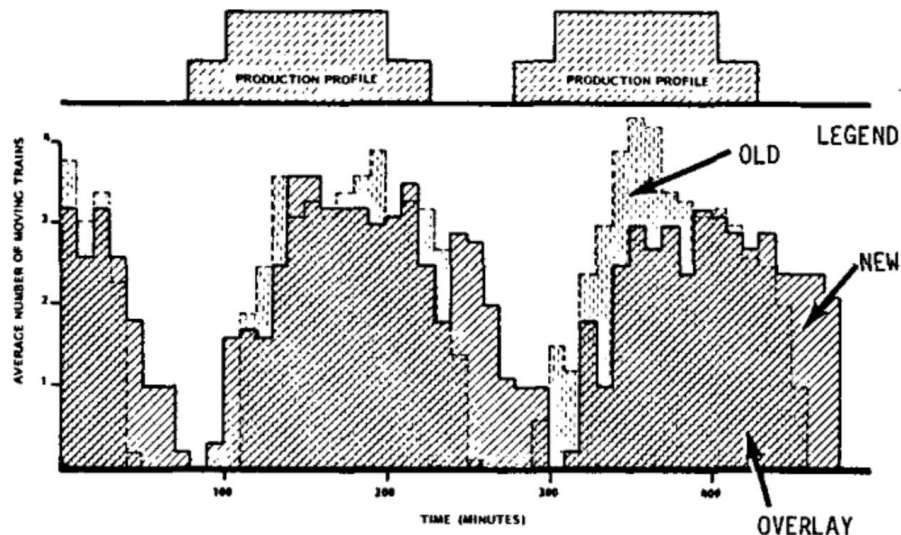
- blok załadunku na stacji załadunkowej,
- blok rozładunku na stacji rozładunkowej,
- blok odwzorowania ruchu lokomotyw,
- blok przypisujący zadania jednostkom.

Model symulacyjny prawdopodobnie jako jeden z pierwszych stosowanych dla górnictwa podziemnego umożliwił graficzną wizualizację w formie schematu synoptycznego. Na rysunku 2.1 zaprezentowano wygląd schematu opracowanego z użyciem tablicy znaków ASCII. Użyty sposób wizualizacji rekompensował brak dedykowanego narzędzia do wizualizacji i wynikał z ograniczonych możliwości ówczesnych komputerów. Ilustracja została zamieszczona z uwagi na to, że opracowanie sposobu wizualizacji przestrzennej stanowi równie ważny element w aspekcie niniejszej pracy, szczególnie istotny na etapie weryfikacji zakładającej praktyczne użycie opracowanych modeli.



Rysunek 2.1. Mapa synoptyczna – sposób wizualizacji struktury sieci transportowej za pomocą znaków ASCII (Hayashi i Robinson 1981).

Autorzy publikacji, jako jedni z pierwszych stosowali system uśredniania wyników z dekreacją według czasu zegarowego – co pozwalało podsumować wyniki eksperymentów stochastycznych i wyznaczyć średni profil ilości pociągów realizujących zadania transportowe w danym czasie zegarowym. Wykres, który zyskał szersze zastosowanie, został zamieszczony w niniejszej pracy na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2. Przykład zastosowania agregacji danych z dekretacją według czasu zegarowego (Hayashi i Robinson 1981).

Model dedykowany stricte dla kopalń węgla kamiennego obejmujący swoją funkcjonalnością wsparcie w wielu kluczowych obszarach został opisany w publikacji (Shtele i Abramov 1981). Jako jeden z pierwszych model został opracowany z myślą o kompleksowym podejściu do analizy procesów transportowych. Jego funkcjonalność obejmowała:

- długoterminowe projekcje wskaźników efektywności procesu transportowego z uwzględnieniem dynamiki zmian struktury i położenia środków transportowych w przestrzeni, jak i wyczerpywania punktów załadunkowych i ich translokacji w przestrzeni,
- projekcje pracy systemu w warunkach zmian parametrów nadawy lub w sytuacji wystąpienia awarii,
- rozwój metod służących zwiększeniu efektywności pracy systemu transportowego, ocenę projektowanych ulepszeń systemu,
- identyfikację wąskich gardeł w horyzoncie czasowym eksploatacji,
- porównanie wariantów rozbudowy systemu transportowego,
- szacowanie strat produkcyjnych wynikłych z działania systemu transportowego.

Model symulacyjny posiadał następujące cechy: pozwalał na ocenę różnych scenariuszy funkcjonowania systemu transportu węgla w kopalni podziemnej, jak również różnych zasad organizacji pracy przodków ścianowych. Na poziomie długookresowych projekcji efektywności pracy systemu umożliwiał ocenę wrażliwości tych parametrów na zmianę parametrów wejściowych. W publikacji zamieszczone zostały użyte w symulacji równania dynamiki stanu systemu transportowego w poszczególnych punktach pomiarowych ujęte w formie równań pierwszego rzędu. Zaproponowany model realizował podział przonośników taśmowych na tzw. segmenty odwzorowujące jego określone odcinki zlokalizowane jednoznacznie w strukturze i przestrzeni. Parametry wyjściowe symulacji umożliwiające realizację opisanych uprzednio funkcji i porównanie wariantów między sobą obejmowały liczne wskaźniki czasowe postojów lub nieefektywnej pracy obiektów związane z przyczyną owych strat, jak również wydobycie z przodków oraz łączne wydobycie na powierzchni. Program symulacyjny działał ze stałym krokiem czasowym symulacji wynoszącym 1 minutę.

W kolejnej publikacji (Yun i Yegulalp 1983) odnaleźć można propozycję wykorzystania metod optymalizacji. Metoda ta przedstawiona jest jako alternatywa dla wcześniejszych publikacji obejmujących realizację typowych badań symulacyjnych zaprezentowanych na 17 konferencji APCOM

(ang. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*) w 1982 roku. Badania te miały na celu nadzorowany przez inżyniera rozwój i porównanie wariantów realizacji procesów transportowych. Autorzy publikacji wyróżniają badania obejmujące całość kopalni lub badania ukierunkowane na rozwiązanie problemu decyzyjnego w wyodrębnionym funkcjonalnie jej fragmencie. Optymalizacja realizowana za pośrednictwem metod parametrycznych (programowanie całkowitoliczbowe) dotyczyła systemu eksploatacji w systemie podpiętrowym, ograniczając się do optymalizacji przestrzennej struktury dróg odstawy urobku. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem IBM 4341.

Autorzy publikacji (Baral, Daganzo, i Hood 1987) zwrócili szczególną uwagę na nieplanowane przerwy w realizacji procesu wydobywania i transportu urobku spowodowane awarią w obrębie ciągu przenośników taśmowych. Przeprowadzono dyskusję nad modelami symulacyjnymi BELTSIM i SIMBELTM, które mogą być wykorzystane do optymalizacji ciągów odstawy urobku poprzez lokalizację dodatkowego zbiornika retencyjnego. Koncentrując uwagę na kwestiach związanych z współpracą przenośników z obiektem zapewniającym retencję urobku, autorzy przedstawili własny model analityczny oraz metody obliczeń najkorzystniejszej lokalizacji oraz pojemności zbiorników (stosując metody parametryczne optymalizacji). Oprogramowanie zostało opracowane w języku BASIC na komputerze klasy IBM PC.

Praca (Vagenas 1991) jako pierwsza w niniejszym przeglądzie koncentruje uwagę na problematyce związanej z automatyzacją pracy ładowarek LHD (ang. *Load, Haul, Dump machine*). Głównym obszarem zainteresowania prezentowanym w pracy było zagwarantowanie bezkolizyjnej pracy maszyn samojezdnych. Implementacja wykonana została w programie TURBO PASCAL. Badania symulacyjne wykonane w autorskim programie PROFITIS obejmowały testy procedury sterującej ruchem maszyn, obejmującej między innymi algorytmy:

- najszybszego dojazdu do wskazanego punktu docelowego (algorytm Dijkstry),
- dostosowania prędkości do wozu poprzedzającego jadącego w tym samym kierunku,
- obsługi bezpiecznego ruchu na skrzyżowaniach dróg transportowych,
- obsługi ruchu pojazdów w wyrobisku transportowym o organizacji dwukierunkowej,
- przypisania miejsc docelowych dla maszyn z ukierunkowaniem na minimalizację długości tras (algorytm przydziału zadań).

Kolejną publikacją, w której za pomocą narzędzi symulacyjnych testowano różne wersje rozwiązań w zakresie transportu urobku jest praca (Frimpong i Whiting 1995). Ten konkretny przypadek dotyczy kopalni złota, a realizacja badań pozwoliła określić wydajnościowe i ekonomiczne miary efektywności realizacji procesu transportowego w różnych konfiguracjach. Symulacja była realizowana w rozbudowanym środowisku symulacyjnym SLAM II, umożliwiającym symulację bazującą na zdarzeniach dyskretnych lub modelach ciągłych w czasie, dodatkowo dając możliwość dostosowania funkcjonalności środowiska poprzez własne elementy stworzone w języku FORTRAN 77.

Tabela 2.2. Podsumowanie piśmiennictwa w okresie 1969–1995 (opracowanie własne).

Bibliografia	Środki transportowe	Narzędzie symulacyjne	Miejsce zastosowania	Technika	Kryteria analityczne
(Firganek i Pszczółka 1969)	Kolej kopalniana	-	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja dyskretna	Efektywność
(Touwen i Joughin 1972)	Kolej kopalniana	FORTRAN IV	Podziemna kopalnia złota	Symulacja dyskretna	Efektywność, Niezawodność

(Bernardyn i Bernardyn 1978)	Przenośniki taśmowe	SEPAT	Kopalnia rud metali (ZG Rudna)	Symulacja dyskretna	Niezawodność
(Wianecki 1978)	Przenośniki taśmowe	FORTTRAN	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja ciągła	Niezawodność
(Shteie i Abramov 1981).	Przenośniki taśmowe	-	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja ciągła	Efektywność, Niezawodność
(Hayashi i Robinson 1981)	Kolej kopalniana	SIMSCRIPT 11.5	Kopalnia podziemna	Symulacja ciągła	-
(Yun i Yegulalp 1983)	Drogi odstawy	-	Kopalnia z systemem podpiętrowym	Model analityczny, programowanie całkowitoliczbowe	Efektywność
(Baral, Daganzo, i Hood 1987)	Zbiorniki retencyjne	BASIC	Kopalnia podziemna	Model analityczny i programowanie liniowe	Niezawodność
(Vagenas 1991)	Ładowarki (LHD)	PROFITIS / TURBO PASCAL	Kopalnia podziemna	Symulacja	Sterowanie (kolizyjność)
(Frimpong i Whiting 1995)	Kolej, wozy odstawcze	SLAM II / FORTRAN 77	Kopalnia podziemna	Symulacja ciągła i dyskretna	Efektywność kosztowa

Podsumowując powyższe prace, zaważyć należy przede wszystkim, że użyte w początkowym etapie rozwoju metod symulacyjnych oprogramowanie powstawało najczęściej wyłącznie w celu rozwiązania konkretnego, opisanego problemu. Powołane prace kończą w niniejszym przeglądzie okres, w którym modele symulacyjne powstawały w całości, w drodze ich opracowania od podstaw pod zidentyfikowane wymagania funkcjonalne.

2.1.3. Rozwój środowisk symulacyjnych

Badania procesów transportu urobku począwszy od 1997 roku w sposób zasadniczy różnią się od prac wcześniejszych. Przyczyn takiej sytuacji upatrywać można w rozwoju systemów symulacyjnych wyposażonych w interfejsy graficzne (ang. *Graphical User Interface*, GUI), których liczebność znacząco wzrosła od 1995 roku. Wzrost ten łączyć można w głównej mierze z popularyzacją systemu operacyjnego Microsoft Windows 95 oraz kolejnych jego odsłon, jak również rosnącej z czasem dostępności komputerów klasy PC wyposażonych w 32-bitowe procesory (Intel Pentium, AMD K5), których częstotliwość taktowania oraz rozmiar dostępnej pamięci pozwalały na zmianę kluczowych założeń w zakresie implementacji modeli symulacyjnych. Istotna zmiana dotyczyła również samych języków programistycznych, w których coraz większą rolę ogrywała obiektowość, dotyczy to m. in. języka C++, który w latach 90. XX wieku stał się jednym z najpopularniejszych języków programowania ogólnego przeznaczenia. W okresie 1996–2005 powstały takie narzędzia symulacyjne jak PROSIM, Flexsim, Anylogic, Simul8. Zyskiwały na znaczeniu nowe wersje narzędzi symulacyjnych opracowanych w latach osiemdziesiątych i początkiem lat 90. XX wieku, takie jak m.in: AutoMod, ARENA, WITNESS (Nance i Overstreet 2003).

Kontynuacja badań literaturowych koncentruje uwagę na pracy (Yingling, Luo, i Sottile 1997), w której wykorzystano środowisko symulacyjne SIMAN w celu realizacji badań symulacyjnych testujących działanie autorskiego algorytmu z dziedziny programowania dynamicznego. Głównym jego celem było ograniczenie ryzyka przeładowania przenośników taśmowych, ze szczególnym uwzględnieniem części zbiorczej systemu odstawy, na którym dochodziło do połączenia strug urobku z różnych źródeł. Cel ten mógł być osiągnięty w drodze wyznaczenia optymalnej sekwencji pracy

punktów załadunkowych urobku, które ograniczyły ryzyko przeładowania przenośników taśmowych. Transport urobku z kompleksów ścianowych prowadzony był samowładowczymi przodkowymi wozami odstawczymi (ang. *Shuttle Cars*) we współpracy z ciągami odstawy taśmowej.

Dalej na uwagę zasługuje praca (Runciman 1997), w której w sposób kompleksowy opisano zagadnienia związane z symulacją procesu transportu urobku maszynami samojezdnymi w warunkach kopalni podziemnej rud. Pozycja ta opisuje zastosowania symulacji dyskretnej, w aspekcie możliwości oprogramowania Witness, przeznaczonego do symulacji procesów produkcyjnych.

Autorzy pracy (Lebedev i Staples 1998) prezentują dwa przykłady symulacji wykonywanych dla kopalni, z której jeden dotyczy przypadku kopalni podziemnej. W przykładzie tym główny cel stosowania badań symulacyjnych to weryfikacja poprawności algorytmu sterującego, który ma na celu minimalizację ryzyka związanego z przepełnieniem zbiorników retencyjnych oraz przeciążeń w obrębie sieci przenośników.

Szeroko wykorzystywana i powoływana w publikacjach praca (Mcneary i Nie 2000), koncentruje uwagę wokół problematyki związanej z doбором parametrów techniczno-ruchowych przenośników taśmowych. Zastosowany model symulacyjny pozwala na wprowadzenie parametrów wielu zmiennych wejściowych, które można pogrupować w następujący sposób:

- techniczno-ruchowe obiektu (długość przenośnika, szerokość taśmy, przekrój taśmy, prędkość taśmy przenośnika, gęstość węgla),
- wydajnościowe (rozkład nadawy urobku dla poszczególnych sekcji przenośników, rozkład czasu przyjazdów przodkowych wozów odstawczych, rozkład rozładunku z kruszarki),
- organizacyjne i niezawodnościowe (rozkład czasu pracy przenośników, rozkład czasu awarii przenośników, czas wydobywania na każdej zmianie),
- nastawy symulacji (liczba powtórzeń symulacji).

Wyniki symulacji pozwalają w tym przypadku zweryfikować ewentualną utratę produkcji związaną z brakiem ciągłości działania systemu odstawy oraz w sposób nadążny dostosowywać parametry fizyczne i ruchowe urządzeń do wymagań w zakresie spodziewanej nadawy. Było to wykonywane w obrębie przeprowadzonych badań symulacyjnych poprzez restartowanie symulacji w przypadku stwierdzenia takiej konieczności.

W pracy (B. H. Roberts 2002) autor przeprowadził badania symulacyjne umożliwiające porównanie 35- oraz 80-tonowych wozów odstawczych realizujących proces odstawy w systemie wyrobisk upadowych w podziemnej kopalni złota. W tym celu wykorzystany został pakiet symulacyjny Planimate. Autorzy pracy dokonali ręcznego pomiaru szeregu wskaźników czasowych, które zostały wykorzystane przy budowie modelu. Na szczególną uwagę w tym przypadku zasługuje precyzyjne odwzorowanie warunków logicznych opisujących zachowanie maszyn samojezdnych.

Kolejną z pozycji dotyczących procesu odstawy urobku realizowanego koleją kopalnianą jest praca (Horsley i Splaine 2003). Przedstawiono w niej program symulacyjny stworzony w języku GPSS pozwalający na modelowanie systemów transportu urobku w kopalniach podziemnych. Praca stanowi prezentację modelu rozwijanego od 1977 w kopalni złota. Wyniki programu obejmujące główne dane wydajnościowe, umożliwiają przede wszystkim testowanie różnych lokalizacji nawrotów oraz zapotrzebowania na lokomotywy.

Zupełnie innego rodzaju problem przedstawiono w artykule (Iverson, Jung, i Biswas 2003). Dotyczy on testów działania zsympów a w szczególności sił występujących podczas eksploatacji tych

elementów systemu transportowego. Symulacja przemieszczeń rudy realizowana była z użyciem metody elementów dyskretnych (DEM) – oprogramowania PFC2D.

W dalszej kolejności na wyróżnienie zasługuje praca (Bury 2004), której autor bazując na przykładzie kopalni węgla kamiennego, zaprezentował nowy rodzaj zastosowania metod symulacyjnych procesu w obrębie transportu urobku w kopalni podziemnej. Przedmiotem pracy jest model symulacyjny pozwalający testować strategie sterowania procesem transportu urobku w celu realizacji technologicznej funkcji homogenizacji lub mieszania różnych źródeł urobku w obrębie podziemnych dróg jego składowania i transportu. Podstawowym celem optymalizacji było uzyskanie zadanych parametrów jakościowych urobku. Praca dotyczyła kopalni podziemnej stosującej system taśmowej odstawy urobku ze zbiornikami retencyjnymi. Model wymagał parametryzacji elementów symulacji zarówno pod względem cech konstrukcyjnych, ilościowych, jak i jakościowych. Interpretując schemat blokowy rozwiązania docelowego, narzędzie zostało przewidziane do regulacji nastaw elementów sterujących lub oddziaływania na elementy wykonawcze. Za pośrednictwem tablic synoptycznych możliwa była realizacja wsparcia pracy dyspozytorni w czasie rzeczywistym na podstawie odczytów z sensorów zabudowanych w układzie technologicznym. Działanie systemu obejmuje komunikację pomiędzy modułem symulacyjnym, modułem optymalizacji a modułem prognostycznym.

Kolejna pozycja literaturowa (Morin, Bamber, i Scoble 2004) zawiera opis modelu symulacyjnego wykorzystany do oceny efektywności różnych rozwiązań techniczno-organizacyjnych, obejmującego swoim działaniem wszystkie cykle prac realizowanych w systemie eksploatacji metodą ubierkowo-zabierkową. W tym konkretnym przypadku budowa modelu symulacyjnego obejmującego ciągi odstawy urobku w ocenie autorów wymaga głębokiej wiedzy o sposobie zalegania złoża. Ostatecznie autorzy przetestowali różne kombinacje realizacji procesu odstawy urobku wliczając w to wykorzystanie ładowarek (LHD) oraz wozów odstawczych. Końcowo przedstawili wyniki jako funkcję dostępności i produktywności maszyn, opisując proces transportowy realizowany w różnych konfiguracjach.

Praca (Michalakopoulo, Kouvardas, i Panagiotou 2004) dotyczy w całości problemu realizacji badań symulacyjnych wozów odstawczych współpracujących z ładowarkami w systemie komorowym eksploatacji złoża. Autorzy koncentrują uwagę na kwestiach związanych z odwzorowaniem rzeczywistego zachowania cyklicznych, samojezdnych środków transportowych. Jednocześnie, jako wyniki działania modelu symulacyjnego przedstawione są charakterystyki pozwalające na dobranie odpowiedniej ilości współpracujących maszyn dla pewnych, ściśle określonych warunków eksploatacji – głównie długości prowadzonej odstawy kołowej. Zbliżona tematycznie jest praca (Gamache, Grimard, i Cohen 2005) której autorzy podejmują problem realizacji odstawy urobku przez ładowarki (LHD). Definiują tym samym trzy podstawowe zagadnienia stanowiące podwaliny metody dynamicznego zarządzania flotą maszyn. Testy opracowanej metody wymagały użycia modeli symulacyjnych celem oceny działania trzech podstawowych komponentów, które realizują następujące funkcje:

- a) Przypisanie zadań do wykonania, rozumiane jako wybór miejsca, rodzaju pracy wskazanej do wykonania przez każdą z maszyn.
- b) Określenie optymalnej trasy do celu uwzględniający aktualną sytuację przestrzenną, organizację dróg transportowych i lokalizację maszyn samojezdnych w ich obrębie.
- c) Harmonogramowanie ruchu maszyn, rozumiane jako oddziaływanie na prędkości przejazdowe pojazdów celem zachowania warunków bezkolizyjności i płynności ruchu w obrębie dróg transportowych.

Kluczowe kwestie niezawodności pracy maszyn samojezdnych realizujących proces transportu urobku w kopalni podziemnej został podjęty w pracy (Yuriy 2005). Na uwagę zasługuje fakt, że autor tworząc model symulacyjny oraz przeprowadzając dyskusję otrzymanych wyników, posłużył się dwoma niezależnymi środowiskami symulacyjnymi: AutoMOD oraz Simul8.

Tabela 2.3. Podsumowanie piśmiennictwa w okresie 1996-2005 (opracowanie własne).

Bibliografia	Środki transportowe	Narzędzie symulacyjne	Miejsce zastosowania	Technika	Kryteria analityczne
(Yingling, Luo, i Sottile 1997)	Przenośniki, samowładowcze przodkowe wozy odstawcze (Shuttle Cars)	Siman	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja	Niezawodność i sterowanie (obciążenie krytyczne)
(Runciman 1997)	Ładowarki (LHD)	Witness	Kopalnia podziemna	Symulacja	-
(Lebedev i Staples 1998)	Przenośniki, zbiorniki, samowładowcze przodkowe wozy odstawcze (Shuttle Cars)	-	Kopalnia podziemna	Symulacja dyskretna	Niezawodność i sterowanie (obciążenie krytyczne), wykorzystanie zasobów
(Mcneary i Nie 2000)	Przenośniki taśmowe	GPSS/H	Kopalnia podziemna	Symulacja dyskretna	Niezawodność (dobór parametrów)
(B. H. Roberts 2002)	Wozy odstawcze, ładowarki LHD	Planimate	Kopalnia podziemna złota	Symulacja	Wydajność
(Horsley i Splaine 2003)	Kolej kopalniana	GPSS (GOLDTRAM)	Kopalnia podziemna złota	Symulacja	Wydajność
(Iverson, Jung, i Biswas 2003).	Zsypy	PFC2D	Kopalnia podziemna	Symulacja DEM	Wymuszenie fizyczne (siły oddziaływujące na obiekt)
(Burý 2004)	Zbiorniki, przenośniki taśmowe	Simul	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja	Sterowanie jakością
(Michalakopoulo, Kouvardas, i Panagiotou 2004)	Wozy odstawcze, ładowarki LHD	GPSS/H	System komorowo-filarowy	Symulacja	Wydajność i wykorzystanie maszyn
(Morin, Bamber, i Scoble 2004)	Wozy odstawcze, ładowarki LHD,	Extend	System eksploatacji metodą ubierkowo-zabierkową	Symulacja	Produktywność i dostępność procesu transportowego
(Gamache, Grimard, i Cohen 2005)	Ładowarki (LHD)	-	Kopalnia podziemna	Symulacja	Organizacja pracy maszyn (dispath)
(Yuriy 2005)	Ładowarki (LHD)	AutoMOD, Simul8	Kopalnia podziemna	Symulacja	Niezawodność

Powołane prace pochodzące z lat 1996–2005 charakteryzuje bardzo zróżnicowane podejście w zakresie wyboru narzędzia lub środowiska symulacyjnego. Jednocześnie znacząca ilość publikacji w odróżnieniu od wcześniejszych skoncentrowanych głównie na ciągach taśmowych oraz kolei kopalnianej dotyczy transportu z wykorzystaniem samojezdnych maszyn transportowych: ładowarek typu LHD lub przodkowych wozów odstawczych.

2.1.4. Upowszechnienie badań symulacyjnych

Okres od 2006 do 2012 roku określić można jako czas popularyzacji badań symulacyjnych. Świadczy o tym bezpośrednio skokowy wzrost publikacji i zastosowań symulacji jako metody badawczej (Nance i Overstreet 2017). Opisane lata to okres rozwoju nowych zastosowań i podejść w zakresie realizacji modeli symulacyjnych. Istniejące wcześniej narzędzia zyskały nowe funkcje takie jak możliwość animacji 3D, przyłączenia źródeł danych, jak i zmiany modelu korzystania z aplikacji na relację klient-serwer. Z perspektywy zastosowań modeli symulacyjnych dodać należy, że był to czas intensywnego rozwoju sieci komputerowych oraz urządzeń dostępowych m.in.: laptopów, skanerów, palmtopów, tabletów, paneli interfejsu człowiek–maszyna HMI (ang. *Human-Machine Interface*). W rezultacie w tym okresie można zanotować istotną popularyzację systemów stosowanych w zakresie monitoringu pracy maszyn i urządzeń, centralizację informacji o zdarzeniach eksploatacyjnych dotyczących maszyn i urządzeń w drodze zastosowania oprogramowania wspomagającego utrzymanie ruchu klasy CMMS (ang. *Computerised Maintenance Management Systems*), systemów wspomagających gospodarkę magazynową (ang. *Warehouse Management System*) oraz wspomagających zarządzanie łańcuchem dostaw – SCM (ang. *Supply Chain Management*). Nowe narzędzia informatyczne pozwoliły na zgromadzenie zasobów nowych danych wejściowych, jak również skutkowało sformułowaniem nowych zagadnień badawczych, co w znacznym stopniu rzutowało na aplikacyjne kwestie opracowania modeli symulacyjnych procesów transportu urobku.

Praca (Aydiner 2006) zawiera bogaty przegląd publikacji obejmujących tematykę badań symulacyjnych transportu urobku z wykorzystaniem maszyn samojezdnych. Badania literaturowe stanowią tu podwaliny pod własną propozycją kompleksowego modelu symulacyjnego służącego do analizy wybranych konfiguracji wyposażenia obejmującego wiertnice oraz ładowarki typu LHD. Analiza porównawcza poszczególnych wariantów scenariuszy dokonana została na podstawie wydajności produkcyjnej oraz finalnie w ujęciu jednostkowych kosztów produkcji w przodku. Model, jako jeden z nielicznych został napisany w języku C.

Kolejną z prac koncentrujących uwagę wokół kwestii związanych z optymalizacją pracy samojezdnych maszyn transportowych jest pozycja (F. R. Saayman 2006). Przedstawiony w niej model symulacyjny dotyczy systemu blokowego z wypuszczeniem urobku przez leje wysypowe (ang. *System Block Caving*), obejmując pięć zdywersyfikowanych strategii zarządzania przydziałem zadań dla maszyn. Autorzy, oceniając poszczególne scenariusze, kierowali się poziomem osiągniętej wydajności procesu odstawy urobku.

Autorzy pracy (Gray i in. 2009) przedstawili model symulacyjny opracowany w środowisku ARENA. Jego zadaniem jest realizacja analiz typu „co jeżeli” (ang. *what if*) w obrębie środków odstawy urobku z kombajnów chodnikowych urabiających liniowo (ang. *Continuous Miner*) wykonujących wyrobiska przygotowawcze w systemie ścianowym. Model pozwala testować różne konfiguracje w aspekcie ilości maszyn transportowych i przebiegu dróg odstawy, jednocześnie umożliwiając wprowadzenie szerokiego spektrum danych wejściowych. Pokrewne rozwiązanie zostało opisane w literaturze (Baafi i Porter 2010), w której dodatkowo zamieszczono przydatne informacje na temat awaryjności poszczególnych grup maszyn z podziałem na rodzaj awarii, koncentrując tym samym uwagę na kwestiach związanych z dostępnością wyposażenia. Zastosowano kaskadowy system identyfikacji stanu w jakim znajduje się maszyna, sporządzony na wzór wskaźnika OEE (rys. 2.3).

Czas kalendarzowy							
Czas obłożony							Czas nieobłożony
Czas operacyjny			Przerwy operacyjne		Czas obsługi		
Czas produkcji		Pozostały czas operacyjny	Zarządzalne	Niezarządzalne	Awarie	Planowane	
Czas pracy	Opóźnienia chroniczne						

Rysunek 2.3. System klasyfikacji stanu pracy maszyny odwzorowujący wskaźnik OEE (Baafi i Porter 2010).

W publikacji (Botha i Nichol 2010) zawarty został opis kompleksowego modelu obejmującego pełen cykl prac górniczych łącznie z odstawą urobku w podziemnej kopalni diamentów. Autorzy pracy swój model symulacyjny opracowali w środowisku SimMine, które ich zdaniem było najlepiej dostosowane do specyficznych wymagań w zakresie symulacji działania kopalni diamentów.

Począwszy od 2010 roku zaobserwować można zdecydowany wzrost ilości publikacji podejmujących tematykę zastosowania metod symulacyjnych względem pozostałych aspektów działalności górniczej. Jednocześnie wskazać można prace naukowe podejmujące bardzo szczegółowe kwestie związane z realizacją procesu transportowego przy użyciu konkretnych maszyn i urządzeń transportowych. Przykład taki stanowi artykuł (Czuba, Gospodarczyk, i Kulinowski 2010), który poświęcono zagadnieniu symulacji procesu transportu urobku w obrębie kompleksu ścianowego z szczególnym uwzględnieniem parametrów fizycznych i ruchowych przenośnika ścianowego. W tym celu zdecydowano się wykorzystać metodę elementów dyskretnych (DEM). Przedstawione w referacie wyniki symulacji świadczą o tym, że zaproponowana metoda badawcza może być skutecznym narzędziem weryfikacji i optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych przenośników ścianowych pracujących w kombajnowych kompleksach zmechanizowanych. Symulację wykonano w programie PFC 3D.

Kompleksowe podejście do optymalizacji procesu odstawy urobku obejmujące harmonogramowanie całego cyklu wydobywczego w krótkim horyzoncie czasowym zaprezentowane zostało w pracach (Nehring, Topal, i Knights 2010) oraz (Nehring, Topal, i Little 2010). Autorzy zastosowali metody programowania liniowego (MIP) oraz język AMPL. Jakkolwiek wyniki optymalizacji nie były przedmiotem szczegółowego odwzorowania w środowisku symulacyjnym a model posługiwał się uproszczeniami, na uwagę zasługują funkcja celu, która opisana została ekonomiczną efektywnością przedsięwzięcia obejmując podstawowe procesy produkcyjne, w tym proces transportowy.

Począwszy od lat 80. ubiegłego wieku odnotować można wyraźny spadek liczby publikacji dotyczących kompleksowej analizy procesu transportowego w obrębie kopalń funkcjonujących w Polsce. Toteż kolejną z serii prac dotyczących polskich kopalń jest publikacja (Krupa i Kliś 2011), w której opisany został przykład wykorzystania modelu symulacyjnego w kopalni węgla kamiennego. Autorzy, tworząc model, uwzględnili organizację zmian produkcyjnych, współczynniki awaryjności urządzeń oraz ich dokładną strukturę w ciągu transportowym. Symulacja obejmowała oddziaływanie na parametry niezawodnościowe obiektów oraz zmiany w przestrzeni czasowej organizacji zmian produkcyjnych. Zbudowany model posłużył do realizacji wielu eksperymentów symulacyjnych obejmujących poprawę właściwości niezawodnościowych układu oraz celową ingerencję w organizację pracy przodków ścianowych. Zbliżony przykład, dotyczący kopalni węgla kamiennego eksploatującej systemem ścianowym został przedstawiony w pracy (Miwa i Takakuwa 2011). Autorzy publikacji

zaprezentowali model bazowy, stanowiący podstawę do realizacji analiz „co jeżeli”, umożliwiając tym samym racjonalizację stanu docelowego. Parametry wyjściowe modelu zostały sformułowane jako wskaźniki opisujące pewność wystąpienia danego stanu, poprzez wartości średnie dla okresu, wartości maksymalne oraz wybrane kwantyle. Powołując się na materiał źródłowy zamieszczony przez autorów, należy stwierdzić, że właściwy system opisu wariacji parametrów wejściowych, jak i wyjściowych modelu ma szczególne znaczenie w aspekcie oceny przebiegu procesów dynamicznych.

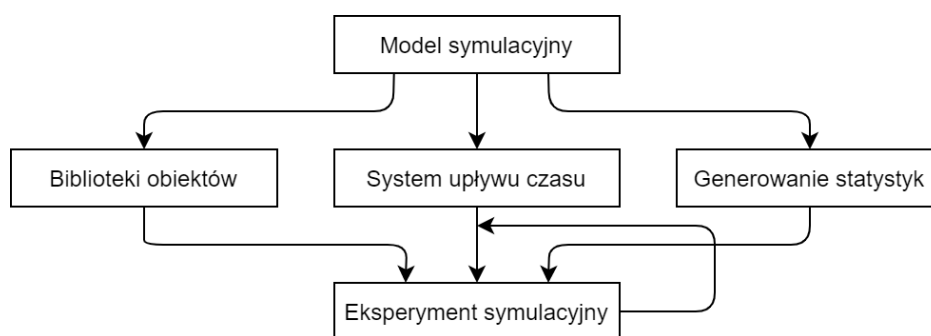
Kolejna pozycja literaturowa (Fjellström 2011) dotyczy modelu symulacyjnego wykonanego w oprogramowaniu AutoMod. Model ten został użyty w celu oceny trzech scenariuszy realizacji procesu odstawy różniących się pomiędzy sobą rodzajem zastosowanych wozów odstawkowych. Przedstawiona symulacja na tle innych wyróżnia się wysokim stopniem interakcji związanej z odwzorowaniem ruchu maszyn samojezdnych.

Wśród prac, które koncentrują uwagę wokół kwestii stricte optymalizacyjnych w dalszej kolejności można wymienić (Vasquez, Sepúlveda, i Córdova 2011). Celem nadrzędnym opisanego w pracy algorytmu było zwiększenie efektywności pracy ładowarek LHD poprzez oddziaływanie na system reguł decyzyjnych związanych z przypisaniem im określonych zadań. W tym konkretnym przypadku należy zauważyć, że wyniki działania algorytmu nie zostały szczegółowo zweryfikowane z użyciem osobnego modelu symulacyjnego.

W dalszej kolejności na wyróżnienie zasługuje praca (Xu i in. 2011) która w opozycji do innych treści dotyczy podziemnej kopalni realizującej odstawę z użyciem kolei kopalnianej. Autorzy publikacji szczegółowo opisali charakterystyki załadunku i rozładunku wozów oraz przeprowadzili symulację różnych konfiguracji realizacji procesu transportowego na wybranym ciągu transportowym. Realizacja badań symulacyjnych ukierunkowana była na eliminację wąskiego gardła ograniczającego zdolności produkcyjne.

Badania literaturowe w ograniczonej liczbie przypadków pozwoliły również na dotarcie do materiałów opisujących procesy transportowe na początku łańcucha produkcji. Jednym z przykładów takiego zastosowania jest praca (Cai, Baafi, i Porter 2012), w której uwagę skoncentrowano na odwzorowaniu pracy kompleksu ścianowego, obejmując podstawowe procesy, maszyny i urządzenia wchodzące w jego skład. Symulację działania elementów urabiających i transportowych przeprowadzono w oprogramowaniu FlexSim 3D. Autorzy publikacji zauważają, że działanie kompleksu ścianowego znacząco odbiega od typowych zastosowań produkcyjnych w tym obiektów standardowo odwzorowywanych w tym środowisku. Opracowany model końcowo został użyty do oceny wrażliwości ciągu produkcyjnego na wystąpienie różnego rodzaju strat czasu takich jak opóźnienia, zatrzymania ruchu maszyn oraz zmian parametrów organizacyjnych w rozumieniu oddziaływania na końcowo uzyskiwane wydobywanie z przodka.

Autorzy pracy (Gleb i Zamyatina 2012) przedstawili krótką charakterystykę modelu symulacyjnego dedykowanego dla celów analizy procesów transportowych (rys. 2.4). Przykład zamieszczony w pracy odnosił się bezpośrednio do kopalni potasu w szczególności obejmując taśmową odstawę urobku. Ostatecznie badania symulacyjne pozwoliły na dobór właściwej pojemności zbiornika urobku oraz szerokości przenośnika taśmowego. Autorzy pracy opisali również budowę środowiska symulacyjnego obejmującego bibliotekę, która opisuje klasy odwzorowujące poszczególne obiekty ujęte w symulacji, system przyrostu czasu oraz moduł generowania statystyk (rys. 2.4).



Rysunek 2.4. Podsystemy modelu symulacyjnego (Gleb i Zamyatina 2012).

Autorzy publikacji (Gonen, Malli, i Kose 2012) rozpatrują zastosowanie różnych systemów transportowania urobku: wyciągów górniczych, transportu przy pomocy pojazdów kopalnianych oraz transport szybem pionowym. W badaniach modelowych ograniczono się jednak wyłącznie do szacunku kosztów transportu dla każdej z wymienionych opcji, w zależności od możliwości produkcyjnych zakładu i głębokości szybu. W publikacji (Hirschi 2012) zamieszczono kompleksowy przykład zastosowania metod programowania dynamicznego w celu wyznaczenia schematów optymalnego działania kombajnu typu CM (ang. *Continuous Miner*). Praca, oprócz kwestii związanych z działaniem samego kombajnu, koncentruje częściowo uwagę na problematyce odstawy za pomocą wozów odstawczych do punktów odstawczych na przenośnikach. Opracowanie wyróżnia się licznymi odniesieniami wyników otrzymanych z modelu do rzeczywistych obserwacji. W wielu przypadkach stwierdzono wyraźną różnicę w rozkładach wyznaczonych przez model a rozkładach otrzymanych empirycznie.

Systemowe podejście obejmujące wykorzystanie danych wejściowych z systemu harmonogramowania wydobywania i cyfrowego modelu złoża zostało przedstawione w pracy (Labrecque i Newman 2012). Oprogramowanie Gemcom's Personal Computer Block Cave dostarcza informacji o lokalizacji i ilości urobku przewidzianego w danej przestrzeni i czasie, następnie dane przekazywane są do kolejnych modeli oceny wykonalności a końcowo do środowiska symulacyjnego ARENA, w którym wykonywane są badania symulacyjne procesów transportowych. Kluczowe konkluzje z realizacji zadań obejmują podyktowaną wysoką iteratywnością procesu analitycznego potrzebę użycia bardziej kompleksowego rozwiązania niż tylko modelu procesów transportowych opracowanego w oprogramowaniu symulacyjnym. Autorzy zawarli we wnioskach z realizacji pracy wyraźne wskazanie, że model symulacyjny powinien być użyty tak wcześnie jak to możliwe oraz powinien mieć holistyczny zasięg w obrębie modelowanego procesu oraz w obrębie pełnego horyzontu czasowego wsparcia decyzyjnego, wykluczając tym samym sytuacje, gdy jest on stosowany wyłącznie wybiórczo do weryfikacji pewnych hipotez.

W kolejnej pracy (Marasová, Husáková, i Gurecka 2012) zaprezentowano zastosowanie modelu symulacyjnego w zakresie analizy procesów transportowych realizowanych w kopalni podziemnej rud żelaza. Praca obejmowała porównanie dwóch metod analitycznej oraz symulacyjnej w zakresie analiz procesu transportu urobku. Model symulacyjny dotyczył kompleksowo całej sieci kolei kopalnianej. Autorzy pracy stwierdzili przydatność modelu w zakresie poprawy wydajności procesu transportowego oraz poszukiwania metod redukcji kosztów.

Model systemu produkcyjnego i transportowego obejmujący kopalnię węgla kamiennego prowadzącą eksploatację w systemie ścianowym został szeroko opisany w ciągu artykułów (Okolnishnikov i in. 2017; Okolnishnikov, Rudometov, i Zhuravlev 2017; 2016; 2012; 2013a; 2013b). Opisany w wymienionych pracach model początkowo służył do wsparcia kontroli operacyjnej, w tym

procesu sterowania transportem urobku włącznie. W kolejnych pracach autorzy opisują nowe funkcjonalności modelu, parametry charakteryzujące poszczególne obiekty, jak i wskazują możliwe, szersze zastosowanie w zakresie jego wykorzystania w przyszłości. Przegląd prac autorów pozwala zidentyfikować kilka podstawowych problemów, takich jak m.in. realizacja testów układów sterowania, które nie mogą się odbyć w rzeczywistym otoczeniu, pomimo iż z wielu względów byłoby to właściwym rozwiązaniem. Problem stanowi również szkolenie operatorów systemu realizujących nadrzędny nadzór nad procesem. Jak argumentują autorzy pracy, w obu kwestiach wymierne wsparcie może zagwarantować model symulacyjny. Z pieczołowitością podchodzą do tematyki opracowania właściwego, w pełni użytecznego interfejsu użytkownika oraz odwzorowania rzeczywistych fizycznych parametrów maszyn i urządzeń górniczych takich jak kompleks ścianowy czy przenośnik taśmowy. W swoich pracach wykorzystują również środowisko wizualizacji 3D.

Autorzy pracy (Pop-Andonov, Mirakovski, i Despodov 2012) dokonali ogólnego opisu pojęć i wybranych zagadnień związanych z zastosowaniem symulacji w analizie procesów transportowych realizowanych w kopalni podziemnej. Praca zawiera podstawowe informacje o modelu symulacyjnym, który został użyty do odwzorowania procesu transportowego w kopalni podziemnej obejmującego odstawę za pośrednictwem wozów odstawkowych oraz kolei. Autorzy nie dokonali dokładnego opisu działania modelu, jednak wskazują jego przydatność w zakresie modelowania kompleksowych systemów a szczególnie odwzorowania aspektów organizacyjnych w szczególności synchronizacji systemu wydobywczego z systemem odstawy urobku. Zdaniem autorów w odniesieniu do podejścia analitycznego badania symulacyjne procesów transportowych dają zdecydowanie lepsze wyniki, jednak wymagają więcej pracy na etapie tworzenia modelu.

Tabela 2.4. Wybrane miary czasowe pracy maszyn odstawkowych (Abubakary Salama i Greberg 2012).

Parametr	Jednostka	Minimum	Wartość średnia	Maksimum
Załadunek łyżki ładowarki	sekundy/łyżka	17	18,5	20
Rozładunek łyżki ładowarki	sekundy/łyżka	5	6	7
Załadunek wozu	sekundy/przejazd	60	65	70
Rozładunek wozu odstawkowego	sekundy/skrzynię załadunkową	65	70	75
Czas manewru	sekundy	30	35	40

Kolejna z prac (Li i Eng 2012) zawiera kompleksowy przykład zastosowania metod symulacyjnych w odwzorowaniu procesu eksploatacji w systemie podpiętrowym z wypuszczeniem urobku. Autor pracy modeluje proces transportowy realizowany za pomocą ładowarek (LHD) oraz wozów odstawkowych. Zbliżoną problematykę poruszyli autorzy pracy (Abubakary Salama i Greberg 2012), w której zaprezentowano model symulacyjny podziemnej kopalni, realizującej w sposób analogiczny proces odstawy urobku za pomocą ładowarek (LHD) i wozów odstawkowych. Badania skoncentrowane były wokół optymalizacji doboru ilościowego maszyn na poszczególnych poziomach wydobywczych kopalni. Model symulacyjny obejmował szereg parametrów wyznaczonych empirycznie, w tym czasów wykonywania poszczególnych działań (tab. 2.4).

Tabela 2.5. Podsumowanie piśmiennictwa w okresie 2006–2012 (opracowanie własne).

Bibliografia	Środki transportowe	Narzędzie symulacyjne	Miejsce zastosowania	Technika	Kryteria analityczne
(Aydiner 2006)	Ładowarki (LHD)	CAFSIM (język C)	System ubierkowo-zabierkowy	Symulacja dyskretna	Wydajność, koszt jednostkowy produkcji
(F. R. Saayman 2006)	Ładowarki (LHD)	-	System z wypuszczeniem	Symulacja dyskretna	Wydajność

urobku przez leje wysypowe					
(Gray i in. 2009), (Baafi i Porter 2010)	Samowładow cze przodkowe wozy odstawcze (Shuttle Cars), kombajny CM	Arena (RoadSIM)	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja dyskretna	Wydajność
(Botha i Nichol 2010)	Ładowarki, przenośniki	SimMine	Kopalnia podziemna diamentów	Symulacja	Wydajność, wykorzystanie
(Czuba, Gospodarczyk, i Kulinowski 2010)	Przenośnik ścianowy	PFC 3D	-	Symulacja DEM	Wydajność
(Nehring, Topal, i Knights 2010) (Nehring, Topal, i Little 2010)	Ładowarki (LHD)	AMPL (CPLEX)	System podpiętrowy	Programowani e całkowitoliczbo we mieszane	Efektywność ekonomiczna
(Krupa i Kliś 2011)	Przenośniki	Vensim	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja dyskretna	Niezawodność
(Miwa i Takakuwa 2011)	Przenośniki	Arena	System ścianowy	Symulacja dyskretna	Niezawodność (wydajność)
(Vasquez, Sepúlveda, i Córdova 2011)	Ładowarki (LHD)	-	Kopalnia podziemna	Optymalizacja	Wykorzystanie wyposażenia
(Fjellström 2011)	Ładowarki (LHD)	AutoMOD	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produktywność
(Xu i in. 2011)	Kolej kopalniana	-	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja	Efektywność, wąskie gardło
(Li i Eng 2012)	Ładowarki (LHD), wozy odstawcze	-	System podpiętrowy	Symulacja	Produkcja wyjściowa
(Cai, Baafi, i Porter 2012)	Kompleks ścianowy	Flexsim 3d	Kopalnia węgla kamiennego	Symulacja	Wynik produkcyjny
(Gleb i Zamyatina 2012)	Zbiorniki i przenośniki	„Rudopotok”	Kopalnia podziemna	Symulacja	Spełnienie kryter. wydajności
(Gonen, Malli, i Kose 2012)	Wyciąg szybowy, przenośniki	-	Kopalnia podziemna	Wyliczenia analityczne	Koszt procesu
(Hirschi 2012)	Wozy odstawcze, kombajny CM	-	Kopalnia podziemna	Programowani e dynamiczne	Produktywność ciągu techn.
(Labrecque i Newman 2012)	Ładowarki (LHD)	Arena	System podpiętrowy	Symulacja	Koszt procesu transportowego
(Marasová, Husáková, i Gurecka 2012)	Kolej kopalniana	„EXTEND”	Kopalnia podziemna	Symulacja	Wydajność procesu
(Okolnishnikov i in. 2017; Okolnishnikov, Rudometov, i Zhuravlev 2017; 2016; 2012; 2013a; 2013b)	Kompleks ścianowy, system przenośników	MTSS	Kopalnia podziemna	Symulacja	Wsparcie sterowania operacyjnego (wydajność procesu)
(Pop-Andonov, Mirakovski, i Despodov 2012)	Kolej kopalniana, wozy odstawcze	Arena	Kopalnia podziemna	Symulacja	Efektywność procesu
(Abubakary Salama i Greberg 2012)	Ładowarki (LHD), wozy odstawcze	SimMine	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produkcja wyjściowa, wykorzystanie maszyn

Publikacje pochodzące z lat 2006–2012 stanowią liczny zasób przykładów realizacji modeli symulacyjnych. Opisane badania symulacyjne dotyczą zróżnicowanych systemów wydobywczych, jak i maszyn oraz urządzeń realizujących proces transportu urobku. Poza wykorzystaniem wyników badań na poziomie podejmowania decyzji strategicznych bądź doskonalenia metod organizacji procesu ze szczególnym uwzględnieniem doboru maszyn i urządzeń przegląd literatury pozwala zidentyfikować przypadki, w których model symulacyjny szerzej wykorzystany jest we wsparciu on-line w zakresie sterowania transportem urobku. W tym okresie zdecydowana większość badań realizowana była w środowiskach symulacyjnych dedykowanych głównie zastosowaniom w przemyśle produkcyjnym lub logistyce.

2.1.5. Badania symulacyjne jako integralny element zarządzania procesem transportu urobku

Począwszy od roku 2013 do chwili obecnej, w ocenie autora badaniami symulacyjnym w sposób mniej lub bardziej jawny towarzyszy adaptacja koncepcji tzw. cyfrowego bliźniaka (ang. *Digital Twin*) oraz propozycji zawartych w platformie tzw. Przemysłu 4.0 zaprezentowanej w 2013 przez firmę BOSH oraz Niemiecką Akademię Nauk. Oczekiwany wzrost cyfryzacji we wszystkich sektorach produkcji, dostępność nowych rozwiązań technologicznych z szczególnym uwzględnieniem rozwiązań tzw. Przemysłowego Internetu Rzeczy – IIoT (ang. *Industrial Internet of Things*), aparatury pomiarowej (m.in. lidarów, dronów, systemów wizyjnych, systemów pozycjonowania, akcelerometrów) skutkują dalszym zwiększeniem ilości danych, w efekcie koncentrując uwagę na sposobach ich praktycznego wykorzystania. W rezultacie, w załączonych poniżej pracach, badania symulacyjne częściej wskazywane są jako element większego systemu zarządzania, pomimo że ich wybiórczy charakter zdaniem autora nadal nie dostarcza kompleksowego, systemowego rozwiązania dla problemów zdefiniowanych w obszarze transportu urobku w kopalni podziemnej.

W artykułach (Kulinowski 2013; Kulinowski 2014) przedstawiono badania symulacyjne jako nieodłączną i istotną część zintegrowanego procesu projektowania przenośników taśmowych dla górnictwa podziemnego. Badania symulacyjne prowadzono z wykorzystaniem dynamicznego modelu przenośnika taśmowego o parametrach rozłożonych, którego integralną część stanowią modele urządzeń napinających taśmę. W ocenie autora prac badania symulacyjne realizowane na etapie projektowania przenośnika umożliwiają dobór właściwych podzespołów, optymalnych parametrów ruchowych oraz prawidłowych nastaw układów regulacji, co skutkuje znacznym ograniczeniem przyszłych problemów eksploatacyjnych.

W oryginalny sposób kwestia modelowania procesu transportu urobku została przedstawiona w pracy (Meng i in. 2013), gdzie opracowany model, jak twierdzą jego autorzy, może być stosowany zarówno w kopalniach odkrywkowych, jak i podziemnych. Do głównych cech wyróżniających zastosowane rozwiązanie na tle pozostałych zaliczyć można to, że uwzględnia on rozwój kopalni i związane z nią zmiany w obrębie jej struktury, jak również dostarcza przetworzone dane wynikowe w formacie niewymagającym szczegółowej pracochłonnej interpretacji. Model wykorzystuje w celach opisowych sieć Petriego oraz zawiera szereg klas odwzorowujących zachowanie różnych obiektów w tym: maszyn górniczych, samojezdnych maszyn transportowych, kruszarek, zbiorników, przenośników taśmowych i pociągów. Model ten obsługuje informacje o cechach jakościowych transportowanego urobku. Symulacja realizowana jest w oprogramowaniu Arena umożliwiając weryfikację scenariuszy „co – jeżeli”, koncentrując uwagę na kwestiach ogólnej wydajności procesu. Model ten nie uwzględnia

jednak charakterystyk i cech niezawodnościowych obiektów, co jak komentują autorzy wymaga kontynuacji prac rozwojowych.

Rozwiązanie ściśle dedykowane konkretnemu problemowi decyzyjnemu zostało opisane w pracy (Mankge 2013). Opracowany w środowisku Arena model został tu użyty między innymi do określenia wielkości i położenia zbiorników urobku w obrębie systemu odstawy taśmowej. Metodyka prowadzenia badań koncentruje uwagę wokół teorii ograniczeń oraz analizy rodzajów i skutków możliwych błędów – FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*). Równie mocno ukierunkowany model symulacyjny, koncentrujący uwagę na kwestiach związanych z obsługą środków realizacji procesu odstawy urobku został opisany w publikacji (Pascual, Martínez, i Giesen 2013). Zmiennymi wejściowymi do systemu wsparcia decyzyjnego była wielkość parku maszynowego oraz poziom obsługi technicznej obiektów. Wyjściowe parametry stanowiła dwukryterialna funkcja oceny dostępności maszyn oraz końcowej wydajności procesu transportowego. W pracy użyto modelu analitycznego bazującego na teorii kolejek, jednak przewidziano również przyszłą możliwość weryfikacji wyników z użyciem modelu symulacyjnego.

W artykule (Shelswell, Fitzgerald, i Labrecque 2013) autorzy przeprowadzili dyskusję nad porównaniem szeroko stosowanych metod analitycznych z metodami symulacyjnymi w odniesieniu do oceny zapotrzebowania na wozy odstawcze w kopalni podziemnej. Opracowany model symulacyjny został wykonany w środowisku Arena. Kluczowe wnioski z realizacji pracy obejmowały potwierdzenie przydatności metod analitycznych w zakresie małej lub średniej skali produkcji i zdecydowanie lepszą dokładność modeli symulacyjnych w przypadku złożonych systemów produkcyjnych.

Symulacyjne testy różnych strategii organizacji procesu transportowego oraz planów prowadzenia wyrobisk transportowych stanowią przedmiot pracy (Fioroni i in. 2014). Autorzy publikacji przeprowadzili szereg symulacji dla różnych scenariuszy obejmujących z osobna warunki realizacji procesu właściwe dla danej jednostki czasu – roku kalendarzowego. W ramach pracy przeprowadzono eksperymenty symulacyjne, które pozwoliły na wybór najlepszego scenariusza, który zabezpieczał realizację procesu na wymaganym poziomie przy minimalnych zasobach sprzętowych. Model symulacyjny opracowany w środowisku Arena pozwalał na dostosowanie zasad organizacji ruchu wozów odstawczych. Jego weryfikacja odbywała się przez deterministyczne kalkulacje dla modelu bazowego i porównanie wyników. Autorzy nie uwzględnili systemu przydziału zadań dla maszyn, z którym osiągnięte wyniki prawdopodobnie byłyby jeszcze bardziej zbliżone do rzeczywistych wartości.

W publikacji (Salama 2014) dokonano porównania dwóch różnych rodzajów wozów odstawczych TH660 oraz TH430, jak i konfiguracji współpracy tychże maszyn transportowych z ładowarką (LHD) w różnych warunkach. Pozostałe prace autora obejmują zastosowanie symulacji dyskretnej oraz metod optymalizacji (MIP) w odniesieniu do maszyn samojezdnych stosowanych w odstawie urobku (Salama 2014; Salama 2014; Salama 2017; Salama, Nehring, i Greberg 2014; 2016) jak również szersze zastosowanie metod symulacji dyskretnej. Autor w swoich pracach koncentruje uwagę na optymalizacji zużycia zasobów technicznych w celu realizacji procesów transportowych, jak i całkowitych kosztach procesu.

Kolejna z prac ujętych w przeglądzie stanowi przykład modelu opracowanego dla środków odstawy kołowej stosowanych w systemie wybierania komorowo-filarowego kopalń rudy miedzi w Polsce, który został opisany w pracy (Kowalski i in. 2014). Autorzy pracy, wykorzystując uproszczoną topologię wyrobisk, testują różne konfiguracje współpracy maszyn samojezdnych oraz strategię współpracy systemu ciągłego – przenośnikowego z maszynami samojezdnymi w aspekcie wymaganej odległości do punktu załadunkowego. Badania symulacyjne przeprowadzone w pracy wykonane zostały w oprogramowaniu MS Excel i stanowiły zorientowaną przestrzenie implementację modelu

analitycznego. Ostatecznie w modelu szacowany był koszt procesu transportowego właściwy dla poszczególnych wariantów i rozwiązań.

Treść pracy (Haviland i Marshall 2015) opisuje model symulacyjny przeznaczony do oceny procesu transportu urobku wozami w obrębie systemu wyrobisk upadowych. Opracowany model symulacyjny umożliwił testowanie systemu transportowego w celu identyfikacji i zrozumienia specyficznych zjawisk i procesów charakterystycznych dla analizowanego przypadku. Końcowe wyniki działania modelu obejmują wzorce ruchu – charakterystyki z wykorzystaniem których możliwa jest poprawa efektywności procesu dla danych warunków, różnych przypadków jego realizacji oraz problemów decyzyjnych.

Symulacja procesu transportowego, traktowanego jako część kompleksowych badań obejmujących cały ciąg wydobywania podziemnej kopalni rud metali została przedstawiona w pracy (Sjodin 2015). Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku SimMine. Podobny przypadek obejmujący porównanie dwóch różnych konfiguracji prowadzenia przodków w systemie komorowym został również opisany w pracy (Ahmed, Scoble, i Dunbar 2016). Oba przypadki dotyczyły wykorzystania ładowarek (LHD) w procesie odstawy.

W dalszej kolejności należy wyróżnić pracę (Xiao-Ping, Yu-Hong, i Ya-Nan 2015), w której zaprezentowano nowe podejście do analizy mieszanych systemów odstawy urobku składających się z przenośników i zbiorników retencyjnych. Jak zauważają autorzy pracy, tego rodzaju połączenie zostało nazwane „miękkim” lub elastycznym ciągiem transportowym w latach 50. przez polskiego profesora J. Kerpa. W artykule wykorzystano symulację komputerową w celu określenia zmienności wypełnienia zbiornika urobku w aspekcie wielodniowej analizy, następnie na podstawie wyników symulacji oszacowano niezawodność systemu w funkcji pojemności zbiornika urobku. Jak konkludują autorzy, metoda ta może być z powodzeniem wykorzystana w celu analizy optymalnej wielkości i położenia zbiorników urobku w podziemnych systemach odstawy taśmowej.

Autorzy (Anani i Awuah-Offei 2016) w swoich badaniach wykorzystują symulację dyskretną (metodą DES) do oszacowania ilości wozów odstawczych przeznaczonych do realizacji procesu odstawy urobku w podziemnej kopalni węgla. Opracowany model symulacyjny odwzorowywał logikę działania wozów odstawczych wynikającą zarówno z zasad organizacji procesu, jak i stanu technicznego maszyny – szczegółowo stanu naładowania akumulatorów trakcyjnych. Oprócz opisu realizowanych badań jak i wyników pracy, które obejmowały najbardziej optymalną konfigurację, autorzy zamieścili dopasowane na podstawie danych empirycznych rozkłady czasów poszczególnych operacji realizowanych przez obiekty ujęte w symulacji. Szersze opracowanie obejmujące tę tematykę oraz rozbudowujące je o istotne elementy optymalizacji, zostało zamieszczone w pracy (Anani 2016).

W opracowaniu (Fukui i in. 2016) zaprezentowano model symulacyjny pozwalający na wieloscenariuszową analizę działania systemu transportowego kopalni podziemnej. Opisany przypadek dotyczył reguł pracy samojezdnych ładowarek (LHD). Wyniki realizacji pracy pozwoliły na przeprowadzenie dyskusji dotyczącej potencjalnych zmian w systemie transportowym, wraz ze wskazaniem kluczowych miar efektywności opisujących każdą z alternatyw.

Kolejny materiał źródłowy to praca (Greberg i in. 2016), w której opisano wykorzystanie dyskretnego modelu symulacyjnego (DES) w celu oceny funkcjonowania systemu odstawy urobku ładowarkami i wozami odstawczymi. Przypadek dotyczył eksploatacji systemem podpiętrowym z zawałem skał stropowych i obejmował w szczególności alternatywne scenariusze przyszłego rozwoju systemu transportowego, w tym dobór ilościowy maszyn pod względem ich ładowności.

Autor publikacji (Kościelny 2016) podejmuje tematykę optymalizacji pracy ładowarek oraz wozów odstawczych w ZG Lubin. Główne cele budowy modelu optymalizacyjnego wynikające z potrzeb racjonalizacji procesu odstawy obejmują szczegółowo:

- wyznaczenie najefektywniejszej drogi odstawy urobku przez ładowarkę kopalnianą przy systemie współpracujących maszyn,
- określenie najdłuższej drogi odstawy urobku, przy której odstawa z wykorzystaniem jedynie ładowarki ŁK-2 jest jeszcze efektywna.

Model optymalizacyjny służy do wyznaczenia charakterystyk, które stanowią wymierną pomoc dla doboru najbardziej uzasadnionej konfiguracji maszyn w zmiennych warunkach realizacji procesu.

W opracowaniu (Liu i in. 2017) zawarty został opis modelu symulacyjnego odwzorowującego ruch urobku w obrębie przenośnika zgrzeblowego stosowanego w górnictwie węgla. Autor za pomocą uproszczonego modelu symulacyjnego przenośnika opracowanego w oprogramowaniu Matlab, analizuje rozkład masy na poszczególnych odcinkach przenośnika.

Skrajnym przypadkiem zastosowań mieszczących się w tematyce niniejszej pracy jest publikacja dotycząca grawitacyjnego transportu urobku w systemie podpiętrowym (Lapčević i Torbica 2017). Autorzy w celu oszacowania rozdrobnienia urobku posługują się modelem z elementami dyskretnymi. Praca ta zwraca uwagę na to, że określenie i analiza wyjściowych parametrów fizycznych urobku też mogą stanowić cel symulacji.

Praca (Mahieu 2018) podobnie jak wcześniejsze pozycje obejmuje problematykę doboru właściwych maszyn samojezdnych w celach realizacji procesu odstawy urobku. Podjęte zagadnienie badawcze koncentruje uwagę na sytuacji, w której ze wzrostem głębokości zalegania złóż odstawa wozami samojezdnymi wymaga zwiększenia ich ładowności celem zbilansowania rosnących kosztów wydobycia, tymczasem stan ten znajduje się w opozycji do wymagań ze strony warunków geologiczno-górnictwowych, które dopuszczają zastosowanie jeszcze mniejszego gabarytem wyposażenia.

Niecodzienną, zważywszy na tematykę niniejszej pracy, jest publikacja (Wang i in. 2016), w której autor, stosując symulację elementów dyskretnych w oprogramowaniu EDEM, bada siły boczne oddziaływujące na przenośniki rurowe stosowane w górnictwie podziemnym. Podobny tematycznie artykuł (Doroszuk, Król, i Gładysiewicz 2019) dotyczy przenośników taśmowych stosowanych w górnictwie.

Szerokie spektrum problemów związanych z realizacją procesu transportu urobku w kopalni podziemnej z wykorzystaniem ładowarek (LHD) zostało przedstawione w serii prac (Skawina, Greberg, Astrand, i in. 2019; Skawina, Greberg, Salama, i in. 2019; Skawina, Salama, i in. 2019; Skawina, Salama, i Greberg 2019). Badania symulacyjne w tym przypadku prowadzono w oprogramowaniu SimMine oraz Automod.

Tabela 2.6. Podsumowanie piśmiennictwa w okresie 2013–2019 (opracowanie własne).

Bibliografia	Środki transportowe	Narzędzie symulacyjne	Miejsce zastosowania	Technika	Kryteria analityczne
(Kulinowski 2014; Kulinowski 2013)	Przenośnik	Matlab	Kopalnia podziemna	Symulacja (ODE)	Optymalizacja konstrukcji
(Meng i in. 2013)	Wozy, przenośniki, kruszarki	Arena	Podziemna i odkrywkowe kopalnie węgla	Symulacja dyskretna	Wydajność

(Mankge 2013)	Przenośniki, zbiorniki	Arena	Kopalnia podziemna węgla	Symulacja	Niezawodność
(Pascual, Martínez, i Giesen 2013)	Ładowarki (LHD)	-	Kopalnia podziemna	Model analityczne (kolejkowy)	Niezawodność (szacowana jako dostępność i wydajność)
(Shelswell, Fitzgerald, i Labrecque 2013)	Wozy odstawcze	Arena	Kopalnia podziemna	Symulacja	Planowanie rozmiaru floty pojazdów
(Fioroni i in. 2014)	Wozy odstawcze, rampa, wyciąg szybowy, zbiornik	Arena	Kopalnia podziemna złota	Symulacja	Wydajność, wykorzystanie
(Salama 2017; Salama 2014; Salama 2014; Salama, Nehring, i Greberg 2016; 2014)	Wozy odstawcze, ładowarki (LHD)	SimMine	Kopalnia podziemna	Symulacja i optymalizacja (MIP)	Produkcja wyjściowa
(Kowalski i in. 2014)	Wozy odstawcze, ładowarki, punkt załadunkowy	Excel	Kopalnia podziemna	Model analityczny	Koszt całkowity procesu transportowego
(Haviland i Marshall 2015)	Wozy odstawcze	Matlab	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produktywność
(Sjodin 2015)	Ładowarki (LHD)	SimMine	Kopalnia podziemna rudy	Symulacja	Produktywność
(Xiao-ping, Yu-hong, i Ya-nan 2015)	Przenośniki, zbiorniki	-	Kopalnia podziemna	Symulacja	Niezawodność
(Ahmed, Scoble, i Dunbar 2016)	Ładowarki (LHD)	ExtendSim	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produktywność
(Anani i Awuah-Offei 2016; Anani 2016)	Shuttle cars	Siman, Arena, ILOG CPLEX	Kopalnia podziemna węgla	Symulacja	Wykorzystanie i produktywność
(Fukui i in. 2016)	Ładowarki (LHD)	Matlab	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produktywność
(Greberg i in. 2016)	Ładowarki (LHD)	SimMine	Kopalnia podziemna	Symulacja	Wykorzystanie i produktywność
(Kościelny 2016)	Ładowarki (LHD), wozy odstawcze	-	Kopalnia podziemna	Optymalizacja	Wykorzystanie i produktywność
(Liu i in. 2017)	Przenośnik zgrzeblowy	Matlab	Kopalnia podziemna węgla	Symulacja	Parametry fizyczne
(Lapčević i Torbica 2017)	Transport grawitacyjny	EDEM	Kopalnia podziemna	Symulacja	Właściwości urobku
(Mahieu 2018)	Ładowarki (LHD), wozy odstawcze, przenośnik	SimuLink/SimEvents	Kopalnia podziemna	Symulacja	Koszt jednostkowy procesu
(Wang i in. 2016; Doroszuk, Król, i Gładysiewicz 2019)	Przenośniki taśmowe, przenośniki rurowe	EDEM	Kopalnia podziemna	Symulacja	Parametry fizyczne

(Skawina, Greberg, Astrand, i in. 2019; Skawina, Greberg, Salama, i in. 2019; Skawina, Salama, i in. 2019; Skawina, Salama, i Greberg 2019)	Ładowarki (LHD)	AutoMOD, SimMine	Kopalnia podziemna	Symulacja	Produktywność
---	-----------------	------------------	--------------------	-----------	---------------

Poza wymienionymi uprzednio pozycjami literaturowymi z uwagi na inny cel wykonanych badań symulacyjnych wyróżnić należy prace (Thiruvengadam, Zheng, i Tien 2016; Zheng i in. 2015). Przedstawiono w nich zastosowanie modelu symulacyjnego (CFD) w analizie stężeń cząstek stałych emitowanych w atmosferze kopalni podziemnej stosującej maszyny samojezdne z silnikami diesla. Uwagę zwraca również praca (Zhao i in. 2016), w której przedstawiono model symulacyjny umożliwiający analizę stężeń radonu w pobliżu szybów wydobywczych, uwzględniający stan i położenie środków transportu urobku. Obie pozycje literaturowe obejmując tematykę symulacji procesu odstawy urobku, stanowią przykład zastosowania bardzo specyficznych kryteriów analitycznych procesu transportowego urobku.

2.1.6. Modele symulacyjne stosowane poza górnictwem podziemnym

Wykonane studium literatury, poza opisanymi uprzednio źródłami, pozwala wskazać szereg publikacji pokrewnych tematyce niniejszej pracy, lecz różniących się zasadniczo przedmiotem odwzorowania w modelu symulacyjnym. Do zastosowań wykazujących względnie duże podobieństwo warunków realizacji procesu transportowego zaliczyć można m.in.: instalacje przeróbki surowców, kopalnie odkrywkowe, huty metali, terminale przeładunkowe. Przykłady te opisano w bardzo ograniczonym stopniu w dalszej części rozdziału.

Na wstępie, ze względu na zakres stosowania przenośników taśmowych, wymienić należy pierwsze podejścia do wspomaganego komputerowo planowania systemu odstawy taśmowej, które zawarte są w pracach (Sanford i Manula 1965) oraz (Manula i Sanford 1967). Pokrewna symulacja działania przenośników taśmowych ukierunkowana na zwiększenie efektywności energetycznej, obejmująca model energetyczny działania urządzenia, została szczegółowo przedstawiona również w pracach (Zhang i Xia 2010; 2011) oraz (Mathaba i Xia 2015). Wśród prac skoncentrowanych na tematyce modelowania ciągów przenośników taśmowych wymienić można również publikację (Fioroni i in. 2007), w której na przykładzie huty stali oraz funkcjonujących w jej obrębie przenośników taśmowych transportujących rudę, zaprezentowano metodę dyskretyzacji ciągłych systemów transportowych. Metoda ta opiera się na zastąpieniu ciągłego przepływu urobku skończoną ilością dyskretnych porcji urobku umownie zlokalizowanych w pewnych odcinkach trasy przenośnika. Umożliwia to w praktyce symulację zarówno ciągłych, jak i dyskretnych systemów transportowych za pośrednictwem dyskretnego modelu symulacyjnego. W kolejnym z artykułów poświęconych tej tematyce (van Vianen, Ottjes, i Lodewijks 2016) zaprezentowano przykład symulacji działania skomplikowanego układu przenośników taśmowych w suchym doku. Celem budowy modelu było wyznaczenie optymalnej struktury połączeń przenośników taśmowych. Autorzy (Bécharde i Côté 2013) za pośrednictwem modelu symulacyjnego implementowanego w środowisku Flexsim wykonali analizę kolejnych działań umożliwiających zwiększenie wydajności terminalu przeładunkowego. W celu realizacji eksperymentów symulacyjnych

opisano i wykorzystano nową technikę symulacji układów ciągłych i dyskretnych za pośrednictwem modelu dyskretnego (ang. Discrete Rate Simulation).

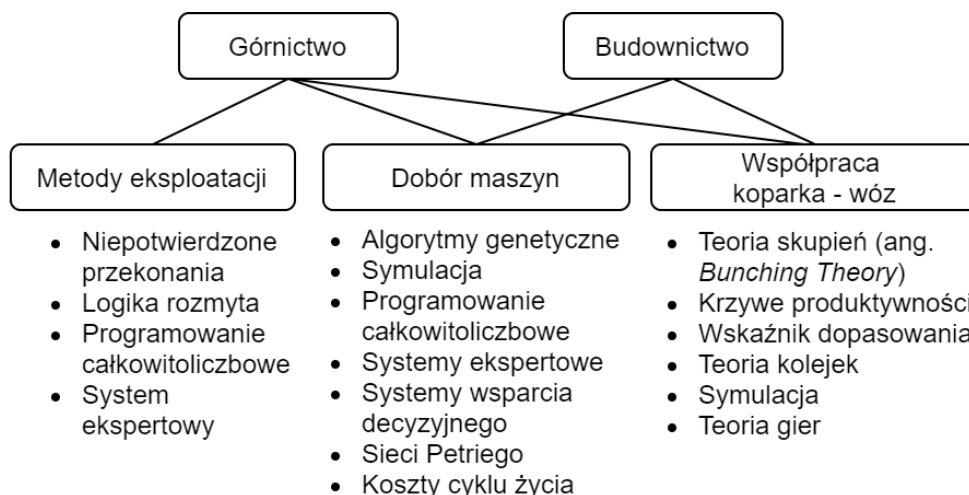
Część prac obejmuje swoim zakresem procesy transportowe urobku, jednak dotyczy ciągu produkcyjnego kopalń znajdującego się na powierzchni lub końcowo na etapie zasilania w paliwo węglowe kotłów energetycznych. W studium (Harmse 2007) przedstawiona została symulacja wykonana w celu wykonania odpowiedniego mieszania węgla pochodzących z różnych kopalń według zapotrzebowania energetycznych jednostek wytwórczych. W zbliżonej tematycznie pracy dotyczącej obiektów energetyki zawodowej (Karkula i Bukowski 2012) zastosowanie znalazł model dyskretny symulacyjny (DES). W opracowaniu (González, Rayo i Campos 2012) podobnie zastosowano symulację typu DES w celu optymalizacji pracy zakładu przeróbki surowca.

Zbliżona tematyka zastosowania symulacji komputerowych w optymalizacji składu transportowanego węgla stanowi treść artykułu (Sandeman i in. 2010), w którym na bazie modelu symulacyjnego oraz metod programowania liniowego przedstawiono przykład optymalizacji pracy szeroko rozumianego łańcucha dostaw obejmującego procesy urabiania, składowania, transportu i spedycji surowca w celu osiągnięcia zadanych parametrów jakościowych, przy przyjętych ograniczeniach natury technicznej. W modelu symulacyjnym kopalni odkrywkowej wykorzystano metodę kolejnych zdarzeń (DES). W artykule (Que, Awuah-Offei, i Frimpong 2016) na przykładzie kopalni piasków roponośnych zaprezentowano możliwości modelu symulacyjnego w zakresie poprawy efektywności procesu oraz doskonalenia budowy systemu ciągłej odstawy urobku z wykorzystaniem przenośników taśmowych. Autorzy (Michalakopoulos, Arvaniti, i Panagiotou 2005; Michalakopoulos i in. 2015; Michalakopoulos 2017) zaprezentowali model symulacyjny wykonany w środowisku Arena służący do analizy ciągłego systemu odstawy urobku w kopalni odkrywkowej. Model ten obejmował sieć przenośników taśmowych o łącznej długości ok. 16 km. Wśród prac traktujących o zintegrowanych ciągach transportowych w obrębie kopalń odkrywkowych na uwagę zasługują prace: (Panagiotou 2018), (Shishvan i Benndorf 2014), (Franzese i in. 2011), (Galiyev, S Zh, Boyandinova, i Adilkhanova 2010), (O'Connell i Sturgul 2010). Wyróżnia się tutaj również praca (Tenorio 2012), dotycząca zastosowania systemu wsparcia decyzyjnego w celu optymalizacji parametrów jakościowych surowca wyjściowego. Interesujący przykład symulacji typu DEM sporządzonej dla punktów przesypowych urobku w obrębie ciągów odstawy taśmowej na powierzchni, został opisany w publikacji (Minkin 2012).

Rozpatrując tematykę poświęconą stricte symulacjom procesów transportowych w kopalniach odkrywkowych, można stwierdzić, że przeważająca ilość publikacji poświęcona została kwestiom doboru i organizacji pracy wozów odstawczych. Dotyczy to w szczególności wymaganej liczebności floty pojazdów oraz zasad doboru i alokacji maszyn w funkcji zadań produkcyjnych oraz parametrów technicznych. Zagadnienia te są szerzej definiowane jako system dyspozycji wozami (ang. *truck dispatching system*) lub problem dopasowania zespołu koparka-wóz (ang. *truch-shovel mathing*). Na tle pozostałych publikacji kompleksowym i dosyć uniwersalnym podejściem w zakresie rozumienia modelowania pracy maszyn samojezdnych charakteryzują się prace (Blouin, Guay, i Rudie 2001; 2007). Interesujące, zważywszy na tematykę niniejszej pracy, są również publikacje (Lashgari, Yazdani, i Sayadi 2010; Lashgari i in. 2012) w których autorzy posłużyli się wielokryterialnymi metodami wyboru środków realizujących proces transportowy.

Zgromadzony zbiór opracowań dotyczących kopalń odkrywkowych ze względu na swoją liczebność przekraczającą kilkaset pozycji literaturowych w okresie 2000–2019 nie został szerzej opisany w pracy. Większość poruszanych w nich zagadnień w uporządkowany, syntetyczny sposób została opisana w publikacji (Burt i Caccetta 2018).

Wykonany przegląd literatury z powodzeniem uzupełnić można o dalsze pozycje literaturowe o charakterze przekrojowym, podsumowujących osiągnięcia w zakresie stosowania symulacji komputerowej lub analizy wielokryterialnej. Jeden z pierwszych przeglądów stanu wiedzy na temat zastosowania symulacji w górnictwie został dokonany w 1997 roku w pracy (Sturgul i Li 1997). Warto odnotowania jest to, że autorzy zwarli w niej między innymi publikacje dotyczące tzw. równoległych symulacji metodą kolejnych zdarzeń (ang. *Parallel Discrete Event Simulation*, PDES). Pewne uporządkowanie wiedzy i pojęć w stosunku do wymagań symulacji działalności górniczej zostało zaprezentowane w pracy (Ritter 1998). Kolejny przegląd literatury (Basu i Baafi 1999) obejmował już strictly zastosowanie symulacji w kopalniach australijskich. Autorzy wiele uwagi poświęcili wykorzystywanemu w tym celu oprogramowaniu. Praca (Panagiotou 1999) obejmowała analogiczny przegląd zastosowań w obrębie kopalń europejskich, natomiast (Sturgul 1999) w obrębie kopalń prowadzących eksploatację w USA. W ostatniej z wymienionych prac autor zauważa wyraźny spadek wykorzystania języka Fortran na rzecz GPSS mający miejsce w połowie lat 80. Kontynuując badania literaturowe można odnaleźć przegląd zastosowań symulacji w kopalniach zlokalizowanych w Południowej Afryce (Turner 1999). Kolejny, krótki przegląd prac został zawarty w publikacji (Sturgul 2001) i dotyczył w większości kopalń podziemnych. W 2005 roku w pracy (Burt, Caccetta i Welgama P. 2005) wykonany został przegląd metod doboru maszyn stosowanych w działalności górniczej przedstawiający propozycję podziału metod modelowania dla poszczególnych zagadnień (rys. 2.5).



Rysunek 2.5. Podział metod modelowania zagadnień związanych z doбором maszyn w branży górniczej i budowlanej (Burt, Caccetta, Welgama 2005).

Następna z prac o charakterze przeglądowym (Alford, Brazil, i Lee 2007) poświęcona została tematyce optymalizacji działalności w kopalniach podziemnych. Szeroki przegląd literatury obejmujący wszystkie gałęzie produkcji ujęty został również w pracach (Jahangirian i in. 2010) oraz (Tako i Robinson 2012). Przegląd ten pozwala między innymi stwierdzić bardzo wysoki stopień wykorzystania symulacji typu DES – jako domyślnej metody badawczej. Część zastosowań symulacji w obrębie procesów transportowych została opisana w pracach (Newman i in. 2010) oraz (Bjørndal i in. 2012) traktujących strictly o badaniach operacyjnych. Koncentrując uwagę wyłącznie na rozbudowanych systemach przenośników taśmowych, szeroki przegląd literatury został zwarty w pracy (He i Li 2011). Równie kompleksowy przegląd zastosowań symulacji dyskretnej w obszarze transportu urobku w kopalniach odkrywkowych i podziemnych przeprowadzono w pracy (Tarshizi 2014). Dotyczył on szczegółowo zakresu czasowego od 2008 do 2014 roku. Autor dodatkowo przedstawił najczęściej wykorzystywane w tym celu oprogramowanie. Wyniki jego badań zamieszczono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Wykaz oprogramowania użytego w celach symulacyjnych wskazanego w pracy (Tarshizi 2014) w latach 2008-2014.

Wyszczególnienie	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ARENA®	1	3	3	1	3	4	2
GPSS/H®			2	1		1	2
AutoMOD®	2	1		1			
Simul8®	1	1					
SimMine®		1		1	2		2
Pozostałe	1	1	5	2	4	1	2

Pewne uzupełnienie opisanej dotychczas tematyki może stanowić publikacja opisująca zbiorczo tematykę efektywności energetycznej procesu odstawy urobku (Awuah-Offei 2016). Jedną z kluczowych publikacji o charakterze przeglądowym jest również pozycja (Sitorus, Cilliers, i Brito-Parada 2019), w której autorzy zebrali dane na temat zastosowanych metod wielokryterialnej analizy we wsparciu decyzyjnym w górnictwie. Wyniki pracy wskazują na dominującą rolę metody AHP oraz metod hybrydowych oraz marginalnie niskie wykorzystanie metod takich jak TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE czy VIKOR. Swoistym uzupełnieniem tej pracy jest pozycja literaturowa (Mardani i in. 2015), w której ujęte zostały przypadki analizy wielokryterialnej w obrębie systemów transportowych poza górnictwem. W ocenie autorów znaczący udział prac wykorzystuje mieszane metodyki oceny wielokryterialnej lub odmianę AHP. Przegląd pozwala stwierdzić, że najwięcej tego rodzaju analiz wykonywanych jest w branży lotniczej. Na odnotowanie zasługuje praca (Brito i in. 2010), w której autorzy podejmują temat wielokryterialnej analizy procesów logistycznych na przykładzie huty stali z wykorzystaniem symulacji klasy DES. Problematyce podsumowania wiedzy o wykorzystaniu badań symulacyjnych w zagadnieniach związanych z produkcją poświęcone zostały prace (Mourtzis, Doukas, i Bernidaki 2014; Negahban i Smith 2014). Tematyce wyboru właściwego oprogramowania do symulacji został z kolei poświęcony przegląd (Nikoukaran i Paul 1999).

2.2. Identyfikacja docelowych zastosowań i kryteriów analitycznych

Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił w sposób szczegółowy uzupełnić i usystematyzować kluczowe zastosowania dynamicznych modeli symulacyjnych procesów transportowych.

Wśród nich wymienić można przede wszystkim:

- zrozumienie podstawowych relacji i interakcji pomiędzy środkami lub systemami transportu,
- długookresowe planowanie alternatywnych scenariuszy rozwoju systemu transportowego,
- zwiększenie wykorzystania środków transportowych w funkcji wydajności i czasu pracy,
- ocenę metod redukcji kosztów funkcjonowania systemu transportowego (koszty inwestycji, efektywność energetyczna, koszty materiałów, koszty obsługi),
- szkolenie operatorów maszyn i dyspozytorów kopalni,
- zwiększenie zdolności transportowych, retencyjnych i elastyczności systemu (w tym identyfikacja i zarządzanie wąskimi gardłami),
- ocenę niezawodności systemu i planowanie przedsięwzięć minimalizujących skutki awarii,
- ocenę aktualnych cech i zdolności systemu w aspekcie: sortowania (separowania i selektywnego gromadzenia), mieszania, przesiewania, kruszenia, oraz suszenia urobku,

- identyfikację potencjalnych rozwiązań technicznych, metod organizacji i sterowania pracą systemu pozwalających na:
 - homogenizację urobku (wydobycie selektywne, zarządzanie skałą płoną),
 - mieszanie urobku - stabilizację parametrów nadawy (ang. *Blending*).
- bieżące wsparcie operacyjne w drodze modelowania numerycznego i śledzenia przepływu masy urobku on-line (ang. *Traceability*) na podstawie danych z zabudowanej lokalnie, rozproszonej w przestrzeni aparatury pomiarowej, w celu:
 - identyfikacji parametrów źródłowych urobku oraz zmian jego parametrów, takich jak: skład, wilgotność, granulacja,
 - wizualizacji stanu systemu i predykcja jego działania w krótkim horyzoncie czasowym,
 - realizacji sterowania nadrzędnego (ang. *Advanced Process Control*) m.in. z zastosowaniem kontrolerów typu MPC (ang. *Model Predictive Control*).
- odwzorowanie przebiegu konkretnych zdarzeń, badanie skrajnych warunków pracy systemu,
- doskonalenie budowy maszyn i urządzeń w drodze poprawnej identyfikacji rzeczywistych warunków eksploatacji.

Istnienie tak wielu zastosowań posiada swoje odzwierciedlenie w docelowej ilości kryteriów analitycznych. Co więcej, realizowana na wzór większości powołanych w rozdziale prac – scenariuszowa analiza procesów transportowych, jeśli miałaby mieć charakter quasi-optimalizacji, powinna się opierać na pewnych określonych danych wejściowych – zmiennych, w funkcji których wykonywana będzie wielokryterialna analiza procesu transportowego. Z uwagi na ten fakt, można dokonać również następującego grupowania przedmiotów analizy:

- organizacja zmian produkcyjnych (ilość zmian, czas trwania zmian, czas przerw produkcyjnych, sposób i miejsce wymiany załogi),
- charakterystyki eksploatacyjne obiektów technicznych, opisujące:
 - uszkodzalność, naprawialność i dostępność obiektów,
 - charakterystyki użytkowe (czasy przejazdu, załadunku, rozładunku, zużycia energii i paliwa w zależności od warunków pracy);
- konfiguracja systemu, tj.:
 - struktura połączeń systemu,
 - dobór obiektów funkcjonalnych realizujących proces transportowy,
 - dobór parametrów techniczno-ruchowych obiektów;
- czasoprzestrzenna alokacja elementów systemu (drogi transportowe, zbiorniki, miejsca tankowania, komory maszyn),
- metody interakcji i komunikacji elementów systemu (m.in. maszyn samojezdnych),
- zasady alokacji i przydzielania zadań transportowych, reguły współpracy maszyn samojezdnych,
- sposób sterowania i regulacji stanu systemu (wybór alternatywnych dróg transportowych, stan otwarcia kłap w zbiornikach, prędkość taśmy przenośników).

Dokonany przegląd zastosowań umożliwił ostatecznie identyfikację trzech podstawowych kryteriów analizy procesów transportowych. Uzasadnione wydaje się, aby wielokryterialna analiza procesów transportowych w szczególności obejmowała następujące aspekty stanowiące kluczowe kryteria oceny procesu transportu urobku:

- koszty procesu (destymulanta) – należy do nich zaliczyć m.in. koszty inwestycyjne, materiałowe, energii, wynagrodzenia,

- ciągłość procesu (stymulanta) – rozumianą jako dostępność i stopień pewności realizacji procesu, wyrażony miarami: dostępności, niezawodności, naprawialności, możliwościami retencji oraz rezerwą strukturalną umożliwiającą zarządzanie wąskimi gardłami w procesie wydobywania i transportu urobku,
- cechy technologiczne procesu (stymulanta) – w głównej mierze powiązane ze zmianą właściwości urobku wyjściowego wynikające z takich działań jak m.in.: kruszenie, suszenie, mieszanie, separacja (homogenizacja) urobku.

Innymi słowy, proces transportowy powinien być realizowany w sposób uzasadniony ekonomicznie, przy zachowaniu jak najwyższej niezawodności, nie wpływając negatywnie na właściwości urobku, a jeśli to możliwe, prowadząc do uzyskania najkorzystniejszych parametrów urobku wyjściowego przy jednoczesnym jak najniższym koszcie własnym.

Układ ten można uzupełnić o pośrednie kryteria takie jak: sterowalność, elastyczność oraz wydajność procesu transportowego, rozumiane całościowo jako pewnego rodzaju rezerwa, umożliwiająca ograniczenie wrażliwości procesu na zakłócenia wynikłe z niepewności przyjętych założeń oraz wszelkich powstałych w otoczeniu zdarzeń. Można do nich zaliczyć: zmianę harmonogramu, wzrost wydajności wydobywania, zmiana położenia punktów załadunku, przebudowę dróg transportowych. Należy jednocześnie zwrócić uwagę, że sterowalność, wydajność i elastyczność zastępczo mogą być opisane poprzez ocenę ciągłości (niezawodności) procesu w warunkach realizacji badań z użyciem stochastycznego modelu, pozwalającego na ocenę wrażliwości procesu na zmiany parametrów wejściowych. Podobnie jak koszty procesu szacowane być mogą na podstawie wybranych wskaźników efektywności.

Podsumowując powyższe rozważania, płaszczyzna analizy wielokryterialnej może być wyznaczona układem wskaźników opisujących miary efektywności (kosztu), niezawodności (ciągłości) oraz jakości procesu (cechy technologiczne). Należy podkreślić, że tożsame miary używane są powszechnie do wyliczeń wskaźnika całkowitej efektywności wyposażenia produkcyjnego – OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*), stanowiącego element strategii doskonalenia produkcji ukierunkowanej na ogólną produktywność. Układ ten w dalszej części przyjęto za obowiązujący i uzasadniony w aspekcie realizacji tematu niniejszej pracy.

2.3. Teza, cel i zakres pracy

Krytyka dotychczasowych działań w obszarze symulacji procesów transportowych w kopalniach dotyczy w głównej mierze bardzo ograniczonych realizacji wielokryterialnej analizy procesów w obrębie kompleksowych górniczych systemów odstawy urobku. Obejmuje ona również brak zastosowania dynamicznego modelu symulacyjnego, operującego w długim horyzoncie czasowym. Opisane źródła literaturowe w większości pomijają wewnętrzne, jak i zewnętrzne interakcje procesu transportowego z innymi procesami technologicznymi realizowanymi w kopalni m.in. pracami górniczymi, co stanowiłoby o przewadze względem uproszczonego podejścia. Można zauważyć, że planowanie rozwoju kopalni to kluczowy proces realizowany w sposób ciągły, to też wyrwykowe badania izolujące każdy z elementarnych problemów decyzyjnych nie gwarantują całościowej oceny procesu transportowego. W szczególności mając na uwadze m.in. jego interakcje z innymi procesami operacyjnymi bądź utrzymaniem ruchu maszyn i urządzeń. Powołane publikacje nie definiują również szczegółowych sposobów użycia modeli w celu wykonania zróżnicowanych badań symulacyjnych oraz pomijają kwestie ich włączenia, jako narzędzia wsparcia decyzyjnego w strukturę organizacyjną kopalń. Badania symulacyjne opisywane w pracach w zdecydowanej większości mają charakter

odseparowanych działań, częstokroć o charakterze jednorazowym. Problematyka włączenia ich jako stałego elementu zarządzania procesem transportu urobku została pominięta lub wskazana jako hipotetyczna opcja wykorzystania efektów pracy.

Zaprezentowany przegląd zagadnień związanych z realizacją badań symulacyjnych w obszarze transportu urobku pozwala wysunąć następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- istnieje wiele metod modelowania symulacyjnego charakteryzujących się potencjalną użytecznością w kontekście analizy procesów transportu urobku, zróżnicowanych pod względem sposobu modelowania oraz doboru szczegółowości modelu, co jest kwintesencją problemu decyzyjnego,
- zbytne uproszczenie modelu symulacyjnego może sprawić, że nie obejmie on wszystkich, kluczowych z punktu widzenia celu badania, zjawisk i zależności istniejących w rzeczywistości,
- implementacja modelu symulacyjnego może zostać zrealizowana przy wykorzystaniu gotowych narzędzi lub może zostać przeprowadzona od podstaw,
- realizacja badań symulacyjnych wymaga zgromadzenia obszernej liczby obserwacji pracy rzeczywistego systemu,
- w wielu przypadkach konfiguracja modelu i dane wejściowe z uwagi na rozmiar wymagały przygotowania osobnego modułu realizującego funkcjonalnie zadania bazy danych,
- w wielu przykładach modele symulacyjne służyły jako środowisko weryfikacji działania procedur lub algorytmów optymalizacyjnych,
- warunki zalegania złoża pod ziemią, a także stosowany system eksploatacji mają krytyczny wpływ na wybór środków transportowych, oddziałując tym samym na wymaganą funkcjonalność narzędzi symulacyjnych i dobór kryteriów analitycznych,
- badania symulacyjne powinny być realizowane wieloetapowo, szczególna uwaga winna być poświęcona procesowi dokumentowania oraz kwestii zgodności z ogólnymi wytycznymi koncentrującymi uwagę m.in. na weryfikacji założeń modelu,
- autorzy części prac zwracają uwagę na kwestię użyteczności danych wyjściowych z modelu, które powinny zostać z uwagi na sprawność całego procesu odpowiednio zagregowane i nie powinny one każdorazowo wymagać czasochłonnych przekształceń lub interpretacji jeśli nie jest to wymagane,
- metody optymalizacji parametrycznej mogą znaleźć szerokie zastosowanie na etapie rozwiązania konkretnych – ściśle określonych i zawężonych oddziaływaniem problemów takich jak alokacja maszyn w obrębie posiadanego parku maszynowego. Tworząc modele, istnieje możliwość osadzenia procedur optymalizacyjnych na poszczególnych stopniach decyzyjnych.

Krytyczna ocena stanu zagadnienia pozwala również na sformułowanie następujących wniosków szczegółowych:

- większość zastosowań koncentruje uwagę na kwestiach związanych stricte z ciągłością i niezawodnością procesu transportowego lub też efektywnością procesu z zasadniczym brakiem prac obejmujących analizę obu kryteriów lub podejścia wielokryterialnego,
- zasadniczo brak prac uwzględniających kompleksowe odwzorowanie parametrów jakościowych urobku, które to mogą stanowić osobne kryterium analityczne,
- badania symulacyjne w ogromnej większości nie wykorzystywały ruchomego horyzontu i pełnego okresu oddziaływania decyzji, w większości przypadków był wykorzystywany wyłącznie obecny stan kopalni, aktualny przebieg procesu transportowego lub ściśle nieokreślone warunki jego realizacji mające charakter uogólnionych testów,

- zaprezentowane badania symulacyjne często obejmowały wyłącznie fragment systemu odstawy urobku lub stanowiły narzędzie stosowane do weryfikacji wyników uzyskanych z innego narzędzia,
- stwierdzono bardzo wysoki, rosnący wraz z czasem udział prac wykorzystujących zaawansowane oprogramowanie symulacyjne wraz z gotowymi modelami obiektów. W wielu aspektach możliwość opracowania własnego środowiska od podstaw, pomimo iż jest uzasadnione większymi możliwościami reprezentacji interakcji, uwzględnienia modelu geologiczno-górniczego lub struktury przestrzennej wyrobisk transportowych, została porzucona na rzecz skrócenia czasu budowy modelu,
- użycie modeli obejmowało wykonanie jednokrotnych badań na podstawie danych bieżących, praktycznie wszystkie prace pomijały kwestie wykorzystania modelu symulacyjnego jako narzędzia ciągłego wsparcia decyzyjnego w obrębie istniejących procesów zarządczych i powtarzalnych problemów.

Należy zauważyć, że prace związane z zastosowaniem symulacji w badaniach procesów transportowych w większości wybiórczo koncentrują uwagę na wybranych płaszczyznach oceny efektywności procesu transportowego. Zasadniczo brakuje przykładów zastosowań modeli symulacyjnych obejmujących jednocześnie różne aspekty szeroko rozumianej efektywności procesu. Przytoczone badania symulacyjne w większości pozycji literaturowych dotyczyły zwykle jednego lub dwóch pokrewnych kryteriów analizy, zaś sama symulacja najczęściej była realizowana za pomocą pojedynczego modelu symulacyjnego, operującego na bieżącym stanie procesu bez długookresowej analizy. W tym zakresie można stwierdzić, że brakuje również opracowań pozwalających wskazać techniki i metody symulacyjne właściwe z perspektywy analizy wielokryterialnej procesu, brak również metodyki realizacji takich badań w górnictwie podziemnym, co potwierdza celowość realizacji niniejszej pracy. Jak wynika z przeglądu literatury oraz treści wcześniejszych rozdziałów, silnie zdewersyfikowane podejście do realizacji badań symulacyjnych procesów transportowych w kontekście odwzorowania m.in.: stanu układu, czasu i przestrzeni, tudzież dostępność różnorodnych metod symulacyjnych wskazuje na zasadność implementacji, opisu i oceny działania poszczególnych modeli symulacyjnych w aspekcie wielokryterialnej analizy procesów transportu urobku w kopalniach podziemnych.

Przegląd piśmiennictwa w zakresie problematyki stosowania badań symulacyjnych pozwala stwierdzić, że zagadnienie analizy procesów transportowych zyskuje na znaczeniu w obliczu obecnego stanu rynku surowców mineralnych. Sytuacja, w której pozycja na globalnej krzywej kosztowej wyznaczona przez efektywność produkcyjną w decydującym stopniu przesądza o perspektywach dalszego funkcjonowania przedsiębiorstwa, koncentruje uwagę na wszelkich metodach racjonalizacji działalności operacyjnej. Celowe wydaje się zatem doskonalenie metod analizy poprzez opracowanie narzędzi badawczych umożliwiających ocenę efektywności procesów transportu w specyficznych, dobranych z uwagi na rozpatrywany problem, wymiarach i perspektywach. Działania tego typu powinny uwzględniać jednak zarówno: właściwą dynamikę zmian, rozumianą jako naturalną zmienność o charakterze stochastycznym krótkookresowym, jak również pewną losowość i niepewność w kontekście strategicznych planów działań mających swoje odzwierciedlenie w przyszłym modelu kopalni. Ogólne warunki niepewności i towarzysząca im potrzeba kompleksowej, wielokryterialnej oceny realizowanego pod ziemią procesu transportowego, powinny być interpretowane jako niestandardowe wymagania, jakim sprostać powinny wszelkiego rodzaju modele i narzędzia użyte w celach analitycznych.

Krytyczny przegląd literatury pozwala sformułować podstawowy cel pracy, jakim jest: opracowanie modeli symulacyjnych kopalni, pozwalających na wielokryterialną ocenę procesów transportu urobku oraz cele cząstkowe obejmujące szczegółowo:

- właściwe kryteria analityczne i zakres użycia poszczególnych modeli symulacyjnych,
- metodykę realizacji badań symulacyjnych procesów transportowych w kopalni podziemnej uwzględniającą zakres użycia i współpracy opracowanych modeli.

Hipotezę badawczą można przedstawić następująco: istnieje możliwość opracowania i zastosowania opracowanych modeli symulacyjnych dla potrzeb wielokryterialnej analizy procesów transportu urobku, co będzie stanowić nowy, istotny element wsparcia decyzyjnego w zakresie oceny warunków funkcjonowania i doskonalenia istniejących oraz projektowanych systemów jego odstawy w kopalni podziemnej.

Zakres pracy obejmuje kopalnię podziemną, realizującą wydobycie kopaliny, bez preferencji co do systemu eksploatacji, jak i maszyn czy urządzeń stosowanych w procesie transportu urobku. Opracowane modele symulacyjne powinny dostarczać możliwość odwzorowania najczęściej stosowanych środków realizacji odstawy urobku, takich jak: przenośniki taśmowe, kolej kopalniana, samojezdne maszyny transportowe, górnicze wyciągi szybkie.

Niniejsza praca powinna przybliżyć i usystematyzować kluczowe pojęcia związane z tematyką symulacji komputerowej oraz problematykę związaną bezpośrednio z budową i praktycznym zastosowaniem modeli. Opracowane w tym celu modele i metody analizy, cechować powinien zarówno uniwersalizm w zakresie konfiguracji systemów oraz kryteriów analizy, jak i praktyczna użyteczność w aspekcie odwzorowania specyficznych warunków, charakteryzujących procesy transportu urobku realizowane w kopalniach podziemnych.

Należy zaznaczyć, że sformułowany problem badawczy może być rozwiązany w następstwie uporządkowanych, zaplanowanych działań, obejmujących szczegółowo:

- przeprowadzenie badań procesów transportu urobku na podstawie empirycznych danych,
- opracowanie modeli symulacyjnych wykazujących stosowalność w zakresie przewidzianym przedmiotem pracy,
- określenie metod badawczych wykorzystujących opracowane modele symulacyjne,
- przeprowadzenie weryfikacji i walidacji modeli w kontekście metod badawczych procesu.

Forma opracowanych modeli symulacyjnych powinna stanowić odzwierciedlenie potrzeb funkcjonalnych. Ustalenie wymagań względem modeli poprzedzone powinno być przeprowadzeniem badań procesów transportowych urobku w kopalniach podziemnych oraz wytypowaniem praktycznie uzasadnionych obszarów wsparcia decyzyjnego. W efekcie należy się spodziewać, że poszczególne problemy, jak i obiekty badań mogą wymagać opracowania wielu zróżnicowanych pod względem funkcjonalnym modeli symulacyjnych, dostosowanych do ich indywidualnych potrzeb. Zróżnicowane wymagania względem modeli, zważywszy na istotność i skalę oddziaływania założeń popęlnionych na etapie ich formułowania, będą utrudniały opracowanie jednego efektywnego i uniwersalnego rozwiązania. Dlatego też na etapie formułowania celu pracy przyjęto jako uzasadnioną konieczność opracowania co najmniej dwóch modeli, umożliwiających wzajemne uzupełnienie funkcjonalnie. Użycie więcej niż jednego modelu jest dodatkowo uzasadnione, zważywszy na fakt, że docelowa realizacja tematu pracy wymagać będzie przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych. Opracowanie dwóch zróżnicowanych funkcjonalnie modeli pozwoli na weryfikację krzyżową ich działania, jak również przedsięwzięcie różnego podejścia w zakresie ich implementacji, co może wpłynąć korzystnie na wartość pracy w kontekście zdefiniowanego problemu badawczego. Ostatecznie pozwoli to również ocenić i porównać ich przydatność w zróżnicowanych scenariuszach realizacji wsparcia decyzyjnego.

3. Charakterystyka procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych

W niniejszym rozdziale z uwagi na uzasadnioną wcześniej potrzebę wykorzystania danych empirycznych, analizie poddane zostały wyniki pomiarów zebrane w celu opracowania modeli symulacyjnych. Aby badania procesów transportu urobku posiadały reprezentatywny charakter, zostały nimi objęte zarówno podziemne kopalnie węgla kamiennego, jak i rud metali prowadzące eksploatację złóż na terytorium Polski.

3.1. Proces transportu urobku w systemie logistyki produkcji

Zgodnie z normą (PN-72/M-78000) proces transportowy rozumiany być powinien jako: *szereg związanych ze sobą operacji transportowych, wykonywanych kolejno w ustalonym porządku na określonej trasie i w określonym czasie zaś operacja transportowa to jednostkowe przemieszczenie ładunków, wykonywane przez pojedynczy środek transportowy lub ręcznie (PN-72/M-78000).*

Należy podkreślić, że większość działań realizowanych w kopalni podziemnej stanowią zorganizowane procesy: odwadniania i przewietrzania, przewozu ludzi, wyposażenia, materiałów, odstawy urobku oraz dostawy wody, mieszanin technologicznych i sprężonego powietrza. Każde z powyższych działań może być traktowane jako swoisty proces transportowy w większym lub mniejszym stopniu powiązany z przebiegiem pozostałych. Przykład może stanowić transport ludzi, materiałów i urobku jedną trasą kolei kopalnianej lub korelacja pomiędzy ilością podsadzki a wydobyciem urobku.



Rysunek 3.1. System logistyki produkcji przedsiębiorstwa produkcyjnego (Delfmann i Albers 2000).

Z perspektywy nauk o zarządzaniu wewnętrzne procesy transportowe wynikają bezpośrednio z istniejącego w przedsiębiorstwie systemu logistycznego, który w ogólnym ujęciu można podzielić na system logistyki dostaw, produkcji i dystrybucji (rys 3.1). Procesy transportu urobku zlokalizowane pod ziemią zawierają się w systemie logistyki produkcji. Odstawa urobku w kopalniach podziemnych realizowana jest w obrębie funkcjonującego systemu transportowego. Podstawowym zadaniem tego systemu jest:

- odstawa urobku z przodków na powierzchnię do zakładu przeróbczego,
- transport ludzi z powierzchni do miejsca pracy i z powrotem,
- transport wyposażenia i materiałów (wraz z odzyskiem materiałów).

System transportu urobku pozwala wydzielić transport rejonowy (oddziałowy), zbiorczy i szybowy, co wynika zarówno z samej specyfiki procesów transportowych, jak i zakresu

odpowiedzialności poszczególnych jednostek ujętych w strukturze organizacyjnej kopalni. W tradycyjnym ujęciu podział ten obejmuje tzw. odstawę, przewóz i ciągnięcie.



Rysunek 3.2. Transport urobku w ciągu technologicznym (opracowanie własne).

Transport urobku jest procesem realizowanym bezpośrednio po urabianiu i załadunku urobku (rys. 3.2) poprzedzającym najczęściej procesy przerobcze, które zasadniczo można również odwzorowywać jako procesy transportowe, tak jak to wskazują przykłady opisane w rozdziale 2.1.6. W warunkach kopalń węgla kamiennego załadunek urobku realizowany jest najczęściej bezpośrednio z kompleksu ścianowego (przenośnika ścianowego) na przenośnik podścianowy lub z kombajnu chodnikowego i przenośnika mostowego lub podwieszanego. W przypadku kopalń rud miedzi nadawa realizowana jest w obrębie odstawy przenośnikowej za pośrednictwem zmechanizowanych punktów przesypowych, do których kursują ładowarki realizujące operację ładowania, przewozu i zrzutu (LHD) lub na dłuższych odległościach wozy odstawcze. W obu przypadkach marginalnie mała ilość urobku podawana jest za pośrednictwem ładowarek szybowych i kubłów – w przypadku głębinia szybu lub szybiku lub ładowarek bocznospięjących i przenośników w przypadku urabiania materiałami wybuchowymi.

Podobnie jak transport ludzi i materiałów odbywa się w kopalniach w sposób uregulowany przez regulamin i rozkłady jazdy, tak też funkcjonowanie systemów transportu urobku reguluje dokumentacja oraz stosowne przepisy. Zwykle proces ten jest realizowany na podstawie harmonogramów pracy przodków, w sposób zróżnicowany w zależności od rodzaju użytych środków transportu i stosowanego systemu eksploatacji. Obiektem transportowym, który wymaga szczegółowych rewizji, przez co na ogół pracuje w innym trybie niż reszta odstawy, jest górniczy wyciąg szybowy. Utrzymanie go w stanie sprawności technicznej, jak również uzyskanie jak najdłuższego czasu pracy w wielu przypadkach jest kluczowe z perspektywy wydajności wydobywania urobku na powierzchnię. Należy dodać, że obecnie tylko dwie z kopalń w Polsce realizują odstawę upadową odstawczo-transportową z wykorzystaniem przenośników taśmowych (KWK Marcel, ZG Sobieski).

Techniczna realizacja przemieszczania urobku w kopalniach podziemnych, realizowana jest przede wszystkim z użyciem:

- maszyn górniczych, w tym ładowarek i wozów odstawczych,
- przenośników zgrzebłowych i taśmowych,
- górniczych wyciągów szybowych,
- kolei kopalnianej,
- maszyn przerobczych (kruszarek, przesiewaczy),
- zbiorników urobku (typu górniczego oraz mechanicznego),
- instalacji hydraulicznych,
- zsyków (grawitacyjnych), zsuwni spiralnych,
- urządzeń pomocniczych m.in. dozowników, zgarniaczy.

Wyszczególnienie to zważając na temat pracy sugeruje konieczność zastosowania dodatkowego podziału z uwagi na przebieg w czasie – mowa tutaj o transporcie ciągłym lub cyklicznym (okresowym). Pod tym względem niemalże każdy transport urobku w kopalni podziemnej stanowi układ składający się z obiektów działających w sposób ciągły – głównie przenośników taśmowych lub cykliczny – m.in. górniczych wyciągów szybowych, kolei kopalnianych lub wozów transportowych. Stąd też jednym z podstawowych zadań podziemnych zbiorników urobku poza stabilizacją i zapewnieniem ciągłości

strugi urobku, jest jego retencja w miejscu zamiany charakteru ciągłego na okresowy lub okresowego na ciągły. Z uwagi na złożoność strukturalną oraz zróżnicowany przebieg procesu na szczególne wyróżnienie w obrębie odstawy urobku zasługują dwie, szeroko stosowane metody transportu urobku, opisane w kolejnych rozdziałach pracy – 3.2.1. oraz 3.2.2.:

- transport systemem przenośników taśmowych,
- transport górnictwymi maszynami samojezdnymi.

Należy podkreślić, że w przypadku kopalni podziemnej przebieg tras transportowych jest ograniczony poprzez wyrobiska w głównej mierze właściwe z perspektywy sztuki górniczej, w tym wymagań formalnych. Można śmiało założyć, że kształt funkcjonującego w kopalni podziemnej systemu odstawy urobku stanowi kompromis uwzględniający szereg ograniczeń natury technicznej, formalnej, naturalnych warunków zalegania złoża oraz przeszłego i zakładanego w przyszłości modelu kopalni. Czynniki te mają decydujący wpływ na przestrzenny przebieg trasy, strukturę ilościową urządzeń, ich położenie, położenie punktów załadunku, punktów retencji oraz odbioru urobku. Dodatkowo na podkreślenie zasługuje zmienność warunków eksploatacji systemu transportowego opisana zarówno w długim (miesiące, lata), jak i krótkim horyzoncie czasowym (godziny, minuty). Proces transportu urobku zmienia się nieustannie w czasie, zbieżnie z harmonogramem eksploatacji i bezpośrednio w funkcji postępu wydobywania. Zmianom podlegają zarówno założenia i wymuszenia ze strony górniczej, jak i ograniczenia natury technicznej i organizacyjnej. Jak już nadmieniono, efektem powyższego stanu jest sytuacja, w której rozwiązania funkcjonujące w praktyce rzadko kiedy są rozwiązaniami w pełni optymalnymi. Kształt i działanie systemu odstawy urobku naznaczone jest wcześniejszymi decyzjami i stanowi wypadkową wcześniejszego i bieżącego modelu kopalni, a ten w dużym stopniu zależy od zmiennych uwarunkowań o charakterze ekonomicznym, technicznym i prawnym.

3.2. Środki realizacji transportu kopalnianego

Zważywszy na tematykę pracy, zakres prezentowanych w bieżącym rozdziale danych został ograniczony do przykładów właściwych dla oddania specyfiki warunków kopalń podziemnych z nadrzędnym celem, za który przyjęto odwzorowanie cech funkcjonalnych obiektów uczestniczących w procesie transportu urobku.

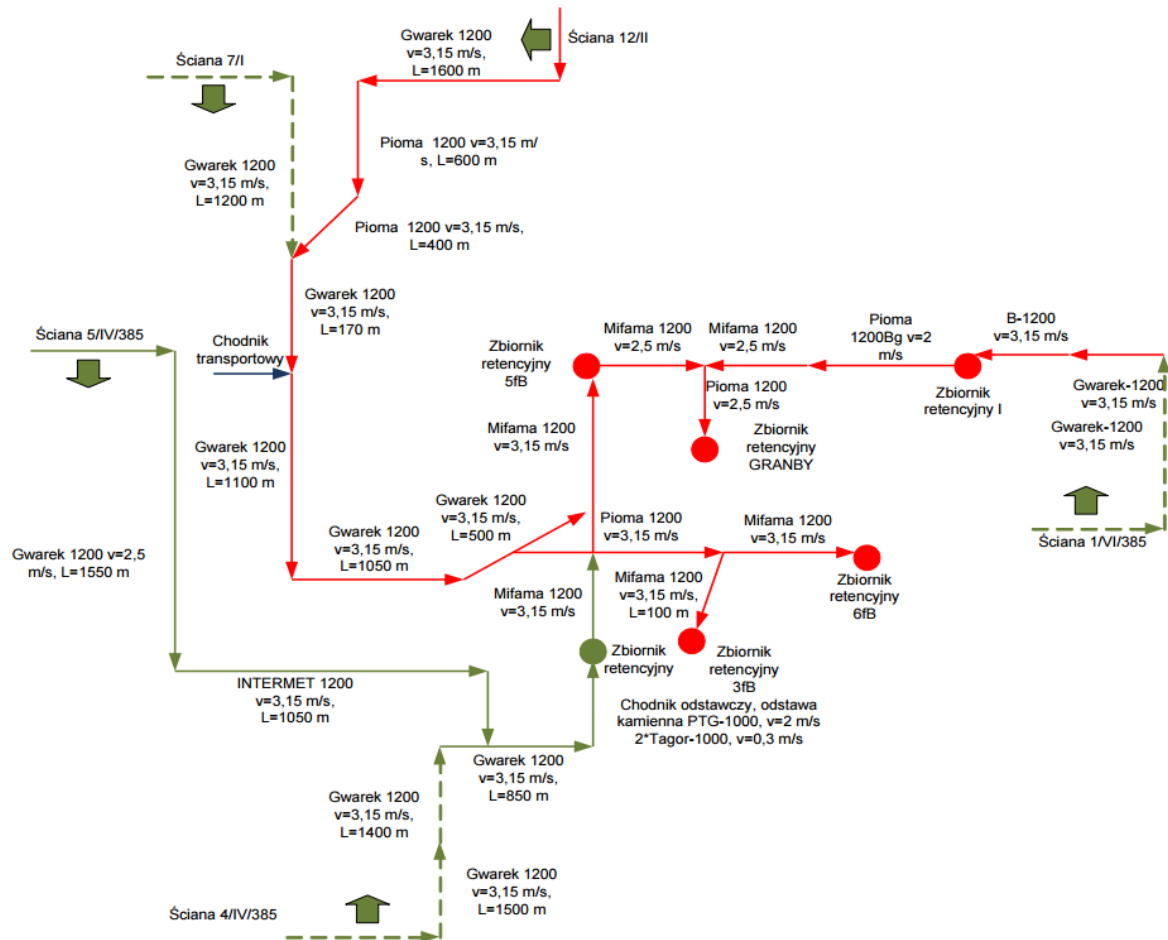
Zdecydowana większość charakterystyk uzyskanych w drodze przetwarzania i analizy danych znalazła zastosowanie na etapie opracowania modeli symulacyjnych, weryfikacji i walidacji ich działania.

3.2.1. Transport przenośnikowy

W kopalniach odkrywkowych, jak i podziemnych szerokie zastosowanie w procesie odstawy urobku znalazł transport przenośnikowy. Zastosowanie odstawy przenośnikowej z czasem zasadniczo wyeliminowało przewóz urobku wozami kolei kopalnianej. Właściwości techniczne i funkcjonalne tego systemu sprawiły również, że obecnie przenośniki coraz częściej wykorzystywane są również do jazdy ludzi. Abstrahując jednak od nowych zastosowań, funkcjonalnie odwzorowanie procesu transportu urobku przenośnikiem zgrzeblowym i taśmowym jest zbliżone. Ewentualne różnice obejmują ruch

spiętrzonego urobku, który w przypadku przenośników zgrzeblowych wymaga rozbudowy modelu transportu liniowego, co zostało opisane w dalszych rozdziałach pracy. W kopalniach podziemnych w warunkach specyficznych dla przodków ścianowych i chodnikowych najczęściej stosowane są przenośniki zgrzeblowe o lekkiej lub ciężkiej konstrukcji. W przypadku systemu ścianowego można wyróżnić przenośniki ścianowe bezpośrednio współpracujące z maszyną urabiającą oraz obudową zmechanizowaną, przenośniki podścianowe i przenośniki chodnikowe. Z uwagi na fakt, że przenośniki zgrzeblowe stosowane są w mniejszej ilości i przeważnie znajdują się na początku łańcucha transportowego, właściwe odwzorowanie ich pracy może zostać przeprowadzone na etapie modelowania źródeł nadawy, toteż w dalszej części rozdziału uwagę poświęcono zdecydowanie szerzej stosowanym – przenośnikom taśmowym.

System transportu taśmowego ze względu na ciągłość działania, wysoką wydajność i parametry eksploatacyjne jest systemem powszechnie stosowanym zarówno w Polsce, jak i na świecie. W polskich warunkach transport zbiorczy w obrębie głównych ciągów transportowych oraz w większości przypadków transport rejonowy (w obrębie oddziałów wydobywczych), realizowane są z ich wykorzystaniem. Przenośniki taśmowe tworzą na ogół złożone systemy odstawy urobku o łącznej długości dróg odstawy wynoszącej od 15 km w kopalniach utrzymujących 2–3 przodki ścianowe do 70 km lub nawet więcej w kopalniach rud miedzi lub rozległych kopalniach węgla kamiennego, takich jak LW Bogdanka (rys. 3.3). Topologia stałej części układów odstawy urobku najczęściej przypomina strukturę drzewiastą i stanowi graf skierowany. Oznacza to, że zawracanie urobku w tym układzie na ogół nie jest możliwe, i nie jest realizowane, a wyjątek stanowią tu zasadniczo zbiorniki mechaniczne urobku. Pomimo tego, w kopalniach często istnieją połączenia równoległe jak również fragmenty trasy wyposażone w przenośniki rewersyjne lub inne rozwiązania umożliwiające zmianę kierunku przepływu urobku m.in. celem przekierowania na inny zbiornik lub szyb wydobywczy. Przykłady takich rozwiązań, zostały opisane w pracy (Koman i Laska 2014).



Rysunek 3.3. Schemat odstawy taśmowej z przodków ścianowych w kopalni Bogdanka (Mazurkiewicz 2011).

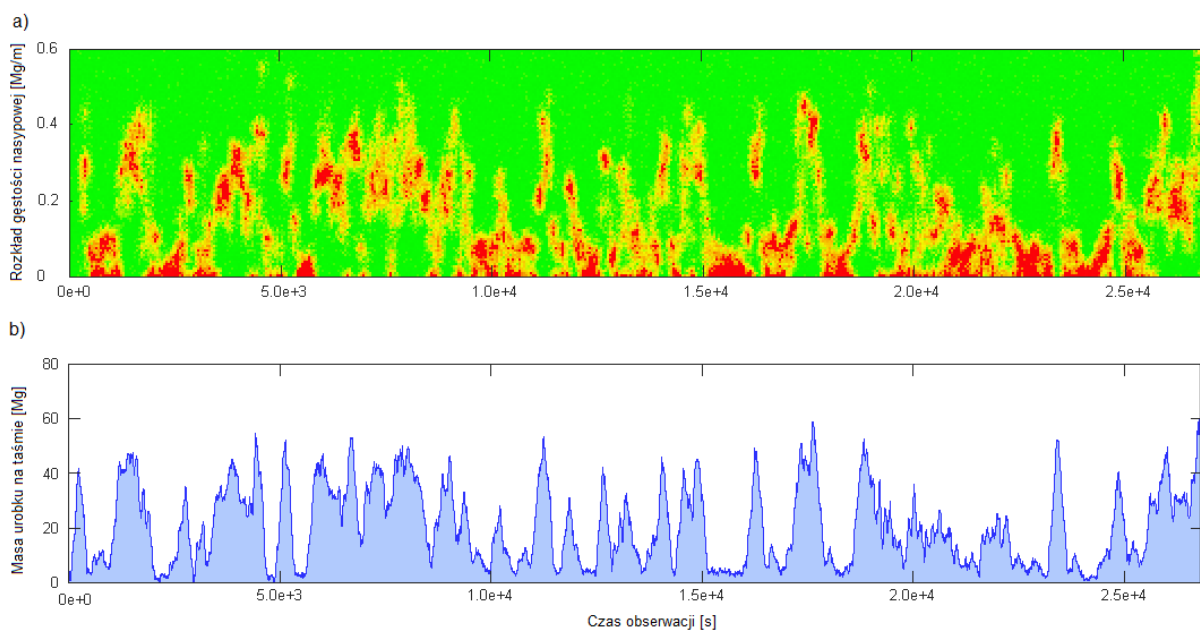
W kopalniach podziemnych eksploatujących złoża kopalin w Polsce na ogół stosowane są przenośniki taśmowe o szerokości taśmy od 1000 do 1600 mm, o prędkości od 2,5 do 5 m/s. W zależności od lokalizacji i przeznaczenia przenośnika jego długość zawiera zwykle się w przedziale od 50 do 1500 m. Stosowany w praktyce podział na tzw. przenośniki krótkie i długie ma charakter czysto umowny. W przypadku kopalń węgla odstawa taśmowa może stanowić system obejmujący więcej niż jeden poziom wydobywczy, połączenie poziomów wykonane jest za pośrednictwem pochylni, otworów wielkośrednicowych lub górniczych zbiorników urobku. W kopalniach rud, jak i węgla kamiennego zakończenie części ciągłej systemu transportowego stanowią główne zbiorniki urobku, które zlokalizowane są w obrębie szybu wydobywczego oraz ostatecznie zbiorniki odmiarowe urobku do kieszeni skipowych. Na ogół mniejsze zbiorniki retencyjne zlokalizowane są w rejonach wydobywczych realizując funkcję stabilizacji i regulacji przepływu urobku – na załączonym rysunku 3.3 funkcję taką pełni zbiornik retencyjny I.

Należy mieć na uwadze, że system odstawy taśmowej wymaga:

- odpowiednich parametrów (gabarytów) wyrobisk (chodników odstawczych),
- odpowiedniej infrastruktury (zasilanie, woda p.poż, systemy p.poż., łączność, sterowanie),
- odpowiedniego profilu trasy (pochylenia, zakręty),
- operatorów nadzorujących punkty przesypowe,
- wysokiej kultury technicznej w zakresie obsługi.

Przenośniki taśmowe wymagają przede wszystkim dostosowania nadawy do rzeczywistych zdolności transportowych. Zbyt niska prędkość, szerokość taśmy lub awaria może być przyczyną ich zasypania i uszkodzenia. Podobnie wrażliwy element systemu stanowi taśma przenośnikowa, która może zostać względnie łatwo uszkodzona elementami metalowymi przemieszczanymi wraz z urobkiem. Z uwagi na to, że zablokowanie elementów ruchomych (krażników) doprowadzić może do pożaru, systemy przenośników taśmowych wyposaża się w układy automatyzacji pracy podnoszące bezpieczeństwo eksploatacji systemu. W kontekście niniejszej pracy ich zastosowanie jest kluczowe, pozwoliło bowiem na uzyskanie danych prezentowanych w dalszej części rozdziału. Jako podstawowe wady stosowania przenośników taśmowych wymienić można m.in.: brak możliwości stosowania w wyrobiskach nieprostoliniowych oraz trudność przedłużania lub skracania długości trasy transportowej.

Ilustracja sporządzona na rysunku 3.4a przedstawia ilościowy udział gęstości nasypowej urobku na taśmie przenośnika taśmowego realizującego odbiór urobku z przodka. Ilustracja ta została wykonana przy użyciu uproszczonego modelu analitycznego szacującego obciążenie miejscowe poszczególnych odcinków przenośnika na podstawie danych zarejestrowanych przez wagę tensometryczną zabudowaną na jego trasie. Na szczególną uwagę zasługuje zróżnicowanie obciążenie taśmy przenośnika wyrażone rozkładem opisanym w wymiarze dwóch zmiennych: jednostkowej masy nasypowej (rys. 3.4a oś y) oraz czasu (rys. 3.4a oś x). Zmienność ta ma pośrednie odzwierciedlenie w łącznej masie urobku znajdującej się w danym okresie czasu na taśmie przenośnika – ilustracja 3.4b. Relacja obu wartości pełnić może swoistą funkcję diagnostyczną, pozwalając na ocenę dopasowania gabarytów i parametrów techniczno-ruchowych przenośnika do zmienności opisującej punkt nadawy. Zauważyć można, że tożsame, chwilowe obciążenie urobkiem przenośnika możliwe jest do uzyskania w rezultacie zróżnicowanego rozkładu masy na jego długości. Ta własność została szerzej opisana w dalszej części pracy.

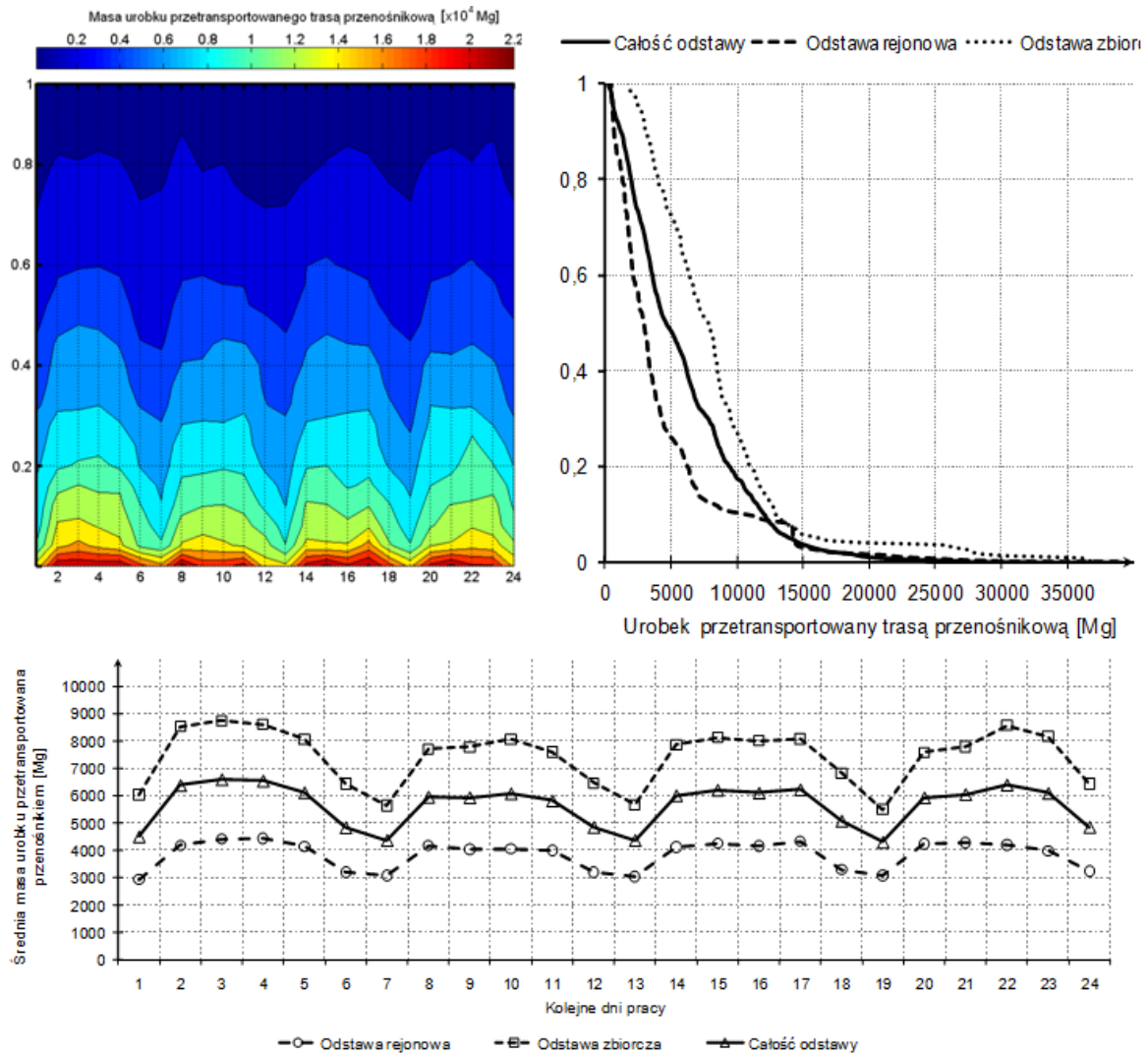


Rysunek 3.4. Zmienność obciążenia przenośnika taśmowego (opracowanie własne).

a) Rozkład gęstości nasypowej. b) Łączna masa urobku na taśmie przenośnika.

Należy mieć na uwadze, że dynamika zmian dotyczy nie tylko samej nadawy urobku w czasie, lecz również położenia miejsc jego załadunku. Podstawowa różnica z perspektywy realizacji badań symulacyjnych, właściwych dla potrzeb i różnych metod eksploatacji złóż, dotyczy lokalizacji i ilości miejsc załadunku urobku. W kopalniach węgla kamiennego na ogół istnieje wyłącznie kilka miejsc

nadawy urobku – przeciętnie 3 lub 4 przodki ścianowe i zwykle zbliżona ilość przodków chodnikowych. W przypadku kopalń rudy miejsc tych może być kilkadziesiąt lub w skrajnych przypadkach kilkaset i są one zdecydowanie bardziej rozproszone w przestrzeni.

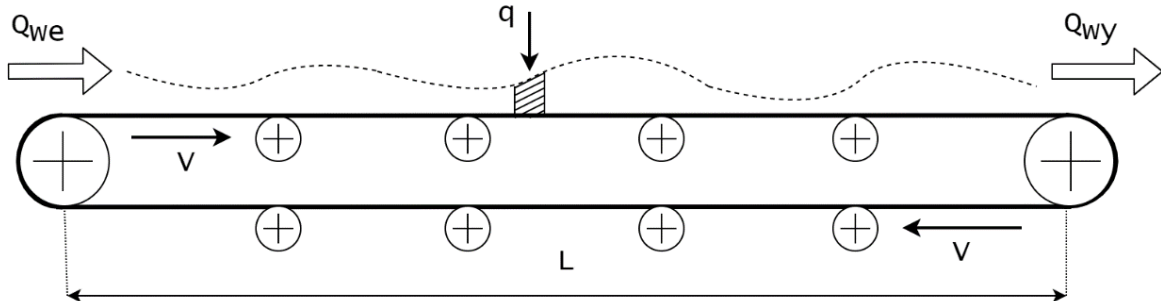


Rysunek 3.5. Profil obciążenia trasy przemieszczającej w funkcji całkowitej długości odstawy oraz kolejnych dni roboczych (opracowanie własne na podstawie danych zarejestrowanych w kopalni rudy).

- Wykres 3W masy przetransportowanego urobku na zadanym odcinku w kolejnej dobie obserwacji.
- Uporządkowany profil obciążenia trasy przemieszczającej opisujący ilość urobku przeniesioną w funkcji długości odcinka transportowego.
- Średnia masa urobku przeniesiona w poszczególne dni robocze.

Przykład pracy systemu odstawy taśmowej w sytuacji istnienia wielu rozproszonych w przestrzeni miejsc załadunku zilustrowano na rysunku 3.5. Na tej ilustracji przedstawiono wyliczenia masy transportowanego urobku dla populacji przemieszczających taśmowych wykorzystywanych w podziemnej kopalni rudy. Dokonując podziału dróg odstawy na odstawę główną (zbiorniczą) oraz odstawę rejonową, jednocześnie przedstawiono tzw. uporządkowany profil obciążenia trasy (rys. 3.5b). Stanowi on metodę wizualizacji często wykorzystywaną w dalszej części pracy będącą modyfikacją dystrybuanty empirycznej, w której jednostkową miarę prawdopodobieństwa zastąpiono parametrem opisującym długość obiektu transportowego. Analiza zarejestrowanych danych pozwala stwierdzić wpływ, jaki wywiera rozproszona lokalizacja punktów załadunkowych na obciążenie systemu transportowego.

Widoczne wyraźnie są różnice stopnia obciążenia rejonowej i głównej odstawy taśmowej wynikające ze struktury połączeń koncentrujących urobek z wielu źródeł. Na wykresach (rys. 3.5a oraz rys. 3.5c) oprócz autokorelacji tygodniowej zaobserwować można zmienność obciążenia w czasie wynikającą z zdarzeń losowych, sekwencji wydobywania, jak i zdolności gromadzenia urobku w obrębie odstawy głównej w zbiornikach retencyjnych.



Rysunek 3.6 Uproszczona reprezentacja funkcjonalna przenośnika taśmowego (opracowanie własne)
(q – masa jednostkowa nosiwa, Q_{we} – przepływ wejściowy strugi materiału, Q_{wy} – przepływ wyjściowy strugi materiału, L – długość trasy transportowej, V – prędkość liniowa ruchu taśmy).

Na ilustracji 3.6. przedstawiono uproszczony model przenośnika taśmowego, wraz z oznaczeniami przyjętymi w dalszej części rozdziału. Na potrzeby modelowania funkcjonalnego przyjęto, że przenośnik taśmowy w sposób ciągły przemieszcza urobek ze znaną stałą lub zmienną prędkością, bez występowania zjawisk zsuwania, spiętrzania lub blokowania się urobku oraz innych zjawisk dynamicznych, opisanych w sposób szczegółowy m.in. w pracy (Chen i Li 2016). Stosując tego rodzaju uproszczenie, przy stałej prędkości ruchu taśmy przenośnik może być odwzorowany funkcjonalnie, jako element wprowadzający wyłącznie przesunięcie czasowe, gdzie wartość wyjściową przepływu masy urobku można obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$Q_{wy}(t) = Q_{we}(t - T) \quad 3.1$$

gdzie:

Q_{we} – wejściowa struga urobku,

Q_{wy} – wyjściowa struga urobku,

T – stała czasowa wynikająca z długości przenośnika i prędkości ruchu taśmy (rys. 3.7).

Uwzględniając zmienną prędkość ruchu, powyższe równanie wymaga wprowadzenia dodatkowej zmiennej niezależnej – położenia (rys. 3.7b). Związek pomiędzy prędkością chwilową a opóźnieniem można opisać następującym równaniem:

$$\int_{t-T}^t V(t) = L \quad 3.2$$

gdzie:

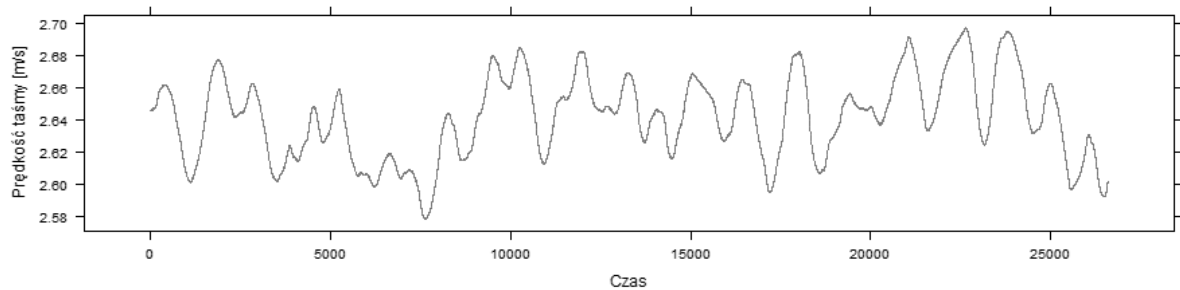
V – prędkość ruchu taśmy,

L – długość trasy przenośnika,

T – stała czasowa przesunięcia (rysunek 3.7).

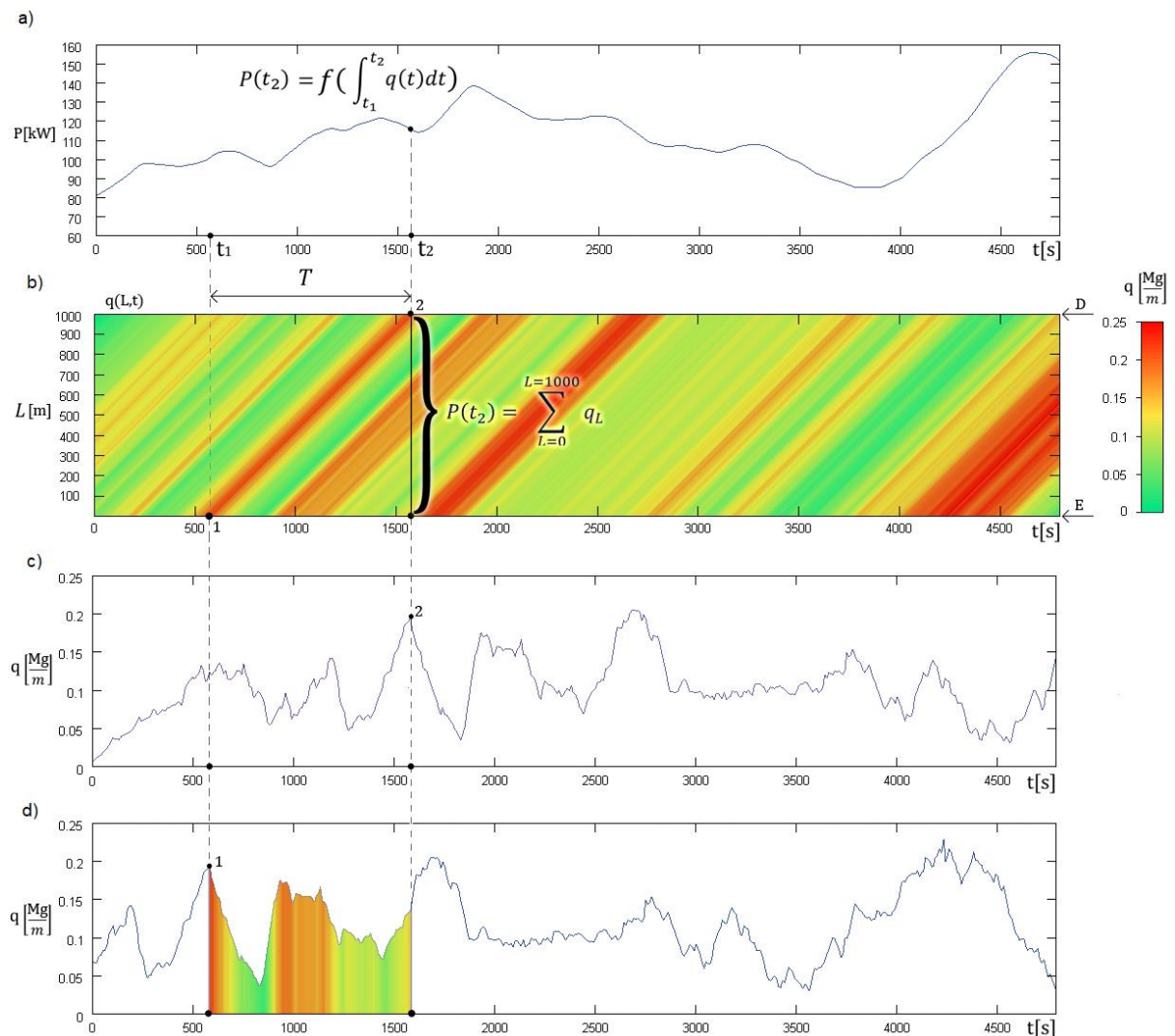
Jednym z kluczowych parametrów charakteryzujących pracę przenośnika taśmowego jest obciążenie niecki taśmy urobkiem. Kluczowy na etapie projektowania urządzenia parametr, tj.

wymagana moc układu napędowego, wynika wprost z oporów ruchu przenośnika, które przy stałej prędkości ruchu i jednolitej trasie są proporcjonalne do łącznej masy transportowanego materiału (Gładysiewicz 2003).



Rysunek 3.7 Wynikające ze zmian oporów ruchu zmiany prędkości ruchu taśmy przenośnika taśmowego (opracowanie własne).

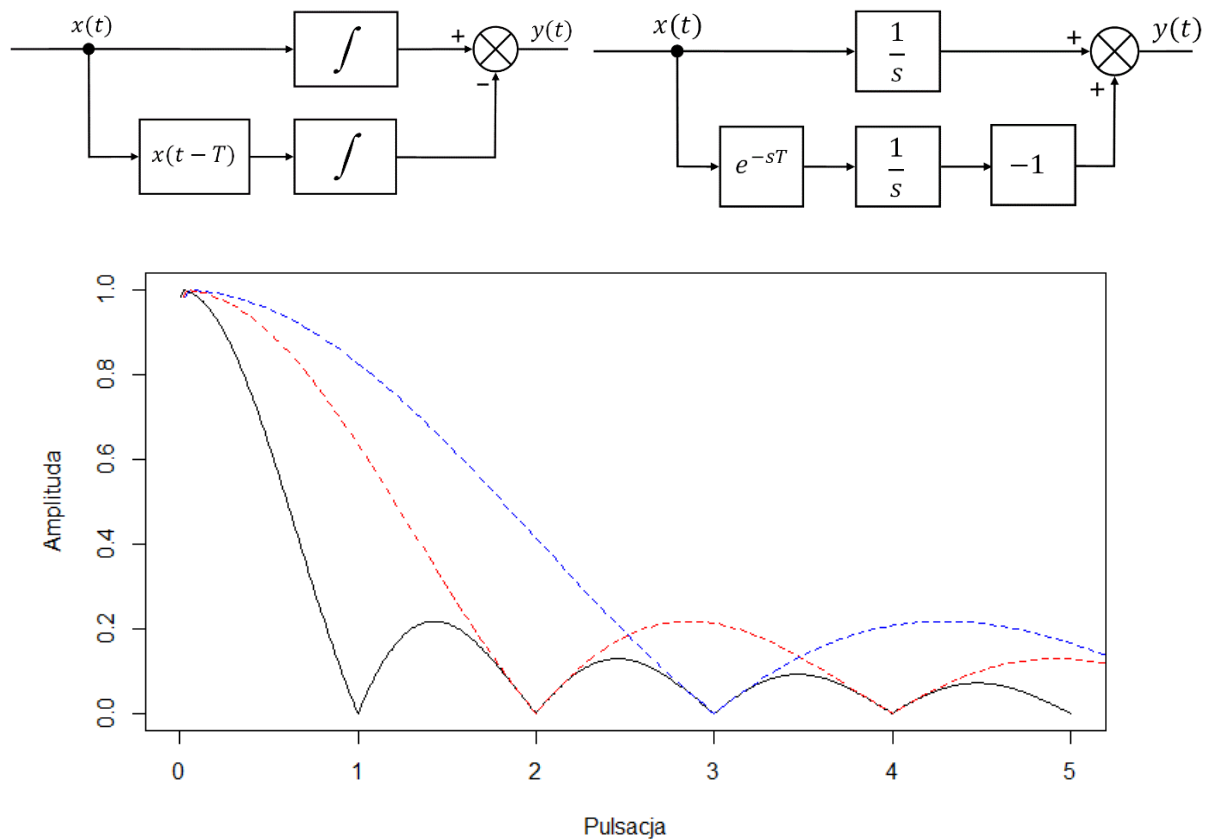
W sytuacji obserwowanych zmian prędkości ruchu taśmy lub różnic kąta pochylenia fragmentów taśmy przenośnika zależność ta nie jest już tak prosta do opisanie. Analogicznie dotyczy to jej implementacji w modelu symulacyjnym. Należy jednocześnie podkreślić, że prędkość liniowa taśmy w ograniczonym stopniu zmienia się, gdyż dla ustalonej stałej wartości obrotów obserwować można wahania uzależnione między innymi od zmienności oporów ruchu (rys. 3.7).



Rysunek 3.8 Ilustracja ruchu masy urobku w obrębie przenośnika taśmowego (opracowanie własne)

- Obciążenie napędu przenośnika w czasie.
- Rozkład masy jednostkowej nosiwa w układzie dwóch zmiennych: położenia oraz czasu.
- Wartość masy jednostkowej nosiwa w punkcie D ($L=1000\text{m}$).
- Wartość masy jednostkowej nosiwa w punkcie E ($L=0\text{m}$).

Na ilustracji 3.8 zamieszczony został teoretyczny zapis stanu pracy przenośnika taśmowego obejmujący stan obciążenia układu napędowego (rys. 3.8a) oraz masę jednostkową nosiwa opisaną na przestrzeni czasu oraz położenia na taśmie (rys. 3.8b, 3.8c, 3.8d). Należy zaznaczyć, że prostoliniowe ścieżki ruchu masy widocznie wyraźne na rysunku 3.8b, występują wyłącznie przy stałej prędkości ruchu taśmy i ciągłej pracy urządzenia. W innych warunkach, nie jest możliwe uproszone odwzorowanie działania obiektu. Uwarunkowanie to powinno zostać uwzględnione w wymaganiach funkcjonalnych względem modeli symulacyjnych.



Rysunek 3.9. Schemat blokowy i odpowiedź częstotliwościowa oporów ruchu w funkcji częstotliwości załadunku przenośnika (opracowanie własne).

Model przenośnika taśmowego można również opisać w formie schematu blokowego oraz jego odpowiedzi w funkcji częstotliwości przedstawionych na rysunku 3.9. W tym przypadku funkcję $y(t)$ stanowi obciążenie układu napędowego zaś funkcję $x(t)$ chwilowy przepływ materiału na wejściu. Amplituda odpowiedzi częstotliwościowej (rys. 3.9) pozwala stwierdzić, że dla częstotliwości zmian wartości wejściowej równej długości stałej czasowej T lub jej kolejnym harmonicznym nie występują zmiany wartości wyjściowej opisanej w tym przypadku przez zapotrzebowanie na moc napędu. Zakładając dalej, że jednostkowa masa nosiwa nie jest stała na całej długości taśmy a nawet podlega dużemu zróżnicowaniu (co potwierdza rys 3.4) należy przyjąć, że w zależności od częstotliwości zmian wejściowej strugi urobku oraz parametrów fizycznych, jak i ruchowych przenośnika dochodzić może do sytuacji, w której obserwuje się często kolejno skrajne wartości wyjściowe. W rezultacie skutkować

to może powtarzającymi się czasowymi przeciążeniami lub niedociążeniem układu napędowego, co stanowi zjawisko niepożądane, opisane dalej w pracy na przykładzie współpracy przenośnika taśmowego z strugiem węglowym.

Odpowiedź częstotliwościowa powyższego układu opisana jest funkcją interpolującą, która może znaleźć zastosowanie na etapie doboru parametrów fizycznych i ruchowych przenośników taśmowych przy znanych okresach kursów samojezdnych maszyn transportowych lub parametrach kompleksu ścianowego wyposażonego w głowicę strugową:

$$G(j\omega) = \frac{\cos(\omega T) - 1}{\omega T} + j \frac{\sin(\omega T)}{\omega T} \quad 3.3$$

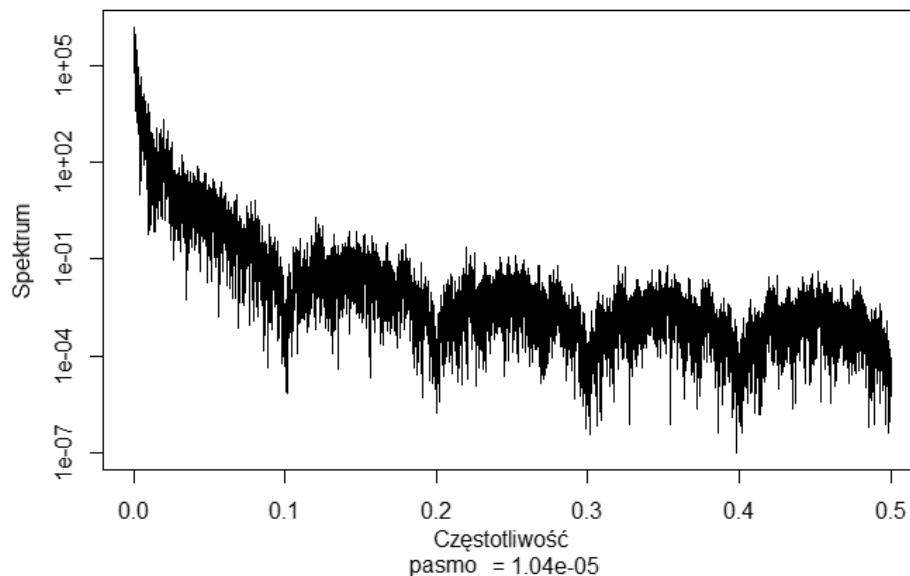
gdzie:

G – transmitancja obiektu,

ω – pulsacja,

T – stała czasowa wynikająca z długości przenośnika i prędkości ruchu taśmy.

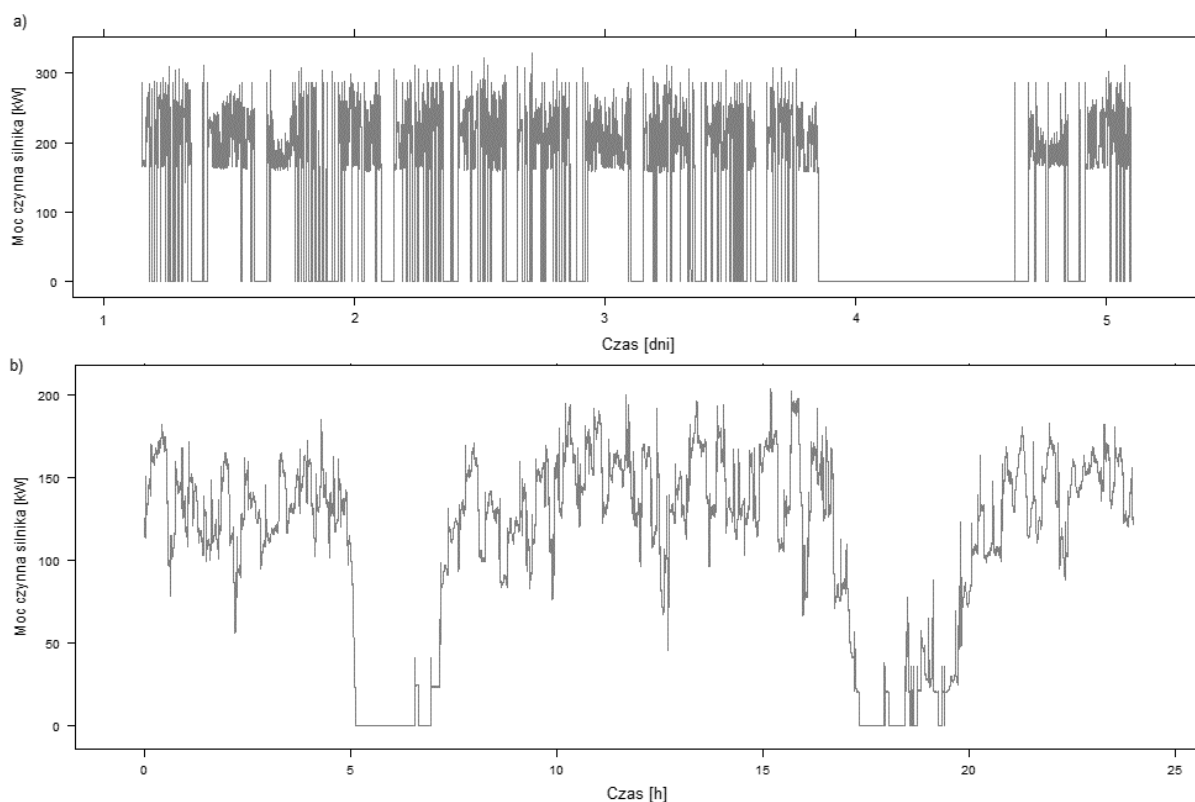
W trakcie przeprowadzonych badań na danych zarejestrowanych dla przenośników taśmowych, stwierdzono, że związek opisany równaniem 3.3. może zostać również wykorzystany do analizy autokorelacji w sygnale mocy chwilowej pobieranej przez układ napędowy – tak jak to przedstawiono na rysunku 3.10. Tym samym pozwalając na ustalenie rzeczywistej prędkości ruchu taśmy w przypadku wyłącznie znanej długości transportowej lub też służąc do identyfikacji położenia aktywnych punktów załadunkowych na trasie przenośnika. Tego rodzaju zależności zostały częściowo wykorzystane w pracy, w obrębie czynności związanych z przekształcaniem i przygotowaniem danych wejściowych dla modeli symulacyjnych.



Rysunek 3.10. Pariodogram mocy chwilowej pobieranej przez napęd przenośnika (opracowanie własne).

Związek pomiędzy odpowiedzią częstotliwościową oporów ruchu taśmy a chwilowym przepływem strugi urobku w zadanym punkcie i czasie pozwala wyszczególnić sytuację, w której okresowa zmienność przepływu strugi urobku odpowiada harmonicznej okresu transportowego. Opisana sytuacja prowadzi w rezultacie do utrzymania stałej wartości oporów ruchu, co jest zjawiskiem pożądanym i stanowi zadanie istotne z uwagi na proces użytkowania urządzenia, pozwalając tym samym

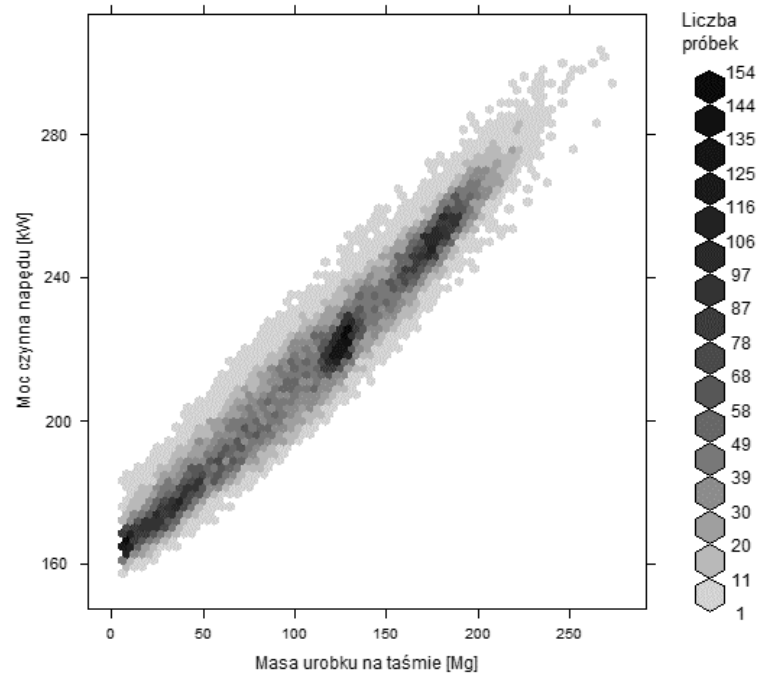
na maksymalnie efektywne dostosowanie mocy napędów. Powyższe zagadnienie problematyczne może stanowić obszar pewnej optymalizacji na etapie projektowania taśmowych ciągów transportowych lub może być przedmiotem analizy wielokryterialnej z użyciem opracowanych dalej modeli.



Rysunek 3.11. Ilustracja warunków pracy przenośnika taśmowego (opracowanie własne).

- a) Moc czynna silnika w długim horyzoncie czasowym.
b) Moc czynna przenośnika w krótkim horyzoncie czasowym.

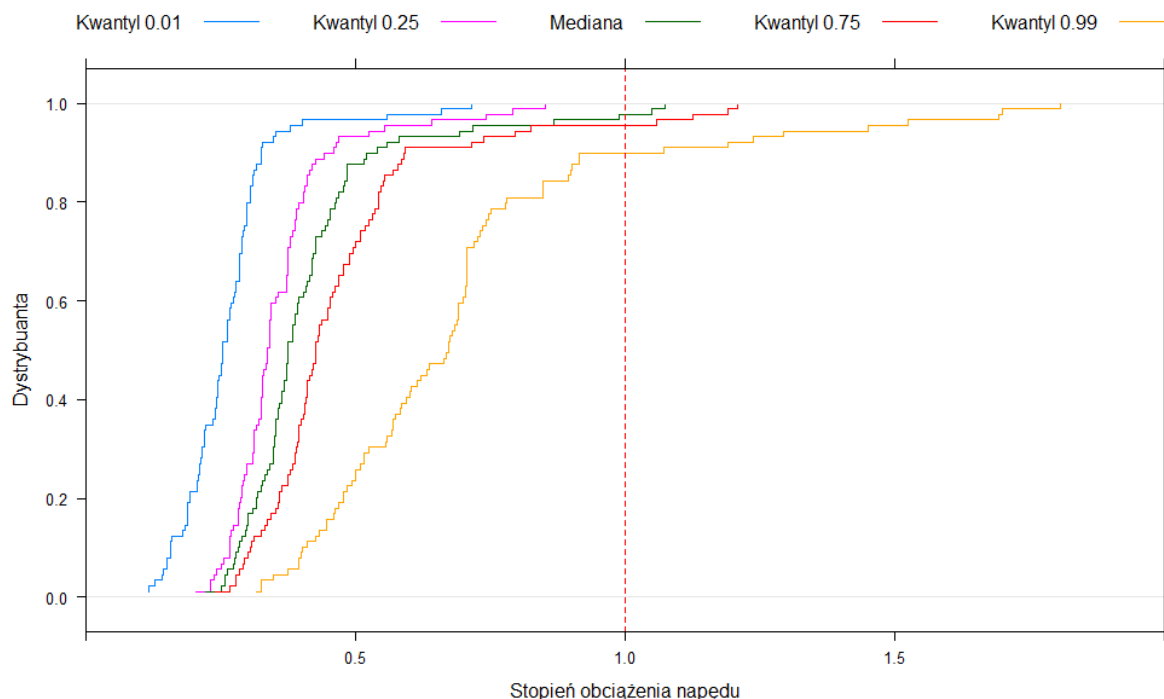
Analiza warunków pracy wybranych przenośników taśmowych eksploatowanych w górnictwie podziemnym na podstawie pomiarów, których przykład zamieszczono na rysunku 3.11, pozwala stwierdzić duże zróżnicowanie obciążenia przenośników taśmowych zarówno w krótkim (3.11b) jak i długim (3.11a) horyzoncie czasowym. Kwestia ta definiuje istotne wymagania względem szczegółowości modeli symulacyjnych przenośników taśmowych, modeli punktów załadunkowych w aspekcie odwzorowania rzeczywistego splotu urobku z przodków. Dotyczy to w szczególności urządzeń, które realizują odbiór urobku bezpośrednio z przodka wchodzących w skład odstawy rejonowej lub zbiorczej, których ciąg odstawczy nie jest poprzedzony zbiornikiem retencyjnym urobku.



Rysunek 3.12. Zależność mocy czynnej napędu oraz obciążenia urobkiem taśmy przenośnika (opracowanie własne).

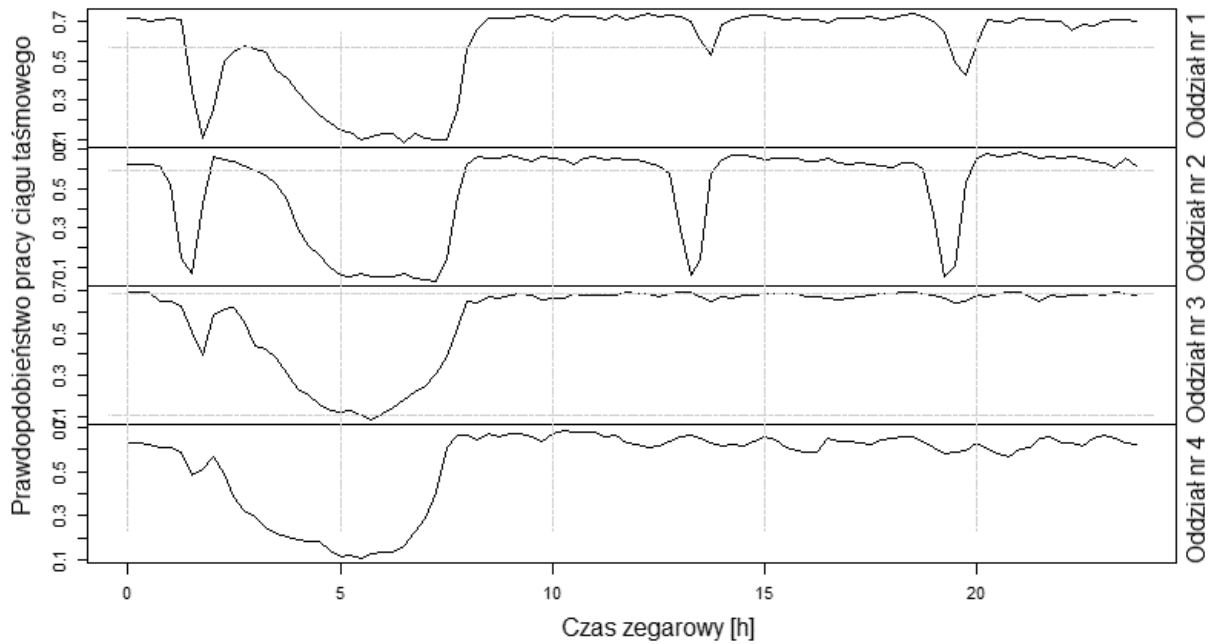
Na rysunku 3.12 przedstawiona została zależność pomiędzy mocą pobieraną przez napęd przenośnika a masą transportowanego urobku. Należy podkreślić, że w przytoczonym przykładzie poza korelacją w uproszczeniu mającą postać liniową, wyróżnić można, co najmniej dwa skupienia punktów. Skupienia te odpowiadają okresowi pracy urządzenia bez urobku na taśmie oraz dwóm poziomom obciążenia przenośnika. Sytuacja taka występuje, gdy przykładowo do ciągu odstawy urobku ze zbiornika retencyjnego dodatkowo skierowany jest urobek z drążonego wyrobiska chodnikowego. Wydajność chwilowa nadawcy ze zbiornika w takim przypadku uwzględniać powinna możliwość pojawienia się dodatkowej masy urobku, co w sposób stały ogranicza zdolności transportowe ciągu transportowego. Możliwym rozwiązaniem dla tej sytuacji jest wykorzystanie układu sterującego procesem transportowym dopasowującym nadawcę ze zbiornika do bieżącej sytuacji.

Analiza warunków eksploatacji przenośników taśmowych eksploatowanych w górnictwie podziemnym pozwala zidentyfikować trzy podstawowe rodzaje problemów: przeciążenie napędu, przeładowanie przenośnika lub niską efektywność pracy. Każda z sytuacji posiada określone, negatywne konsekwencje w aspekcie efektywności energetycznej oraz wymiarze eksploatacyjnym, gdzie skutkuje to zwiększonym zużyciem podstawowych podzespołów i materiałów eksploatacyjnych. Jednoznaczna klasyfikacja stanu konkretnego urządzenia stanowi zadanie wymagające, gdyż obciążenia mają charakter dynamiczny, co wymaga odpowiednio zaprojektowanego systemu miar, operujących na danych zarejestrowanych w długim okresie. Ten sam przenośnik może być krótkookresowo przeciążany, a jednocześnie jego obciążenie długookresowe może być względnie małe. Wobec tego na rysunku 3.13 zaprezentowano stopień obciążenia napędów przenośników eksploatowanych w kopalni podziemnej z zastosowaniem różnych form statystycznej agregacji danych. Wskazać tu można wyraźną różnicę pomiędzy rozkładem chwilowych wartości obciążenia urządzeń w populacji. Pomimo że mediana obciążeń obiektów będących przedmiotem badania w zdecydowanej większości znajduje się poniżej wartości projektowanej, o tyle kwantyl $p=0.99$ obserwowanego obciążenia napędu w przypadku 12% obiektów przekracza tę wartość.



Rysunek 3.13. Stopień obciążenia napędu obserwowany w populacji przenośników taśmowych tworzących zintegrowany ciąg transportowy w kopalni podziemnej (opracowanie własne).

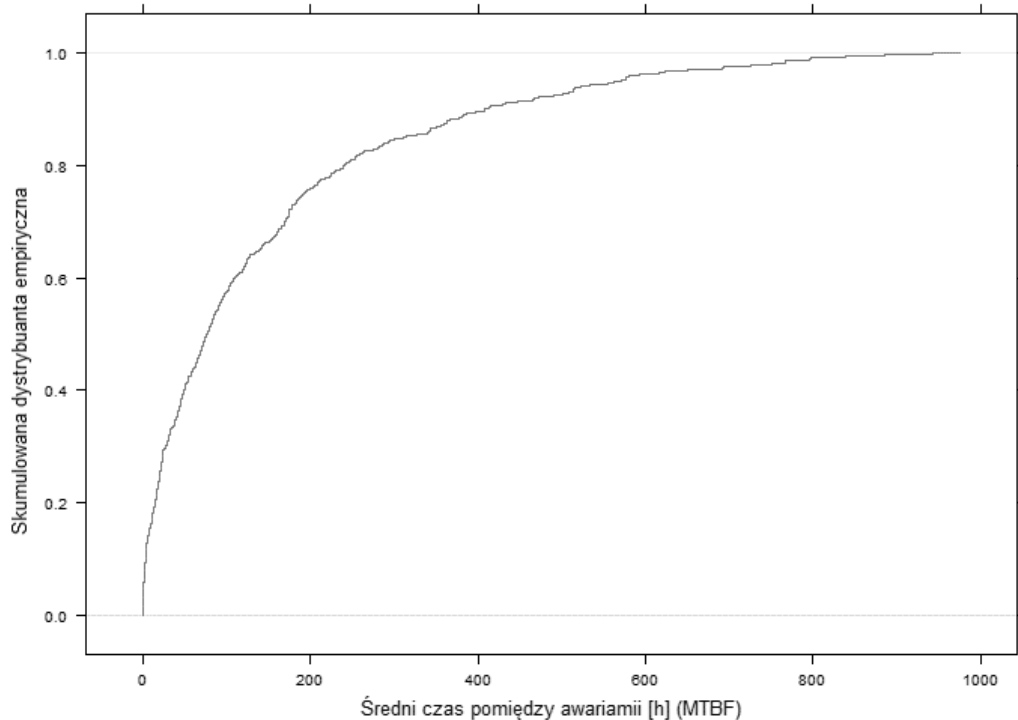
Należy zasygnalizować, że poddane analizie wartości obciążenia napędu cechują się mniejszą dynamiką niż chwilowy przepływ urobku, zależą od obciążenia całej długości trasy, a nie jej fragmentów, zatem lokalny stopień przeciążenia może być zdecydowanie większy. Wykres 3.13 zwraca również uwagę na to, że pomimo obserwowanych przeciążeń ogólny stopień obciążenia napędów jest niski. Powyższa interpretacja uzmysławia wagę problemu właściwej interpretacji danych, w sytuacji braku jednoznacznych wytycznych eksploatacyjnych w zakresie krótkotrwałej przeciążalności i długofalowej efektywności pracy przenośników taśmowych stosowanych w górnictwie podziemnym. W tym przypadku szersze zastosowanie może znaleźć system rankingowy, pozwalający szybko uporządkować urządzenia według badanej cechy i zidentyfikować skrajne, jak i zupełnie odstające od ogółu przypadki.



Rysunek 3.14. Prawdopodobieństwo pracy fragmentu odstawy taśmowej kopalni węgla kamiennego o danej porze zegarowej (opracowanie własne na podstawie 3-tygodniowej obserwacji dni produkcyjnych).

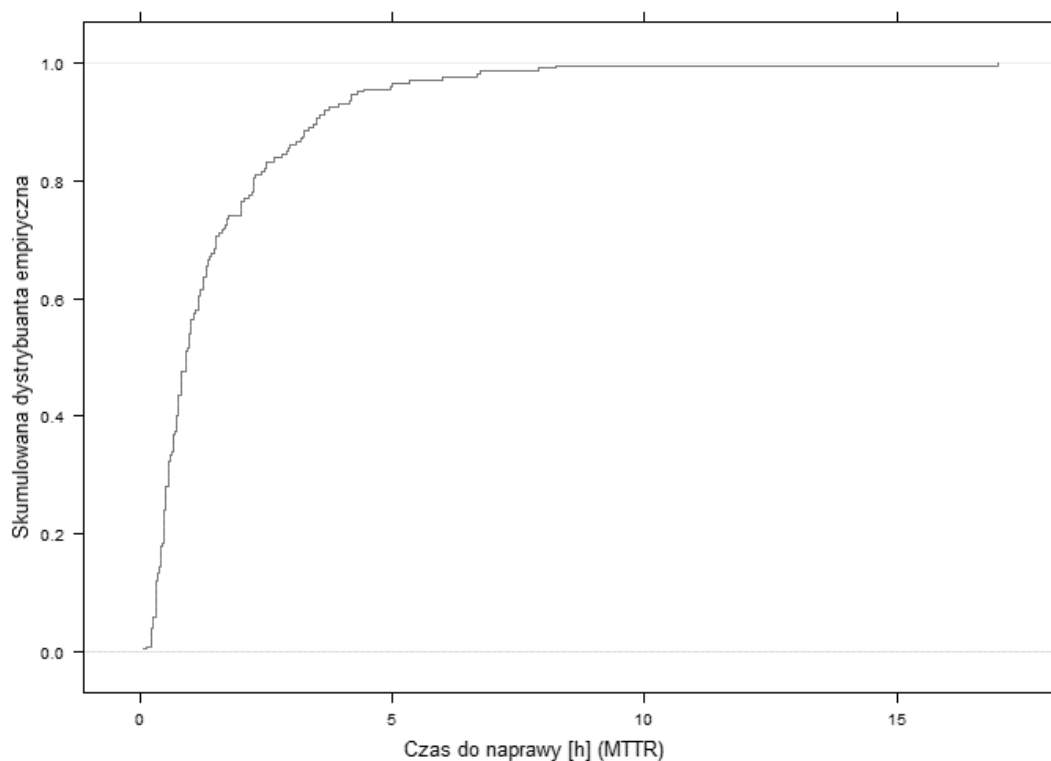
Na rysunku 3.14 zamieszczono zbiorczy szacunek czasu pracy (obciążenia) wybranych ciągów odstawy taśmowej w kopalni węgla kamiennego. Obliczenia wyrażono jako miarę prawdopodobieństwa pracy danego ciągu taśmowego o danej porze dnia. Analiza danych pozwala stwierdzić, że sposób organizacji pracy jest zmienny w kontekście różnych oddziałów wydobywczych. Zauważyć można zarówno przesunięcie pomiędzy przerwami występującymi na koniec zmiany roboczej dla oddziałów o numerach 1 oraz 2, jak również zasadniczy brak wyłączenia ciągu odstawy pomiędzy zmianami roboczymi w przypadku oddziałów 3 oraz 4. Harmonogram pracy odstawy taśmowej zależy od wielu czynników, wśród których wymienić należy przede wszystkim: organizację procesu wydobycia, odległość od szybu, czas transportu załogi, długość ciągu odstawy taśmowej. Na ogół przebieg ten w głównej mierze zależy od czasu niezbędnego na dotarcie i zmianę załogi produkcyjnej na przodkach ścianowych. Na rysunku widoczne jest również przeznaczenie jednej ze zmian produkcyjnych na potrzeby obsługi konserwacyjnej, w tym przypadku dotyczy to zmiany czwartej. Praktyka ta jest często stosowana w podziemnych kopalniach, pozwala na sprawne wykonanie prac eksploatacyjnych towarzyszących wydobyciu takich m.in. konserwacja maszyn i urządzeń, skrócenie przenośnika w wyrobisku podścianowym przodka ścianowego w okresie rewizji i postoju górniczego wyciągu szybowego.

W dalszej części rozdziału przedstawiono podstawowe dane dotyczące awaryjności przenośników taśmowych, które posłużyły do wykonania modeli eksploatacyjnych uwzględniających typową uszkodzalność (rys. 3.15) i naprawialność (rys. 3.16) tychże obiektów technicznych.



Rysunek 3.15. Rozkłady czasu do awarii (ang. MTBF) w populacji badanych przenośników taśmowych (opracowanie własne).

W trakcie przygotowania danych wejściowych dla potrzeb walidacji modeli w rozdziale 7, uwzględniono łącznie 965 awarii środków odstawy urobku w kopalniach węgla kamiennego. Na podstawie powyższych danych przyjęto wskaźniki średniego czasu do naprawy (ang. *Mean Time To Repair*, MTTR) na poziomie 1 godziny 44 minut oraz średniego czasu do awarii (ang. *Mean Time Between Failures*, MTBF) na poziomie 148 godzin. Mediana wyznaczonych empirycznie wartości dla średniego czasu do naprawy wyniosła 59 minut, a dla średniego czasu do awarii 77 godzin 18 minut. Zważywszy na sposób ewidencji danych, podane wskaźniki opisują jednak niezawodność szeregowego układu przenośników na odcinku od przenośnika podścianowego do zbiorników retencyjnych lub przyszybowych, a więc zwykle od ok. 5 do ok. 8 przenośników taśmowych. Stan spowodowany jest tym, że statystyka awarii z dekretacją dla poszczególnych przenośników nie jest zwykle prowadzona.



Rysunek 3.16. Rozkłady czasu do odzyskania zdolności (ang. MTTR) w populacji badanych przenośników taśmowych (opracowanie własne).

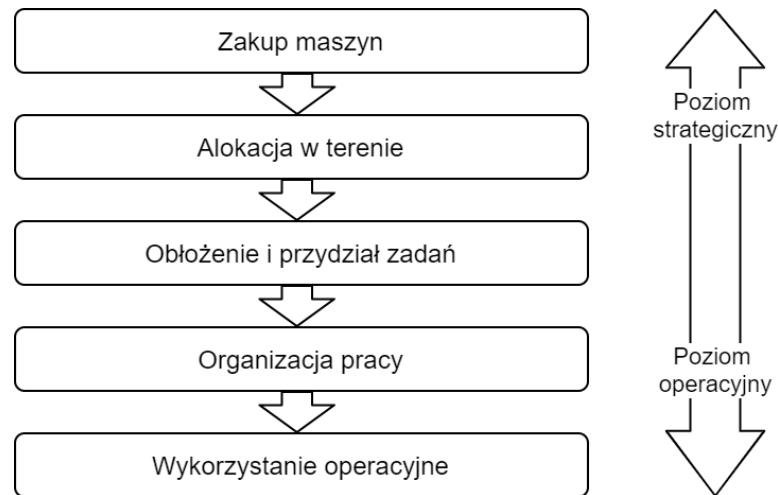
Podsumowując przykłady danych pomiarowych zamieszczonych w rozdziale, do podstawowych problemów związanych z eksploatacją przenośników taśmowych zaliczyć należy:

- przeciążenie napędu,
- zasypanie trasy przenośnika,
- niską efektywność pracy.

Kwestie te, ze względu na skalę zastosowania transportu taśmowego urobku, obligatoryjnie powinny znaleźć odzwierciedlenie w analizie wielokryterialnej realizowanej z użyciem modeli symulacyjnych. Odnośnie do budowy modelu symulacyjnego odwzorowującego pracę przenośników, kluczowe z perspektywy aplikacyjnej wartości pracy jest jak najdokładniejsze odwzorowanie obciążenia urobkiem w aspekcie zarówno rozkładu gęstości nasypowej, jak i korelacji czasowej nadawy urobku. Jak stwierdzono, dodatkowe wsparcie w zakresie przygotowania danych wejściowych dostarczyć mogą metody analizy korelacji bądź autokorelacji sygnałów rejestrowanych przez aparaturę kontrolno-pomiarową.

3.2.2. Transport maszynami samojezdnymi

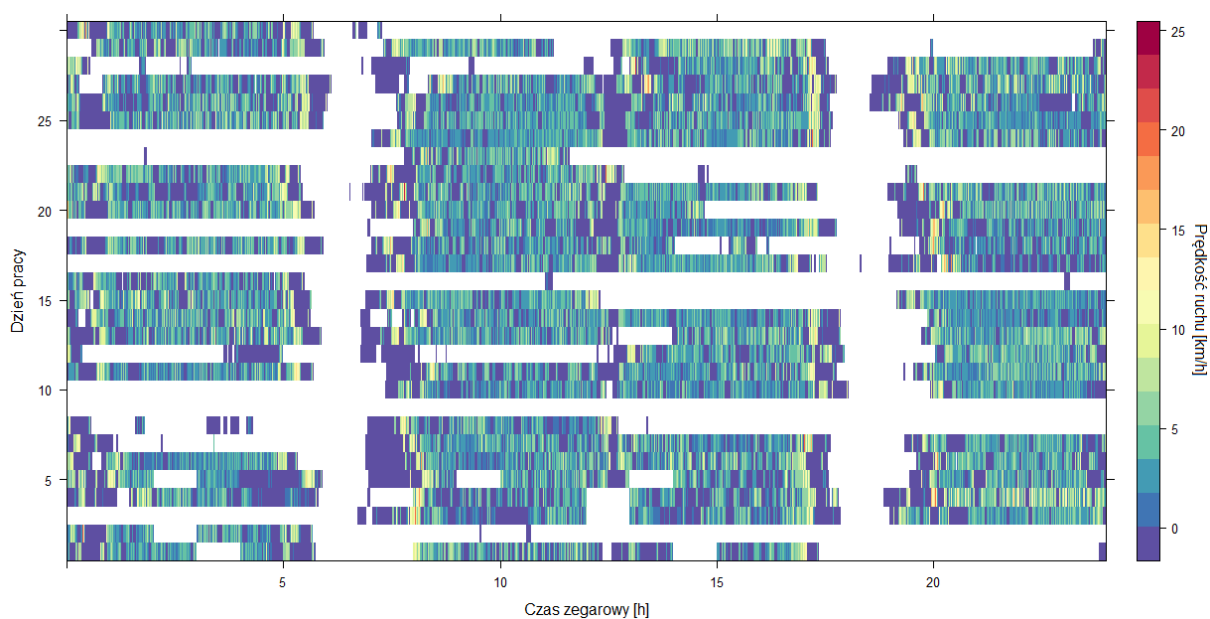
Odstawa górnictwem maszynami samojezdnymi nazwana często potocznie „odstawą kołową” lub celem dalszego zróżnicowania „odstawą oponową” wykorzystywana jest na większą skalę w Polsce w kopalniach rud miedzi oraz cynku i ołowiu. W kopalni rud miedzi KGHM SA w sposób ciągły w użyciu znajduje się 1300 maszyn z czego ok. 700 stanowią maszyny podstawowe m.in. ładowarki oraz wozy odstawcze urobku. Gospodarka tak rozbudowanym parkiem maszynowym stanowi ok. 30% technicznego kosztu wytworzenia. Skala i sposób odwzorowania pracującej niezależnie floty samojezdnych maszyn transportowych definiuje więc zupełnie odmienne wymagania techniczne oraz analityczne w odniesieniu do tematu pracy. Proces odstawy urobku realizowany za pośrednictwem maszyn samojezdnych w porównaniu do kopalń węgla kamiennego eksploatujących metodą ścianową ma swoisty, niestacjonarny przebieg. Przydział maszyn do pracy zmienia się w sposób dynamiczny, podobnie jak zmianom ulegają drogi transportowe oraz zadania związane z odstawą urobku z przodków. Efektem czego realizacja procesów transportowych z użyciem rozbudowanego parku maszyn transportowych wymaga wsparcia w zupełnie innym obszarze decyzyjnym niż ma to miejsce w przypadku odstawy taśmowej. Dla przykładu ich praca wymaga uwzględnienia lokalizacji przodków przeznaczonych do wybrania, miejsc obsługi konserwacyjnej, punktów tankowania, komór mechanicznych. Aktualna dostępność poszczególnych grup i typów maszyn: ładowarek lekkich, ładowarek ciężkich, wozów odstawczych zmieniać się może zarówno w długim jak i krótkim horyzoncie czasowym uwzględniając awarie, remonty maszyn i politykę inwestycyjną. Szczególnego znaczenia nabierają kwestie odpowiedniego przydziału zasobów do zadań transportowych, ich alokacja w terenie oraz określenie ogólnych zasad współpracy. Jak wykazano w przeglądzie literatury w rozdziale 2.1. kwestiom optymalizacji obejmującej przydział zadań dla poszczególnych maszyn, poświęconych zostały liczne pozycje literaturowe. Z reguły obejmują one rozwiązanie powszechnego w optymalizacji tzw. problemu transportowego, tak by przy skończonych zasobach sprzętowych parku maszynowego realizacja zadań transportowych była możliwa najniższym kosztem. Przy czym funkcja kosztu może być dowolnie zdefiniowana w przestrzeni: czasu, produktywności, wydajności, zużycia paliwa, niezawodności oraz wskaźników pochodnych. Co więcej, gabaryty wyrobisk również mogą ograniczać możliwość zastosowania konkretnej maszyny lub wpływać na zwiększenie kosztów eksploatacji w związku z uszkodzeniami infrastruktury, obejmującymi między innymi zerwane linie elektroenergetyczne lub telekomunikacyjne. Uwzględniając powyższe kryteria, zagadnienie ogólnej racjonalizacji procesu transportowego realizowanego z użyciem maszyn samojezdnych staje się bardzo złożone i obejmuje wiele obszarów decyzyjnych (rys. 3.17).



Rysunek 3.17. Możliwe poziomy oceny i doskonalenia pracy samojezdnych maszyn transportowych (opracowanie własne).

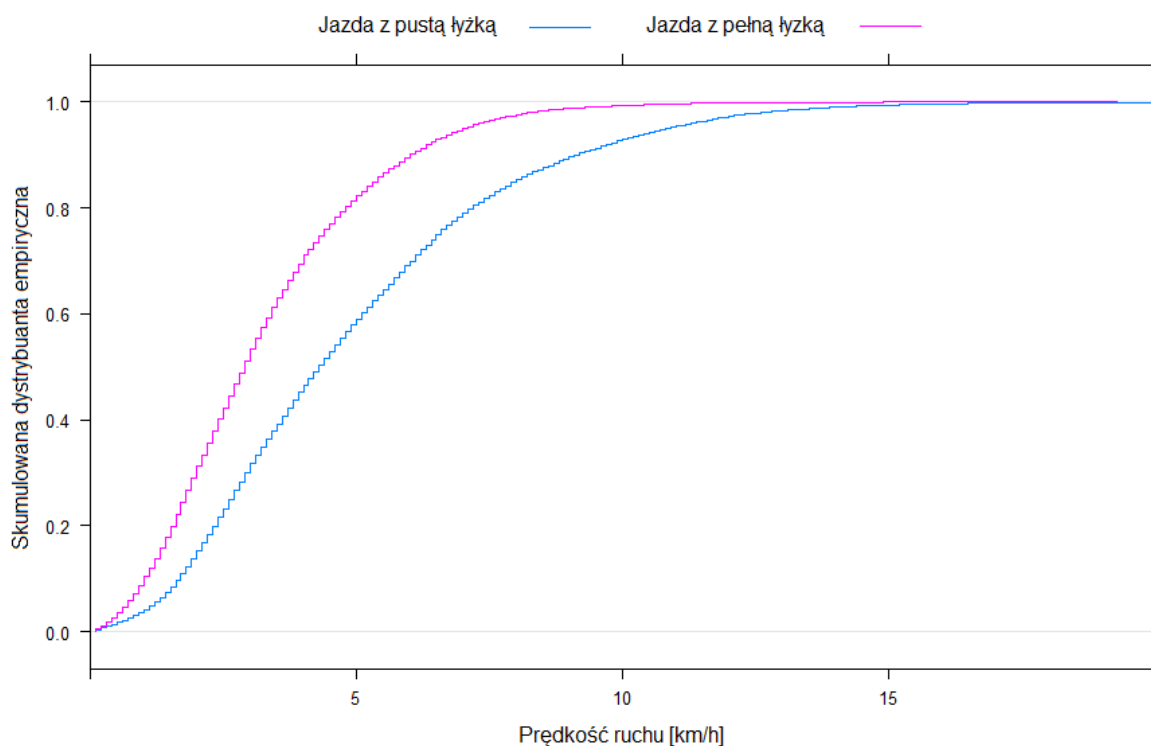
Zakupy tychże maszyn ze względu na przyspieszone zużycie eksploatacyjne stanowią najczęściej proces ciągły obejmujący wymianę od 15 do 25% stanu ogólnego rocznie. Uwzględniając dodatkowo ich ograniczone zdolności transportowe (pojemność łyżki wysokomanewrowej ładowarki realizującej operację ładowania, przewozu i zrzutu wynosi zwykle od 1 do maksymalnie 8,5 m³ urobku w przypadku ładowarek ciężkich a pojemność skrzyni wozu odstawczego wynosi wyłącznie 11–13m³) realizacja zadań z ich wykorzystaniem wymaga dodatkowo utrzymania wysokiego stanu liczebnego. Wymienione uwarunkowania skracają znacząco wymagany horyzont czasowy badań symulacyjnych, co należy rozpatrywać jako korzyść, jednak w przypadku stosowania znaczącej ilości podstawowych maszyn jednocześnie jak ma to miejsce m.in. w kopalniach KGHM SA realizacja badań symulacyjnych może być utrudniona. Uzasadnione wydaje się zatem co najmniej częściowe ograniczenie badań symulacyjnych w aspekcie organizacji ich pracy, do elementarnych przypadków użycia w obrębie segmentów kopalni, celem rozwiązania powtarzalnych problemów decyzyjnych. Co stanowi o nieco innych wymaganiach niż te sformułowane wcześniej dla odstawy taśmowej.

Na rysunku 3.18 zamieszczono przykładową ilustrację przebiegu pracy ładowarki samojezdnej objętej systemem monitoringu stanu pracy. Stosując analizę parametrów pracy maszyny w dalszej kolejności w celu identyfikacji jazdy maszyny z pełną lub pustą łyżką zastosowany został algorytm interpretujący chwilowe zmiany ciśnienia płynu w układzie hydraulicznym członu roboczego.



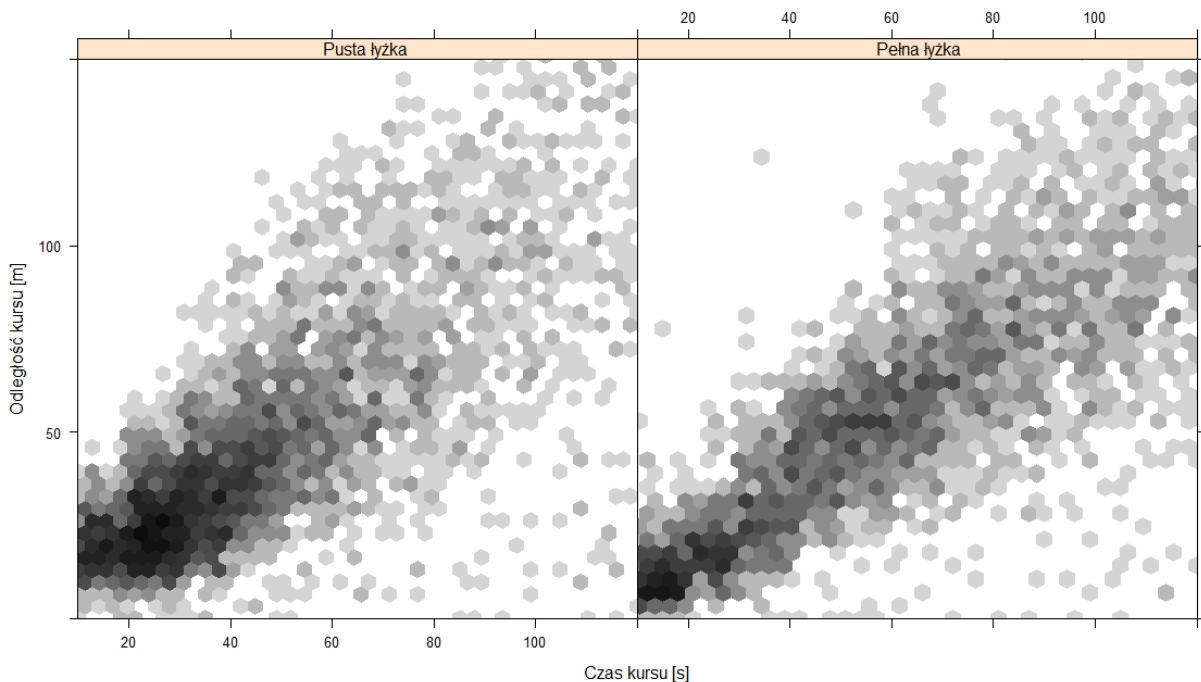
Rysunek 3.18. Ilustracja prędkości ruchu ładowarki typu LHD w układzie czas zegarowy oraz dzień produkcyjny (opracowanie własne).

Ilustracja 3.18 pozwala zauważyć organizację dnia roboczego maszyny obejmującą cztery zmiany produkcyjne, pomiędzy którymi realizowany jest postój maszyny. Należy podkreślić, że tylko dwie zmiany zakończone są powrotem maszyny do komory maszyn ciężkich, w pozostałych przypadkach wymiana operatora realizowana była w obrębie oddziału wydobywczego, co pozwala wydłużyć jej efektywny czas pracy.



Rysunek 3.19. Rozkład prędkości jazdy ładowarki typu LHD z rozróżnieniem stanu załadowania łyżki (opracowanie własne).

Na rysunku 3.19 zamieszczono rozkłady prędkości jazdy podczas kursu z pełną lub pustą łyżką. Analiza danych dodatkowo pozwoliła stwierdzić, że kursy z pustą łyżką charakteryzują się zauważalnie wyższą prędkością, co wydaje się w pełni uzasadnione.



Rysunek 3.20. Relacja pomiędzy odległością a czasem wykonania kursu załadunkowego dla ładowarki typu LHD z rozróżnieniem stanu załadunku łyżki (opracowanie własne).

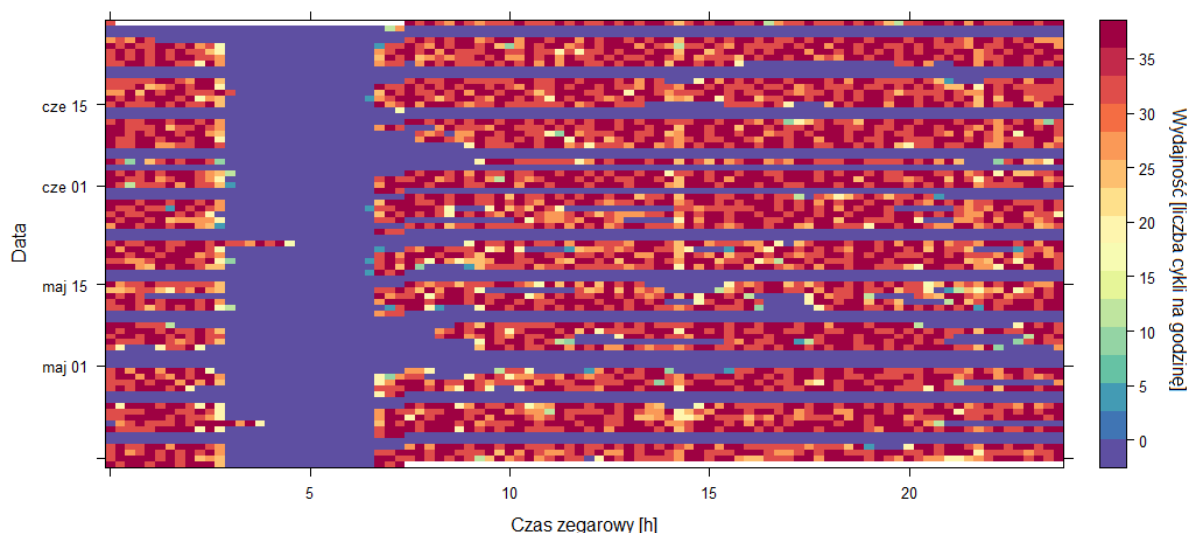
Rysunek 3.20 dodatkowo pozwala stwierdzić, że kursy z pustą łyżką są na ogół krótsze, natomiast wśród kursów z załadowaną łyżką wyróżnić można część kursów krótkich oraz kursy stosunkowo długie o odległości ok. 70 metrów. Długość kursów z załadowaną łyżką jest też bardziej zróżnicowana, co wynikać może z manewrów wymaganych w celu jej napełnienia. W celu jak najdokładniejszego odwzorowania modele symulacyjne powinny uwzględniać tego rodzaju prawidłowości, które są możliwe do zaobserwowania w drodze tego rodzaju analizy danych empirycznych. Otrzymane charakterystyki wyjściowe mogą pozwolić na zdecydowanie lepszą kalibrację modelu symulacyjnego niż teoretycznie założone czasy wykonania kursu dla poszczególnych maszyn lub tzw. krzywe produktywności zamieszczone m.in. w pracy (Leeuw i Mkhwanazi 2017). Analiza danych z układów pomiarowych pozwala m.in. na zidentyfikowanie warunków w jakich i na jakim odcinku dochodzi m.in. do wymijania się maszyn jadących w przeciwnym kierunku oraz ich przymusowego postoju. Podobnie jak w przypadku zbiorników retencyjnych i górniczych wyciągów szybowych, dane te z powodzeniem mogą posłużyć do wykonania i weryfikacji działania szczegółowego modelu symulacyjnego zaimplementowanego w tym zakresie.

Zważywszy na tematykę pracy, proces zarządzania parkiem samojezdnych maszyn transportowych stanowi specyficzne zagadnienie badawcze, w którym duże znaczenie odgrywają interakcje pomiędzy poszczególnymi obiektami oraz swoboda ruchu. Toteż modelując pracę maszyn samojezdnych, należy uwzględnić zaawansowany system wzajemnych interakcji bazujący na zasadach organizacji ruchu i przydziału prac, tudzież dowolne w obrębie wyrobisk transportowych, ścieżki przemieszczania się. Właściwości te komplikują zasadniczo opracowanie uniwersalnego modelu odwzorowującego ich pracę w sposób analogiczny jak ma to miejsce w przypadku odstawy taśmowej. Przemawia to za zastosowaniem zróżnicowanych podejść wyróżniających się m.in. szczegółowością odwzorowania

rzeczywistego procesu transportowego z uwagi na indywidualne i grupowe cechy charakterystyczne dla technicznych środków realizacji procesu. Tego rodzaju podejście również napotyka pewne trudności, gdyż w części kopalń m.in. zakładach górniczych KGHM SA, rozbudowany park maszyn samojezdnych współpracuje ze złożonym systemem przenośników taśmowych.

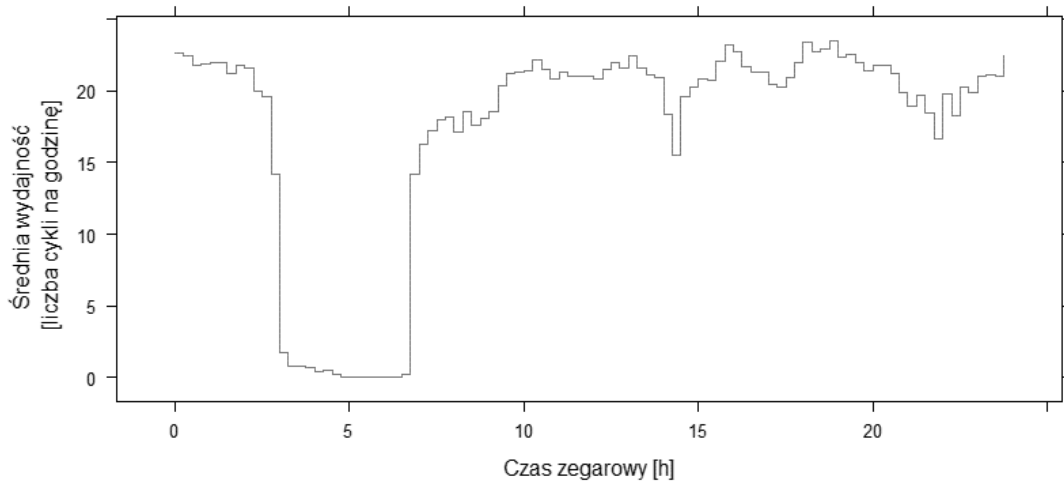
3.2.3. Transport wyciągiem szybowym

Praca górniczego wyciągu szybowego ma zasadniczy wpływ na przebieg procesu transportu, jako że stanowi on obiekt wymagający stałej obsługi utrzymaniowej oraz wąskie gardło ograniczające zdolności wydobywcze wysokowydajnej kopalni podziemnej. Aktualnie w celu ciągnięcia urobku niemalże w całości wykorzystywane są naczynia skipowe – odstawa wozami do szybu i ciągnięcie szybami urobku w wozach realizowane jest sporadycznie i dotyczy głównie wyodrębnionych układów odstawy, jak m.in. odstawa kamienia.



Rysunek 3.21. Przykładowy zapis parametrów pracy wybranych wyciągów szybowych w układzie czas zegarowy – kolejne dni produkcyjne (opracowanie własne).

W celu ukazania przebiegu procesu transportowego realizowanego z użyciem górniczego wyciągu szybowego na rysunku 3.21 zamieszczono chwilową wydajność pracy wyrażoną w liczbie cykli na godzinę. Interpretując zapis pracy obiektu, trudno nie zauważyć stabilnej wydajności jego pracy wynikającą z funkcji zbiorników retencyjnych poprzedzających ten obiekt w ciągu transportowym. Wyraźnie widoczne są również przerwy obsługowe z organizacją przestrzegającą reżimu czasowego. W mniejszym stopniu widoczne są lokalne spadki wydajności wynikające z wyczerpania stanu zbiorników retencyjnych po zakończeniu zmiany produkcyjnej. Zmiany te zostały osobno zilustrowane z zastosowaniem agregacji w wymiarze czasu zegarowego na rysunku 3.22.



Rysunek 3.22. Statystyczny przebieg pracy górnictwa szybowego opisany poprzez średnią wydajność uzyskiwaną o danej porze dnia (agregacja uwzględnia również dni świąteczne) (opracowanie własne).

Przy znanej pojemności naczynia oraz określonym działaniu układu odmierzającego masę i objętość transportowanego urobku, zliczając liczbę cykli możliwe jest zgrubne oszacowanie wydobywania kopalni – co jest w praktyce szeroko stosowane do celów zarządczych. Ten rodzaj pośredniego pomiaru został również zastosowany na potrzeby niniejszej pracy w celu kalibracji modelu.

3.2.4. Transport koleją szynową

Całościowe znaczenie kolei kopalnianej jako środka realizacji transportu urobku zmalało do marginalnych zastosowań wskutek postępującej mechanizacji i automatyzacji procesu urabiania. Wynikiem czego kolej kopalniana jest obecnie w bardzo ograniczonym stopniu wykorzystywana w celach transportu urobku węglowego lub rudy, a jej zastosowanie obejmuje na ogół odstawę urobku kamiennego. Odstawa wozami wykorzystywana jest szerzej w przypadku wydobywania soli, jednak zważając na skalę zastosowania oraz dużą dostępność literatury poświęconej tematowi analizy i optymalizacji podziemnych sieci kolejowych, w niniejszej pracy analiza pracy kolei kopalnianej została uwzględniona, lecz zgodnie z stanem faktycznym, jako jedynie pomocniczy środek transportu urobku.

Do podstawowych zalet kolei kopalnianej należy wymienić jej wysoką efektywność oraz możliwość nieregularnej (nadażnej) pracy, jak również dodatkową funkcję retencji urobku realizowaną przez wozy urobkowe.

Funkcjonujący w obrębie kopalni podziemnej system kopalnianej kolei szynowej, wąskotorowej składa się z: elementów stałych, tj. torów kolejowych, stacji załadunkowych i rozładunkowych, rozjazdów, mijanek, oraz elementów ruchomych m.in.: taboru wozowego m.in. wozów urobkowych i taboru trakcyjnego wykorzystywanego do ciągnięcia wozów. Struktura funkcjonalna wymaga więc stosowanego odwzorowania w modelu symulacyjnym, w pewnym stopniu w sposób zbliżonego do odstawy z użyciem maszyn samojezdnych opisanej w rozdziale 3.2.2. Rozpatrując w znacznym uproszczeniu cechy funkcjonalne kolei kopalnianej, istotne z perspektywy modelu symulacyjnego, w sytuacji istnienia wyłącznie pojedynczych odcinków transportowych, można zastosować podejście uproszczone, zakładające przemieszczanie urobku w sposób opisany funkcją ciągłą lub cykliczną

(regularny bądź nieregularny). Przy czym nie umożliwia to odwzorowania bardziej złożonych systemów kolei kopalnianej.

Zważywszy na fakt, że praca kolei kopalnianej poza dokumentacją ruchową i ewidencją ręczną nie jest na ogół objęta systemem monitoringu, z wyłączeniem nielicznych kopalń, w których częściowo wdrożone zostały elementy systemu śledzenia taboru kolejowego podziemnego (m.in. ZG Sobieski, KWK Pniówek, KWK Budryk) w niniejszej pracy w celu weryfikacji modeli symulacyjnych układ transportu kolejną kopalnianą odwzorowany został na podstawie teoretycznych wartości, obejmujących głównie czas wykonania cyklu transportowego oraz jednostkową pojemność urobku. Tym niemniej na etapie opracowania modeli symulacyjnych uwzględniono potrzebę odwzorowania złożonych systemów transportu kolejowego wraz z systemem wzajemnej interakcji, tak jak zostało to przedstawione w powołanych w rozdziale 2.1. materiałach źródłowych.

Należy zaznaczyć, że symulacja i analiza pracy kolei kopalnianej i kolejek podziemnych nabiera szczególnego znaczenia wraz z uwzględnieniem problematyki transportu materiałów, wyposażenia oraz ludzi. Dotyczy to w szczególności:

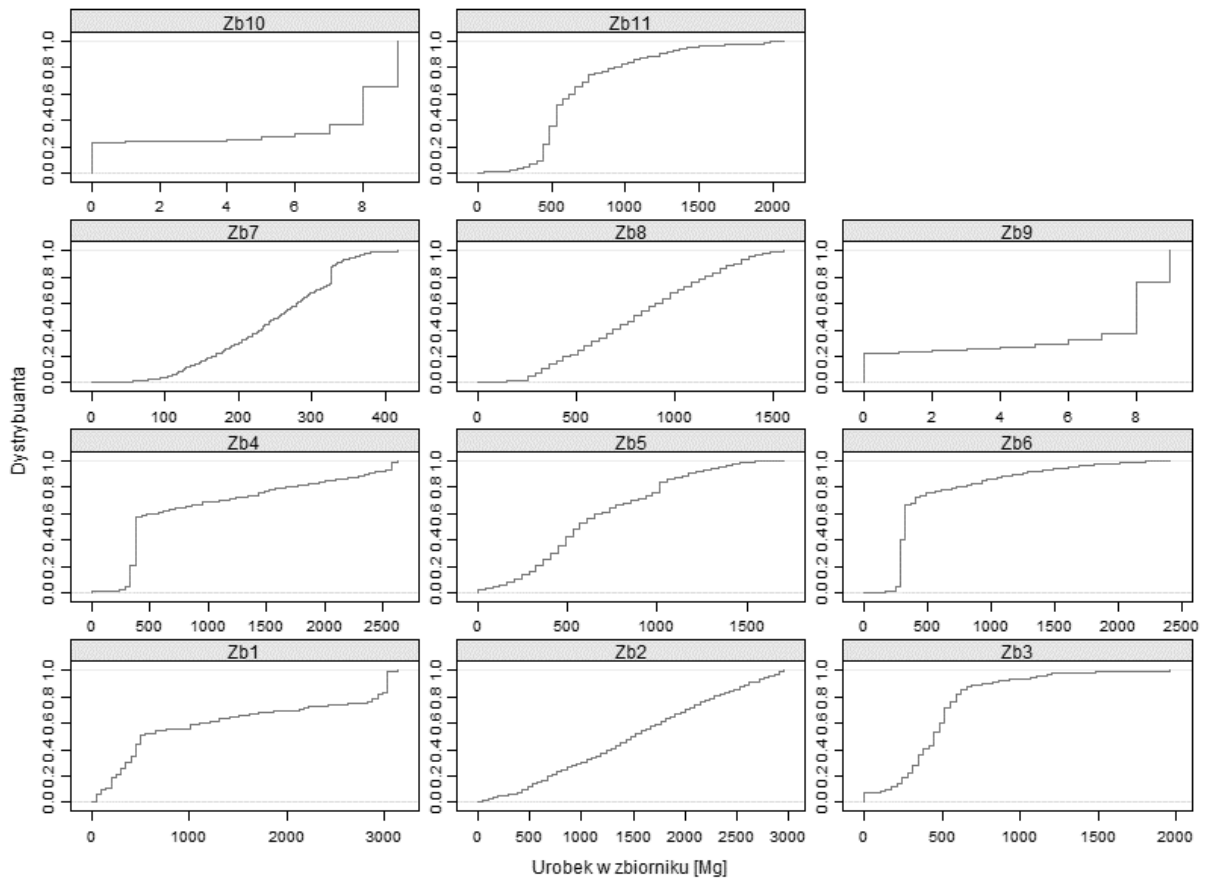
- doskonalenia wewnętrznych przepływów materiałów i pozostałych środków produkcji (m.in. ograniczenie do minimum powtórnych ruchów materiałowych, zmniejszenie czasu oczekiwania na realizację zadań transportowych, zbilansowanie zapotrzebowania na materiały poprzez eliminacje nadmiernych stanów rezerw operacyjnych, wykorzystanie w jak największym stopniu zdolności transportowych),
- optymalizacji funkcjonowania układów transportowych (przewóz materiałów i wyposażenia, transport załogi, odstawa urobku) skutkującej poprawą kluczowych miar wydajności i efektywności dróg transportowych oraz wydłużeniem efektywnego czasu pracy oddziałów wydobywczych i przygotowawczych,
- usprawnienia technicznej realizacji procesu transportu, załadunku i rozładunku materiałów,
- usprawnienia komunikacji pomiędzy pracownikami dołowymi,
- poprawy efektywności zarządzania zasobami ludzkimi,
- poprawy bezpieczeństwa pracy pod ziemią oraz wzrostu efektywności prowadzenia ewentualnych akcji ratunkowych,
- zapewnienia zgodności z obecnymi i przyszłymi uregulowaniami prawnymi.

Tematyka ta jest jednak w ograniczonym stopniu zbieżna z problematyką niniejszej pracy, stanowiąc potencjalny kierunek rozwoju zaproponowanych w pracy modeli symulacyjnych.

3.2.5 Zbiorniki urobku

Zbiorniki urobku stosowane w kopalniach podziemnych pełnią funkcję akumulacyjną w początkowym, pośrednim lub końcowym odcinku odstawy. Klasyfikacja zbiorników stosowanych pod ziemią, zasadniczo rozróżnia zbiorniki typu górniczego oraz zbiorniki typu mechanicznego. Dodatkowo w skład tych obiektów wchodzi szereg urządzeń umożliwiających ich zamknięcie, wyładowanie, zapobiegające kruszeniu urobku lub tworzeniu zatorów (Antoniak 1990). Zbiorniki urobku w ogromnej większości stanowią obiekty opomiarowane zarówno w zakresie stanu urządzenia dozującego, jak i stopnia napełnienia. Ich stopień napełnienia to podstawowa informacja wykorzystywana przez dyspozytora kopalni w celu zapewnienia ciągłości ruchu zakładu górniczego oraz procesu odstawy

urobku z przodków wydobywczych. Tożsame dane pomiarowe obejmujące poziom napełnienia zbiorników urobkiem zostały wykorzystane w niniejszym rozdziale do przygotowania rozkładów wartości zamieszczonych na rysunku 3.23.



Rysunek 3.23. Rozkład masy urobku zgromadzonego w zbiorniku w okresie kilkudniowej obserwacji (opracowanie własne).

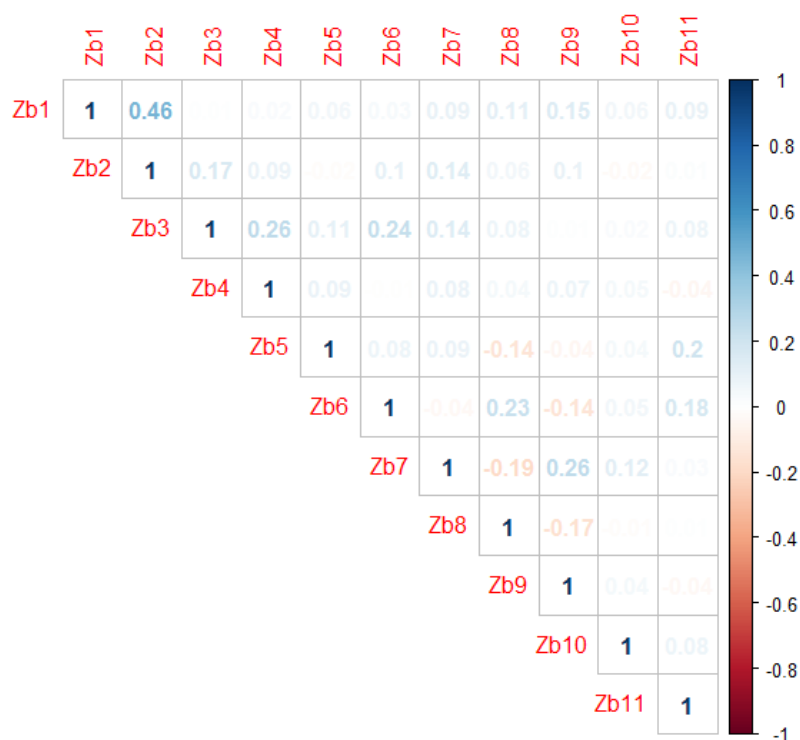
Interpretując rozkłady napełnienia zbiorników, należy zauważyć, że sposób użytkowania poszczególnych obiektów różni się w znaczącym stopniu i zależy wprost od lokalizacji przestrzennej, lokalizacji w układzie technologicznym oraz ich przeznaczenia. Masę urobku zgromadzoną w zbiorniku można opisać ogólnym równaniem stanu (wzór 3.4), właściwym wielu obiektom transportowym pracującym w sposób ciągły w tym przenośniku taśmowym.

$$R(t)' = R(t) + Q_{we}(t) - Q_{wy}(t) \quad (3.4)$$

gdzie:

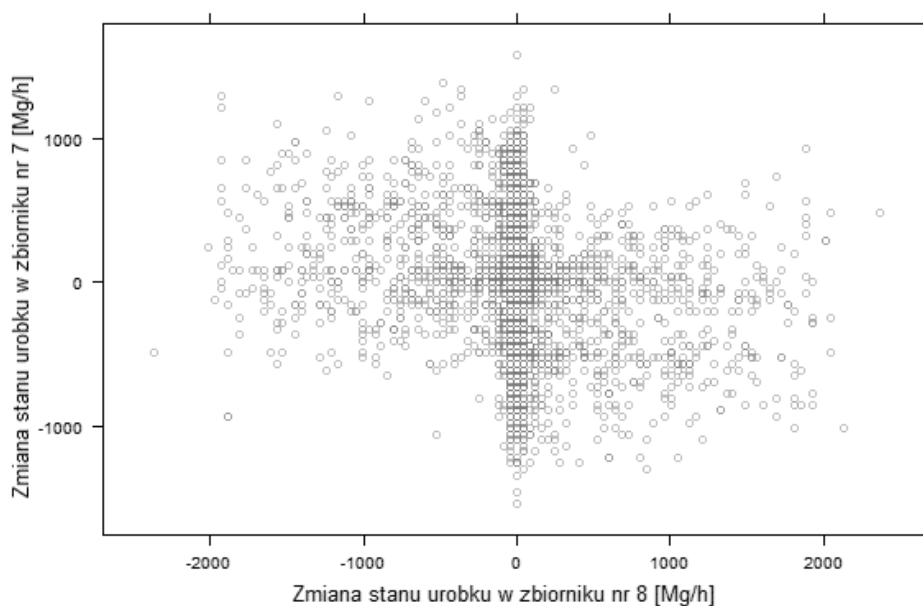
- R – ilość zgromadzonego urobku [Mg],
- Q_{we} – chwilowy przepływ urobku do zbiornika [Mg/h],
- Q_{wy} – chwilowy przepływ urobku ze zbiornika [Mg/h].

Należy przy tym podkreślić, że działanie zbiorników retencyjnych w kopalni podziemnej nadzorowane jest w sposób skoordynowany. W celu identyfikacji wzajemnych zależności wykonano analizę korelacyjną, której miary wyrażone współczynnikiem korelacji Spearmana zilustrowano na rysunku 3.24.



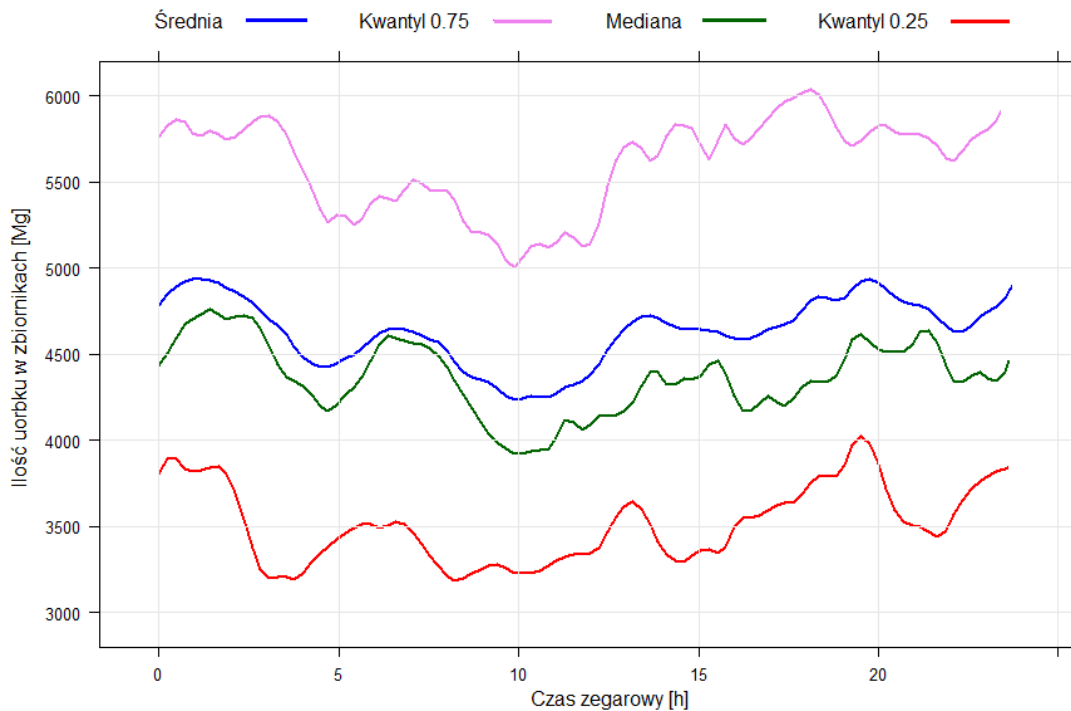
Rysunek 3.24. Korelacja zmiany stanu wypełnienia zbiorników (opracowanie własne).

Interpretacja danych w powołanym przykładzie pozwala sformułować wniosek, że dla korelacji dodatnich – ma miejsce jednoczesne skierowanie urobku do zbiorników w tożsamym czasie, a dla korelacji ujemnych zbiorniki znajdują się w sąsiedztwie i pełnią naprzemiennie funkcję odbioru urobku. Identyfikując tym samym największą korelację ujemną pomiędzy zbiornikiem nr 7 a zbiornikiem nr 8 dodatkowo zilustrowano zależności pomiędzy zmianami stanu napełnienia w obu obiektach (rys. 3.25).



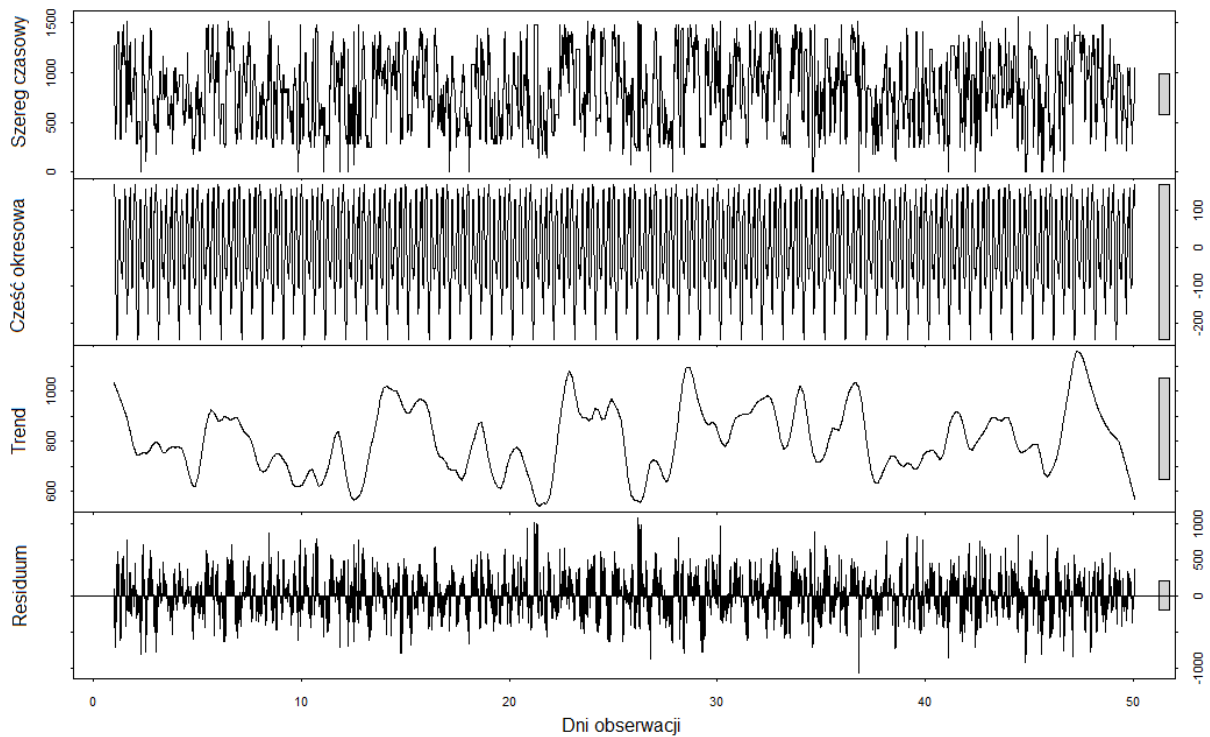
Rysunek 3.25. Korelacja pomiędzy zmianą stanu urobku zbiorników połączonych w sposób równoległy (opracowanie własne).

Na rysunku 3.25 wyraźnie zauważalny w formie skupień pomiarów jest obszar charakteryzujący stan pracy zbiornika nr 7 bez zmian stanu zbiornika nr 8. Pozwala to zdiagnozować, że zbiornik 7 traktowany jest jako podstawowy. Równocześnie widoczny jest stan gromadzenia urobku w zbiorniku 8 wraz z zrzutem ze zbiornika 7 (prawa strona wykresu) oraz stan gromadzenia urobku w zbiorniku 7 wraz z zrzutem ze zbiornika 8. Przesunięcie rozkładów na lewo oraz prawo od wartości 0 na osi poziomej, pozwala dopatrzeć się tego, że w marginalnym stopniu realizowane jest zapełnianie lub opróżnianie obydwu zbiorników równocześnie. Dane zestawione w opisany sposób, podobnie jak ich szersza interpretacja w dalszej części pracy, wykorzystane zostaną do celów przeprowadzenia symulacji odwzorowującej rzeczywiste uwarunkowania techniczne i organizacyjne przebiegu procesu transportu urobku.



Rysunek 3.26. Stan ilościowy urobku w zbiornikach opisany funkcją statystyczną względem pory dnia (opracowanie własne).

Analiza uprzednio przedstawionych danych pozwala w konsekwencji poznać przebieg i sposób sterowania procesem odstawy urobku. Dodatkowych informacji o przebiegu procesu transportowego, w celu opracowania modelu lub jego weryfikacji dostarczyć może agregacja danych w układzie czasu zegarowego prezentująca łączną ilość urobku znajdującą się w zbiornikach o danej porze dnia. Różne miary agregacji danych w tym układzie zostały zaprezentowane na rysunku 3.26. Posługując się wartością średnią należy stwierdzić, że największa ilość urobku przeciętnie zgromadzona jest na zakończenie drugiej oraz trzeciej zmiany produkcyjnej. Z kolei najniższy stan zbiorników obserwowany jest w godzinach przedpołudniowych. Wynika to bezpośrednio z dobowego cyklu produkcyjnego, harmonogramu pracy górniczego wyciągu szybowego i czasu wymaganego na dotarcie urobku do zbiorników przyszybowych.

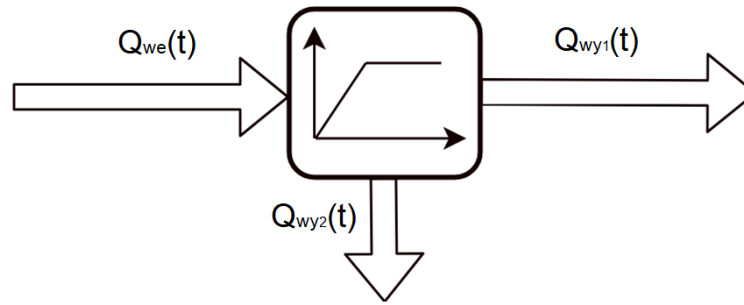


Rysunek 3.27. Dekompozycja szeregu czasowego zapisu stanu zbiornika retencyjnego urobku (opracowanie własne).

Na rysunku 3.27 zamieszczono wyniki dekompozycji szeregu czasowego procesu akumulacji urobku w zbiorniku retencyjnym z wykorzystaniem metody STL (ang. *Seasonal and Trend decomposition using Loess*). Analiza szeregu czasowego pozwoliła zidentyfikować okresową zmienność sygnału zbieżną z porą dnia oraz ogólny trend akumulacji urobku w zbiorniku na przestrzeni 50 dni obserwacji. Zastosowanie tego rodzaju przekształceń pozwala na lepsze zrozumienie danych wejściowych użytych w celu kalibracji modelu symulacyjnego.

3.2.6 Przesiewacz i przesyp

Przesiewacz i przesyp dwudrożny stanowią szczególne elementy systemu odstawy urobku. Ich działanie pozwala na dzielenie strugi urobku w zadany sposób. Z perspektywy odwzorowania w modelu symulacyjnym dla przesypu dwudrożnego założyć można nadmiarowy lub proporcjonalny sposób podziału strugi urobku. Działanie nadmiarowe można opisać jako przekierowaniu urobku przekraczającego zadaną wartość poprzez przykładowo jego zgarnięcie z przenośnika w innym kierunku. Działanie proporcjonalne zakłada natomiast ściśle ustalony, opisany proporcją rozdział strugi urobku. Obie funkcje mogą być opisane dodatkowo przez element losowy. Odwzorowanie stochastyczne jest szczególnie istotne w przypadku przesiewacza, względem którego mówić można o skuteczności w sensie stricte prawdopodobieństwa zarówno selektywnego przekierowania urobku na podstawie cech fizycznych w właściwe miejsce, jak też prawdopodobieństwa selektywnego skierowania urobku w niewłaściwe miejsce.



Rysunek 3.28. Uproszczona ilustracja działania przesiewacza oraz przesypu dwudrożnego (opracowanie własne).

Sposób działania wymienionych urządzeń posiada swoje określone konsekwencje w kontekście opracowania modeli symulacyjnych z ciągłym lub dyskretnym sposobem odwzorowania urobku. W modelu symulacyjnym proces transportowy urobku może zostać odwzorowany w postaci: chwilowego przepływu urobku, ilości masy zlokalizowanej w danej przestrzeni lub też liczby dyskretnych jednostek masy. W ostatnim przypadku zastosowanie podziału elementów dyskretnych masy stanowi zagadnienie problematyczne, prowadzące w konsekwencji do istotnego skomplikowania algorytmów.

3.3. Źródła nadawy

W rozdziale scharakteryzowano poszczególne źródła nadawy urobku, koncentrując jednoznacznie uwagę na czasowym przebiegu procesu urabiania. Należy zaznaczyć, że budowa adekwatnych oraz dobrze skalibrowanych modeli załadunku jest zadaniem krytycznie istotnym w celu prawidłowego odwzorowania procesu transportowego, stanowiącego uporządkowane następstwo procesu wydobywania kopaliny.

3.3.1. Kombajnowy system ścianowy

Zmechanizowane kompleksy ścianowe stanowią podstawowe wyposażenie kopalń węgla kamiennego w Polsce. Od kilku lat, oprócz kombajnów ścianowych, eksploatacja w polach ścianowych prowadzona jest również przy użyciu strugowych systemów wydobywczych. Różnice w pracy obydwu maszyn są zasadnicze, jednak w wielu aspektach możliwe jest zastosowanie jednorodnego opisu poprzez układ tożsamych miar efektywnościowych. W niniejszym rozdziale zamieszczono przykłady obejmujące oba systemy, z jednoczesnym wskazaniem, które z nich odnoszą się wyłącznie do kombajnowego systemu ścianowego.

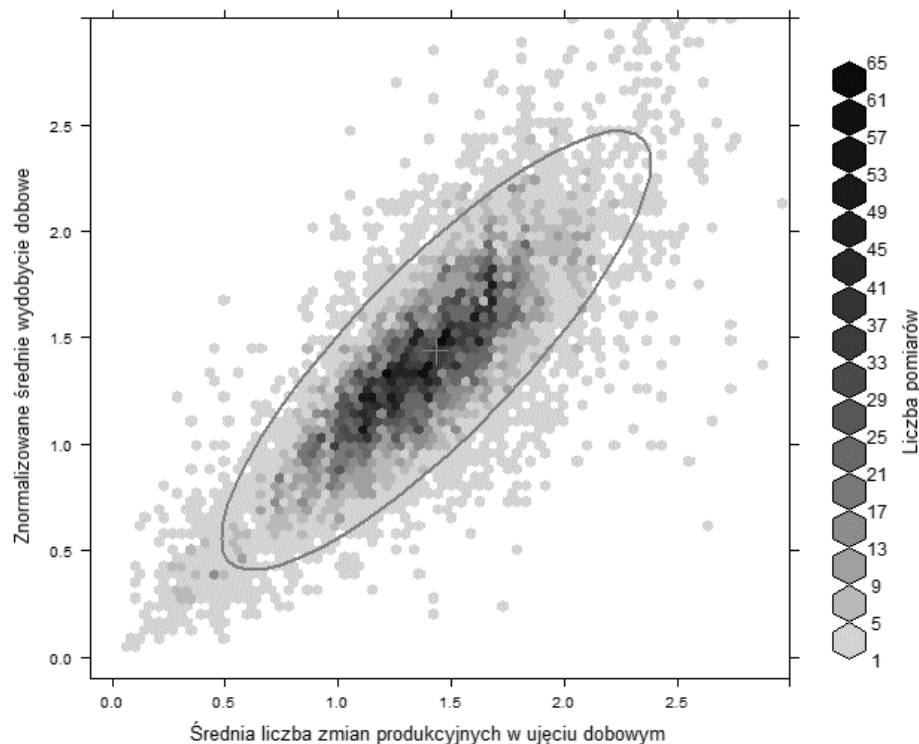
Kombajny ścianowe ze spiralnymi bębniami używane są w polskich kopalniach węgla kamiennego od lat 60. XX wieku (KWB-2, KWB-3). Zastąpiły one całkowicie stosowane wcześniej wrębiarki i kombajny konturowe, tym samym zmieniając zasadniczo organizację wydobywania w przodku (Frużyński 2012). Przebieg pracy kombajnu ścianowego oraz struga został opisany w sposób teoretyczny w wielu pozycjach naukowych, w tym między innymi w pracy (Myszkowski i Paschedag 2018). W rezultacie konfrontacji opisanych modeli z wynikami empirycznymi postanowiono jednak zrezygnować z zastosowania w pracy teoretycznego, uproszczonego schematu realizacji cyklu urabiania kombajnu lub

struga – gdyż te, jak stwierdzono w trakcie analizy rzeczywistych danych, nie korespondowały w wymaganym stopniu z obserwowanymi, rzeczywistymi przebiegami nadawy urobku w czasie. Należy to tłumaczyć to przede wszystkim decydującym wpływem ograniczeń bądź zaistnieniem mniej lub bardziej krótkotrwałych zdarzeń eksploatacyjnych o charakterze losowym, powiązanych z warunkami naturalnymi lub kwestiami technicznymi. Warto zauważyć, że na przebieg pracy kompleksu ścianowego wpływa tak wiele czynników, iż niektóre z prac m.in. (Andraş, Andraş 2015) prezentują zastosowanie modelu symulacyjnego wyłącznie w zakresie analizy wytrzymałości mechanicznej kompleksów wydobywczych. Ukierunkowuje to uwagę na kwestie związane z niezawodnością i ciągłością pracy systemu wydobywczo-transportowego, a nie jedynie modelowym odwzorowaniem przebiegu operacji technologicznych.

W niniejszej pracy w celu modelowania punktów załadunkowych urobku pochodzącego z kompleksów ścianowych przyjęto, że dynamika napływu urobku uzależniona jest:

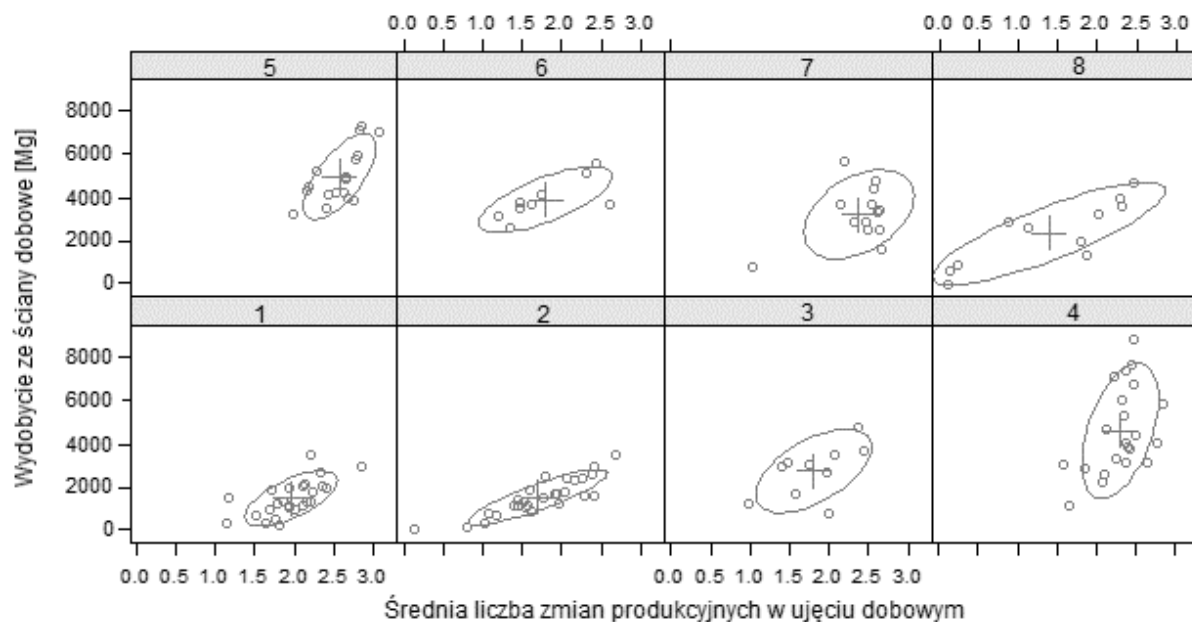
- dniem tygodnia (zależy od organizacji tygodnia pracy),
- czasem zegarowym (zależy od organizacji dnia produkcyjnego),
- stanem technicznej zdolności do pracy,
- stanem i wydobywaniem z pozostałych ścian w kopalni,
- fazą postępu ściany,
- pozycją w ścianie,
- kierunkiem urabiania,
- bieżącym, nieprzerwanym czasem trwania stanu pracy lub postoju,
- elementem losowości z historią stanu,
- elementem losowości o charakterze chwilowym.

Za punkt wyjścia do opracowania modeli załadunkowych dla kompleksów zmechanizowanych przyjęto średnią wartość nadawy urobku oraz zmienność tego parametru w czasie. Badania przodków ścianowych przeprowadzone w tym zakresie przede wszystkim pozwalają powiązać uzyskiwany wynik produkcyjny w ujęciu dobowym z liczbą obłożonych zmian. W wielu przypadkach uwzględnienie teoretycznego schematu cyklu produkcyjnego, obejmującego trzy lub cztery zmiany produkcyjne, ma ograniczone zastosowanie zważając na czynniki o charakterze losowym i inne procesy i zdarzenia dyskretne o czysto stochastycznej naturze. Wykres zamieszczony na rysunku 3.29 opisuje tę korelację, posługując się agregacją danych na poziomie miesiąca, co pozwala zaobserwować siłę opisanego związku. Badania przeprowadzone w tym zakresie dla ośmiu kopalń węgla kamiennego pozwalają zauważyć wprost proporcjonalną zależność pomiędzy średnim obłożeniem produkcyjnym ścian a znormalizowanym wydobywaniem poszczególnych ścian (odniesionym do ich wartości średniej). Trzeba zauważyć, że wszelkie odstępstwa wzajemnej korelacji parametrów identyfikowane być mogą jako wzrost lub spadek zmianowej wydajności produkcyjnej w rozumieniu wyłącznie zmian obłożonych produkcyjnie. Tym samym mogą być odzwierciedleniem nasilenia lub zmniejszenia warunków uciążliwości eksploatacyjnej. Zamieszczony wykres dostarcza na wstępie informacje niezbędne do dalszego opracowania modelu nadawy. Wśród nich znajduje się przede wszystkim wartość średnia oraz współczynnik zmienności wydobywania dobowego oraz wydobywania zmianowego, przeciętna liczba obłożonych zmian oraz wpływ rosnącego obłożenia produkcyjnego na uzyskany wynik dobowy.



Rysunek 3.29. Znormalizowane rozkłady średniego wydobywania i średniego obciążenia produkcyjnego zmian obserwowane w populacji różnych ścian w okresie miesięcznym (opracowanie własne).

W dalszej kolejności zestawiono obliczone średnie wydobywanie dobowe ze ściany dla kopalń, które prowadzą eksploatację tym systemem (rysunek 3.30). Wynikiem tego zabiegu jest jak można zauważyć wysokie zróżnicowanie zdolności produkcyjnych w kontekście poszczególnych kopalń oraz wewnątrz kopalni w obrębie eksploatowanych ścian.



Rysunek 3.30. Wydobywanie i obciążenie zmian w różnych kopalniach prowadzących eksploatację systemem ścianowym (opracowanie własne).

Wykresy zamieszczone na rysunku 3.30 dodatkowo pozwalają stwierdzić różnice w sposobie osiągnięcia wyniku produkcyjnego. Przykład kopalni o numerze 4 oraz 5 obrazuje ściany o zróżnicowanej wydajności zmianowej i względnie stałym, wysokim obłożeniu zmianowym. Przykład kopalni numer 2 oraz 8 obrazuje zupełnie odwrotne zjawisko – zróżnicowanie obłożenia oraz względnie stałą wydajność zmianową. Wartość eksplanacyjna wyników badań pozwala stwierdzić, że przygotowanie właściwych modeli punktów załadunkowych wymaga szczegółowego ustalenia tego czy wzrost wydobywania wynika z większego obłożenia produkcyjnego, zwiększenia czasu pracy kombajnu na zmianie, czy wzrostu chwilowej wydajności jednostkowej. Parametry te w sposób bezpośredni i zróżnicowany oddziałują na dynamikę procesu transportowego. Zagadnieniom tym poświęcone zostały prace autora obejmujące analizę przebiegu procesu wydobywania w przodkach ścianowych (Polak 2014; 2015; 2016). W celu usystematyzowania danych opisujących przebieg eksploatacji kompleksu ścianowego zarówno kombajnowego, jak i strugowego, uzasadnienie znajduje wykorzystanie tzw. karty efektywności pracy kompleksu ścianowego, która została zaproponowana przez autora w publikacji (Polak 2016). Układ karty w sposób zbliżony do przykładów opisanych w literaturze w rozdziale 2.1., umożliwi dekompozycję wyniku produkcyjnego systemem miar efektywności zdefiniowanym w tabeli 3.1.

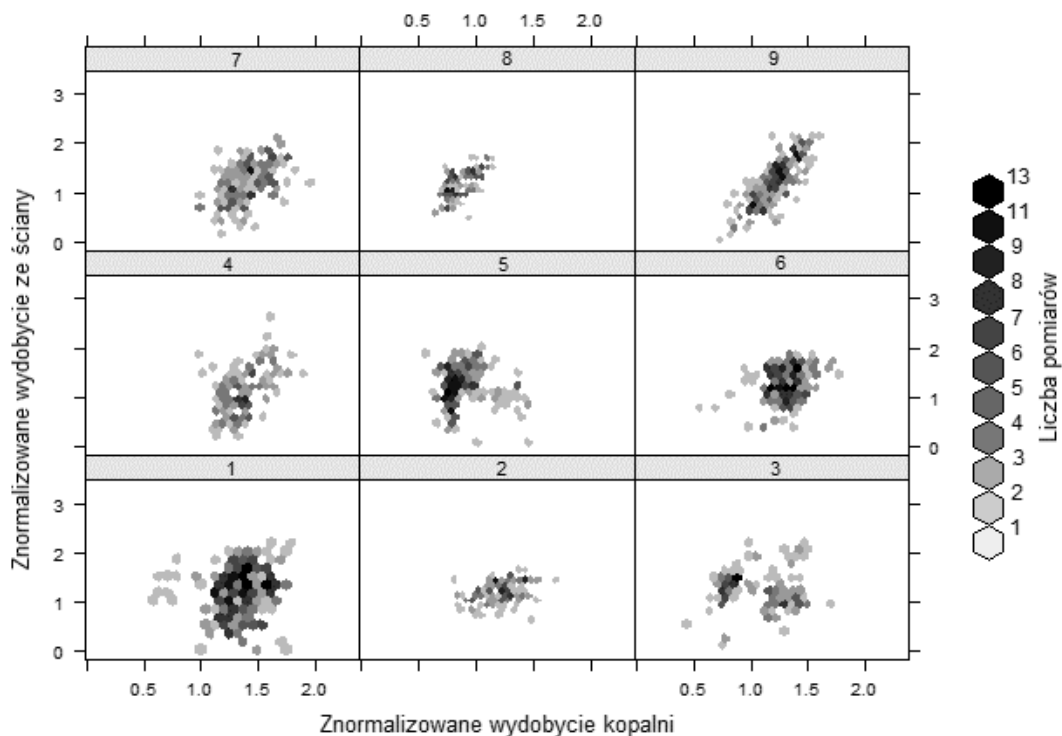
Tabela 3.1. Karty miar efektywności pracy kompleksu ścianowego (Polak 2016).

Lp.	Nazwa	Definicja	Opisany związek przyczynowy	Iloczyn kolejnych miar oraz jednostki czasu
1	Udział dni roboczych	Dni robocze [%]	Dni wolne od pracy	Dni robocze [h]
2	Udział dni produkcyjnych	$\frac{\text{Czas dni z wydobyciem}}{\text{Czas dni roboczych}}$ [%]	Postój skutkujący zatrzymaniem produkcji na zmianie (nieplanowany i planowany)	Dni z wydobyciem [h]
3	Stopień obłożenia zmian	$\frac{\text{Czas zmian z wydobyciem}}{\text{Czas dni z wydobyciem}}$ [%]		Czas zmian z wydobyciem [h]
4	Wskaźnik dyspozycyjności organizacyjnej	$\frac{\text{Czas obłożony przez załogę podczas zmian z wydobyciem}}{\text{Czas zmian z wydobyciem}}$ [%]	Postój organizacyjny (transport i wymiana załogi)	Czas gotowości załogi produkcyjnej [h]
5	Wskaźnik dyspozycyjności technicznej	$\frac{\text{Czas dyspozycyjności podczas zmian z wydobyciem}}{\text{Czas obłożony przez załogę w zmiany z wydobyciem}}$ [%]	Postój nieplanowany, krótkotrwały, skutkujący wstrzymaniem produkcji w trakcie zmiany produkcyjnej	Czas gotowości oraz dyspozycyjności do pracy [h]
6	Udział stanu pracy kompleksu	$\frac{\text{Czas pracy kompleksu podczas zmian z wydobyciem}}{\text{Czas dyspozycyjności podczas zmian z wydobyciem}}$ [%]	Realizacja innych prac towarzyszących wydobywaniu	Czas pracy kompleksu [h]
7	Udział stanu wydobywania	$\frac{\text{Czas wydobywania podczas zmian z wydobyciem}}{\text{Czas pracy kompleksu podczas zmian z wydobyciem}}$ [%]	Czas pracy kompleksu bez nadawy urobku (rozruch, czyszczenie, przejazdy)	Czas wydobywania [h]
8	Postęp jednostkowy przodka	$\frac{\text{Postęp}}{\text{Czas wydobywania podczas zmian z wydobyciem}}$ [m/h]	Ograniczenia wydajności (zmniejszona prędkość posuwu, zabiór)	Postęp (dobowy) [m]
9	Wydajność jednostkowa	$\frac{\text{Wydobycie brutto}}{\text{Postęp}}$ [Mg/m]	Furta eksploatacyjna oraz długość ściany	Wydobycie brutto [Mg]
10	Uzysk	$\frac{\text{Wydobycie netto}}{\text{Wydobycie brutto}}$ [%]	Zanieczyszczenie pokładu, przybierka, opad stropu	Wydobycie netto [Mg]

Poszczególne wskaźniki odwzorowują grupy czynników właściwych przede wszystkim względem zastosowanej technologii urabiania, istnienia ograniczeń technicznych lub organizacyjnych jak i uciążliwości o charakterze geologiczno-górnictwem. Tym samym obejmując:

- klasyfikację wykorzystania dostępnego czasu pracy (wskaźniki 1–7),
- miary wydajności (wskaźniki 8–9),
- miary jakości (wskaźnik 10).

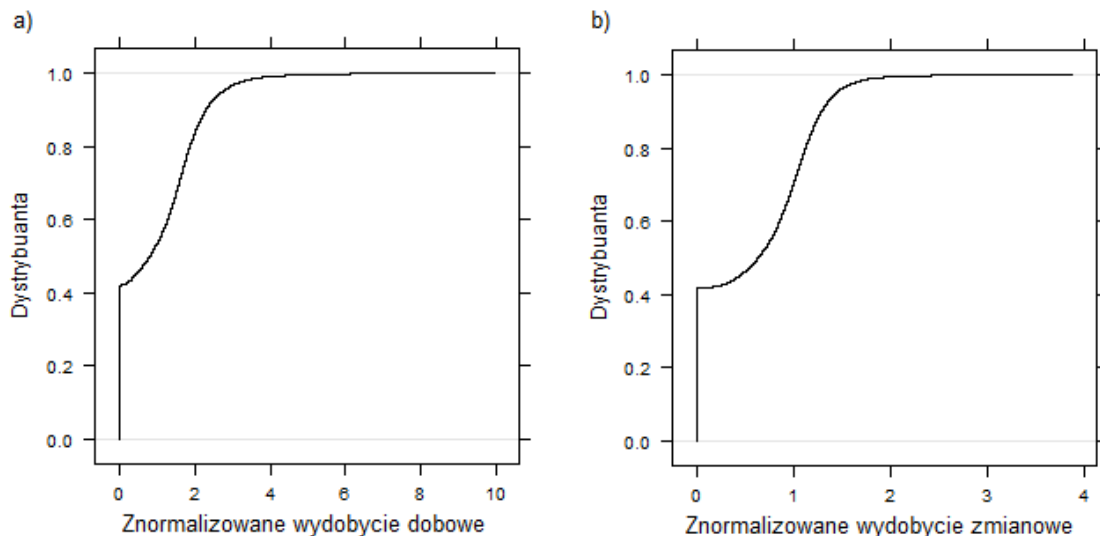
Należy podkreślić, że w licznych przypadkach w celu oszacowania opisanych miar w odniesieniu do przyszłości, konieczne jest przeprowadzenie predykcji w drodze regresji z wykorzystaniem funkcji ciągłych lub metod uczenia maszynowego. Realizacja tego rodzaju zadania wymaga dodatkowo ewidencji wielu zmiennych tłumaczących osiągane wyniki produkcyjne. W celu dopasowania modelu regresji lub realizacji procesu uczenia maszynowego, niezbędne jest zastosowanie tożsamego układu miar na etapie ewidencyjnym. Obecnie zadanie to jest realizowane m.in. w Jastrzębskiej Spółce Węglowej SA. Zważywszy na to, zastosowanie opisanego układu docelowo powinno na etapie analitycznym umożliwić opisanie, zrozumienie i predykcję zmienności parametrów w kontekście przyszłych przedsięwzięć wydobywczych. W literaturze poświęconej zagadnieniu można znaleźć zbliżone próby szacunków lub predykcji wyników produkcyjnych m.in. przy wykorzystaniu sieci neuronowych, czemu poświęcona została przykładowo praca (Burduk 2015).



Rysunek 3.31. Wydobycie ze ścian w funkcji wydobywania kopalni – analizowane przypadki (opracowanie własne).

Idąc dalej, jedną z kluczowych kwestii, która potrzebuje weryfikacji, jest koordynacja biegu ścian wymagająca ustalenia, w jakim stopniu wyniki danej ściany wpływają na ogólne wydobycie dobowe kopalni oraz czy w określonych warunkach następuje ich koordynacja. Zjawisko to może być tłumaczone jako świadome i celowe zwiększenie lub ograniczenie wydobywania ze ścian poprzez działania stricte organizacyjne, takie jak przyspieszenie lub opóźnienie postępu umożliwiającego realizację wymaganych zadań obsługowych. Wzajemna koordynacja eksploatacji przodków ścianowych jest szczególnie zauważalna w sytuacji wystąpienia zdarzeń losowych na jednej ze ścian. Analizę tego

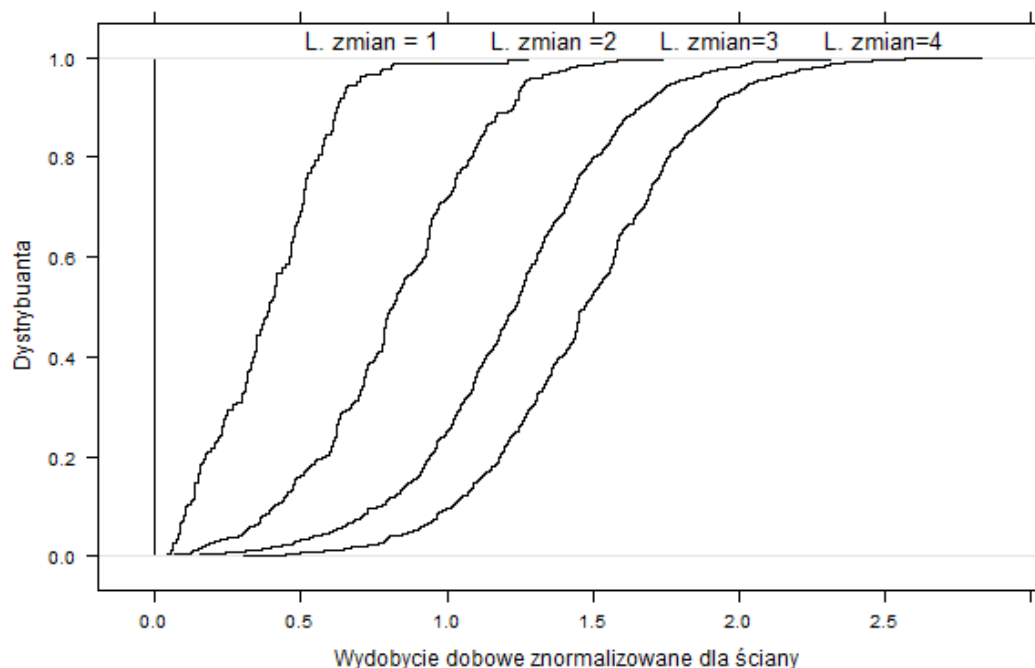
procesu można przeprowadzić w drodze odniesienia wydobywania z konkretnej ściany do całłościowego wydobywania kopalni (rysunek 3.31). Na rysunku przedstawiono tzw. znormalizowane wydobywanie, zatem wartość bezwymiarową będącą wynikiem odniesienia do wartości średniej dla rozpatrywanego obiektu dekretacji. Na przykładzie ściany nr 3 można stwierdzić zwiększenie wydobywania w sytuacji spadku wydobywania całej kopalni. Przykład ściany nr 9 wskazuje ponadto, że pojedyncza ściana może mieć zasadniczy wpływ na poziom wydobywania całej kopalni. Model utrzymania przynajmniej jednej ze ścian jako ściany wysokowydajnej ma szczególne znaczenie w sytuacji nasilenia uciążliwości warunków geologiczno-górnictwowych i jest często praktykowany. Rysunek ściany nr 9 pozwala zidentyfikować jej wiodący wpływ na całłościowe wydobywanie kopalni, stan ten może wynikać również z ograniczonej liczby przodków ścianowych zaplanowanych w harmonogramie eksploatacji.



Rysunek 3.32. Rozkłady stochastyczne dla grupy obserwowanych ścian (opracowanie własne).

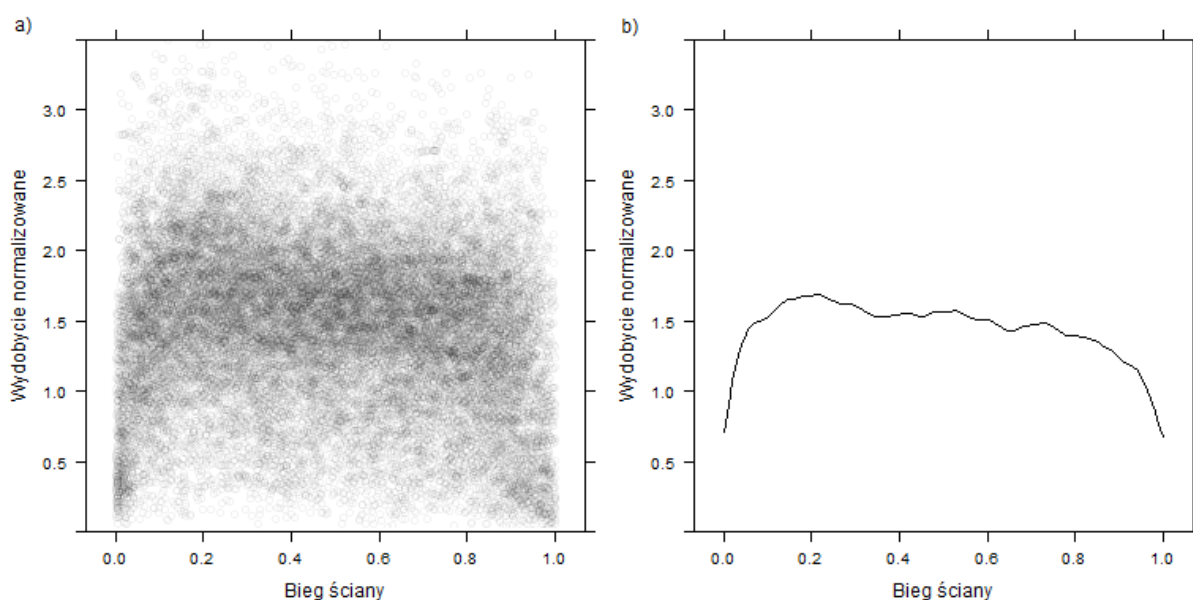
- a) Znormalizowany rozkład wydobywania dobowego w grupie badanych ścian (dane zagregowane).
 b) Znormalizowany rozkład wydobywania zmianowego w grupie badanych ścian (dane zagregowane).

Na rysunku 3.32 zamieszczone zostały rozkłady stochastyczne wydobywania – pozwalające na odwzorowanie zmienności wyników produkcyjnych w drodze losowania wartości z dystrybuanty empirycznej. Przeprowadzenie losowania liczby obłożonych zmian, a następnie wydajności zmianowej z dystrybuanty (rys. 3.32b) zasadniczo powinno umożliwić uzyskanie rozkładu znormalizowanego wydobywania dobowego (rys. 3.32a). Jednak sytuacja taka może mieć miejsce tylko wtedy, gdy zarówno wydobywanie zmianowe, jak i liczba zmian są zmiennymi niezależnymi. W celu sprawdzenia tego warunku dla jednej z kopalń sporządzono znormalizowane rozkłady wydobywania dobowego, zależne od liczby zmian produkcyjnych (rys. 3.33). Analiza wyników produkcyjnych pozwala stwierdzić, że przyrost wydobywania dla 3 pierwszych zmian jest proporcjonalny, jednak dla 4 zmian produkcyjnych zostaje ograniczony. Stan ten, wynika bezpośrednio z potrzeby przeznaczenia części jednej z 4 zmian na cele obsługi konserwacyjnej.



Rysunek 3.33. Wpływ ilości obłożonych ścian na wyniki produkcyjne (opracowanie własne).

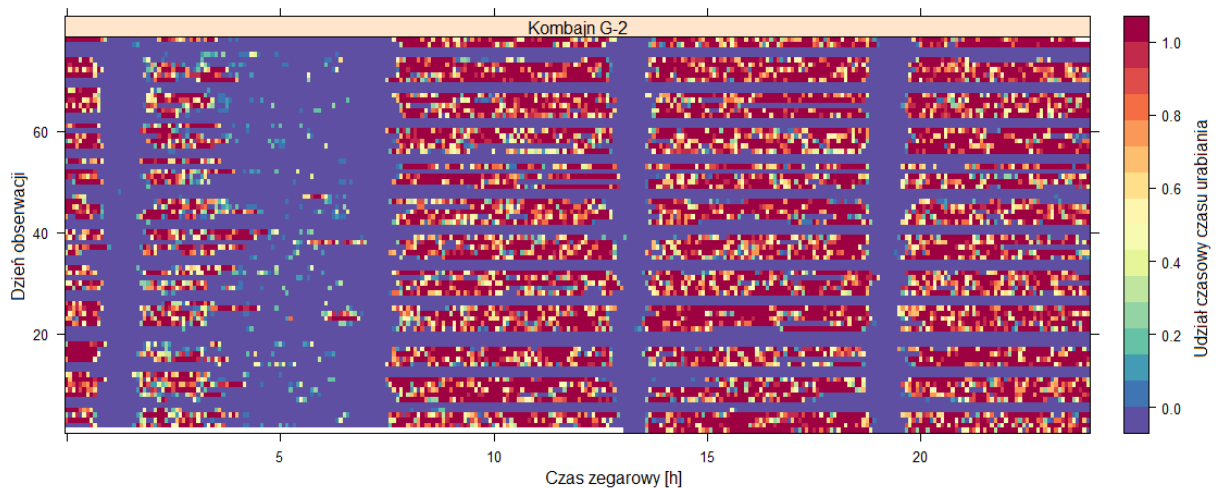
Kolejną kwestią wymagającą uwzględnienia w modelu punktu nadawcy jest zmienność wydobywania w funkcji fazy postępu eksploatacji. Pomiary wydobywania w tym ujęciu przedstawiono na rysunku 3.34 w formie zagregowanej (rys. 3.34b) oraz w formie danych pierwotnych (rys. 3.34a). Jednym z podstawowych wniosków wynikających z analizy jest zmniejszenie wydobywania w początkowych i końcowych etapach eksploatacji oraz systematyczne, niewielkie, ale zauważalne zmniejszenie wydobywania w funkcji postępu ściany, prawdopodobnie wynikające z kumulacji ciśnień eksploatacyjnych lub problemów z utrzymaniem chodników.



Rysunek 3.34. Zmienność wyników produkcyjnych w funkcji fazy wydobywania (wybiegu ściany) (opracowanie własne).

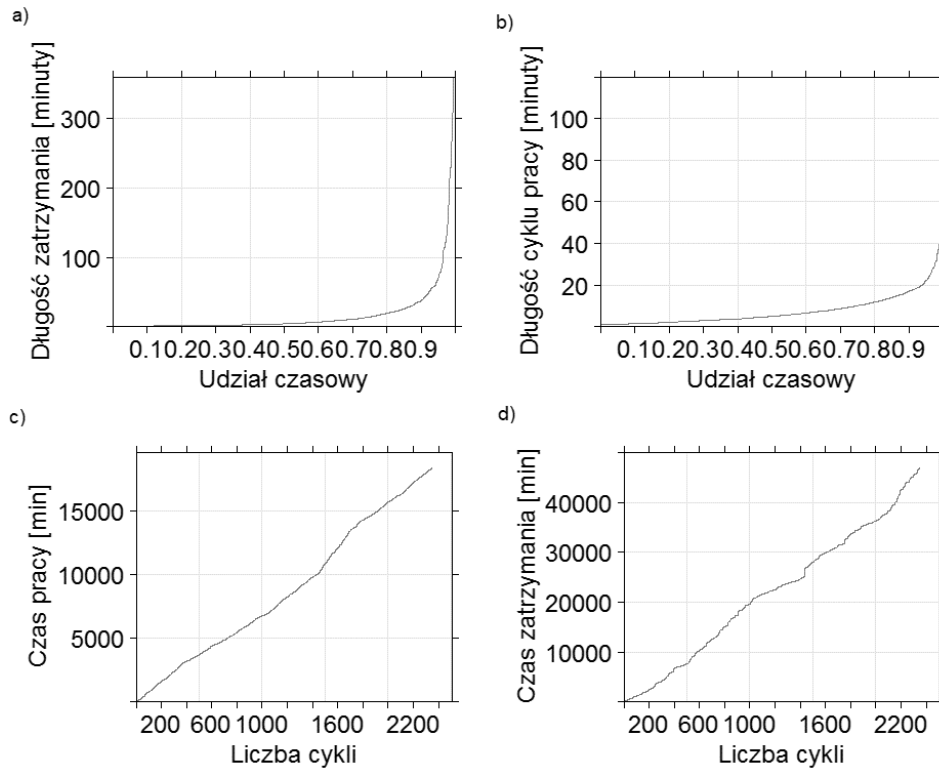
a) Dane pierwotne. b) Dane zagregowane w funkcji zmiennej niezależnej (biegu ściany).

Wszystkie zamieszczone do tego miejsca rozkłady wartości dotyczyły danych zagregowanych co najmniej na poziomie zmiany produkcyjnej. Jednak dla modelu symulacyjnego nader istotną rolę odgrywać może dynamika zmian nadawy w stosunkowo krótkich okresach czasu. W zadanym horyzoncie czasowym nadrzędną kwestią, wymagającą szczegółowego odwzorowania jest czasowy przebieg użytkowania kombajnu lub struga, rozumianą jako prawdopodobieństwo jego pracy w danym dniu tygodnia w zadanym czasie zegarowym. Rysunek 3.35 przedstawia taki zapis, sporządzony dla kombajnu ścianowego. Na uwagę zasługują wyraźnie zaznaczone czasowe bloki pracy kompleksu wynikające z organizacji zmian produkcyjnych i czasu niezbędnego na transport oraz wymianę załogi, widocznego jako przerwy występujące w określonym przedziale czasu zegarowego. Przerwy powtarzające się w sposób systematyczny o danej porze zegarowej, określone będą w dalszej części pracy jako czas postoju chronicznego lub organizacyjnego. Obecność udziału czasowego stanu urabiania innego niż 1 lub 0 oznacza obecność krótkich przerw technologicznych w 5-minutowym bloku czasowym poddanym wizualizacji. Dobór palety kolorów do zamieszczonej skali wartości pozwala zidentyfikować zarówno krótkie uruchomienia kompleksu w dłuższym okresie jego wyłączenia, jak i krótkie lub dłuższe zatrzymania w okresie jego pracy.



Rysunek 3.35. Wizualizacja pracy kompleksów ścianowych w układzie czas zegarowy – dni obserwacji (opracowanie własne).

W dalszym kroku analizie poddano długości jednorodnych cykli wydobywania i postoju kompleksu ścianowego, wynikające głównie z przerw technologicznych i uwzględniające tzw. mikrozatrzymania procesu wydobywania. Otrzymane w ten sposób rozkłady wartości oraz wykresy zamieszczono na rysunku 3.36.

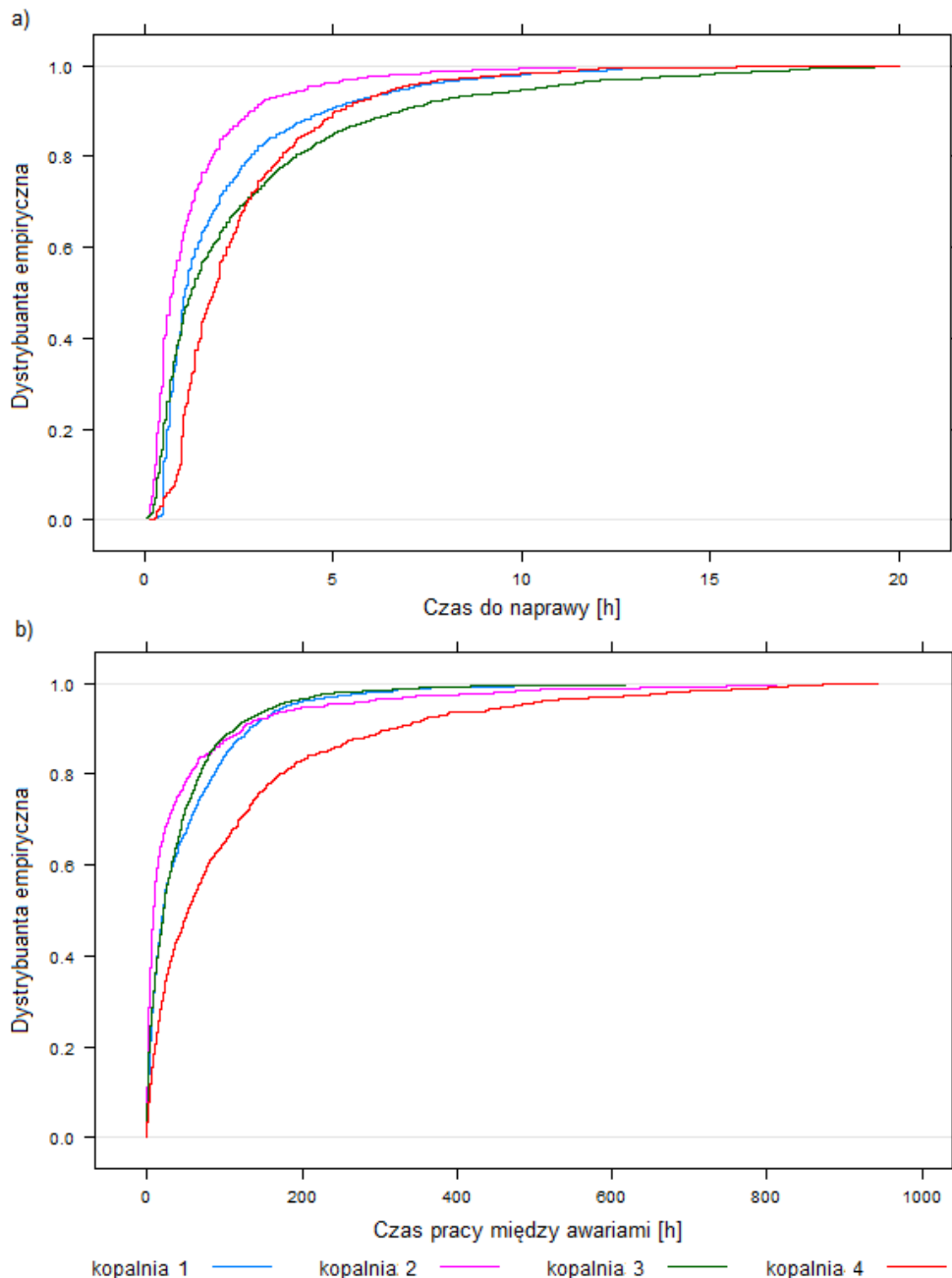


Rysunek 3.36. Rozkłady oraz skumulowane przyrosty cykli pracy i postojów produkcyjnych dla kombajnowego systemu ścianowego (opracowanie własne).

- Wykres uporządkowany długości zatrzymań wraz z ich udziałem czasowym.
- Wykres uporządkowany długości cyklu pracy wraz z ich udziałem czasowym.
- Skumulowany przyrost czasu pracy w funkcji liczby załączeń/wyłączeń.
- Skumulowany przyrost czasu zatrzymania w funkcji liczby załączeń/wyłączeń.

Niejako następstwem badania sekwencji cyklu „praca – postój” jest uwzględnienie kwestii niezawodnościowych, toteż w tym celu analizie poddano wskaźniki niezawodnościowe – czas pracy między awariami oraz czas niezbędny na przywrócenie zdolności kompleksu do pracy. Wykres sporządzony na rysunku 3.37 przygotowany został na podstawie danych uzyskanych z czterech kopalń realizujących szczegółową ewidencję czasu oraz przyczyny zatrzymań produkcji.

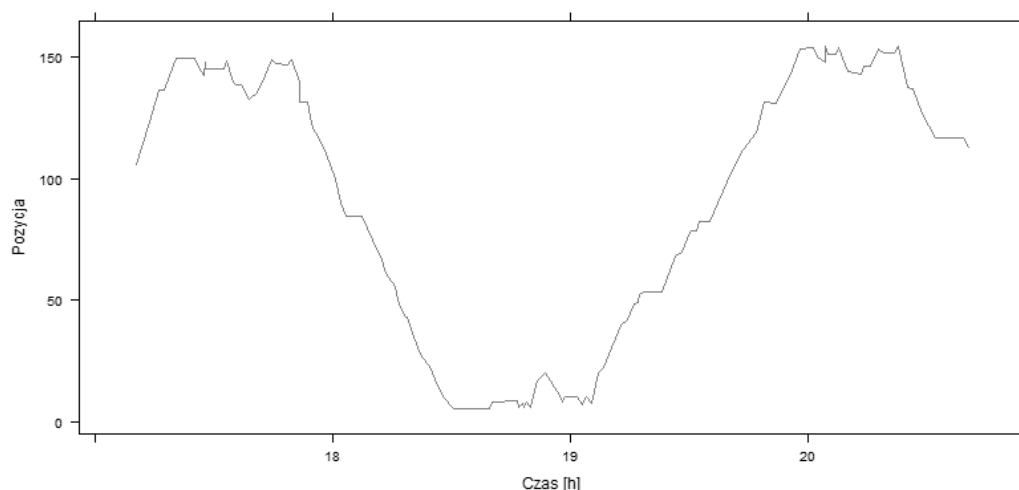
Należy zauważyć, że w licznych, potwierdzonych empirycznie przypadkach awaria lub zdarzenie o charakterze górniczym rozpoczyna okres dłuższego postoju ściany. Na podstawie analizowanych danych stwierdzono, że w badanej populacji ścian zdecydowanie dłuższy postój zdarza się średnio co około ok. 85 dni produkcyjnych, a przeciętny czas trwania postoju wynosi średnio 297 godzin (mediana z obserwacji wyniosła ok. 97 godzin). Rozkład czasu postoju zbliżony jest kształtem do czasu wymaganego do naprawy (rys. 3.37a).



Rysunek 3.37. Rozkłady wskaźników niezawodnościowych sporządzone dla czterech kopalń (opracowanie własne).

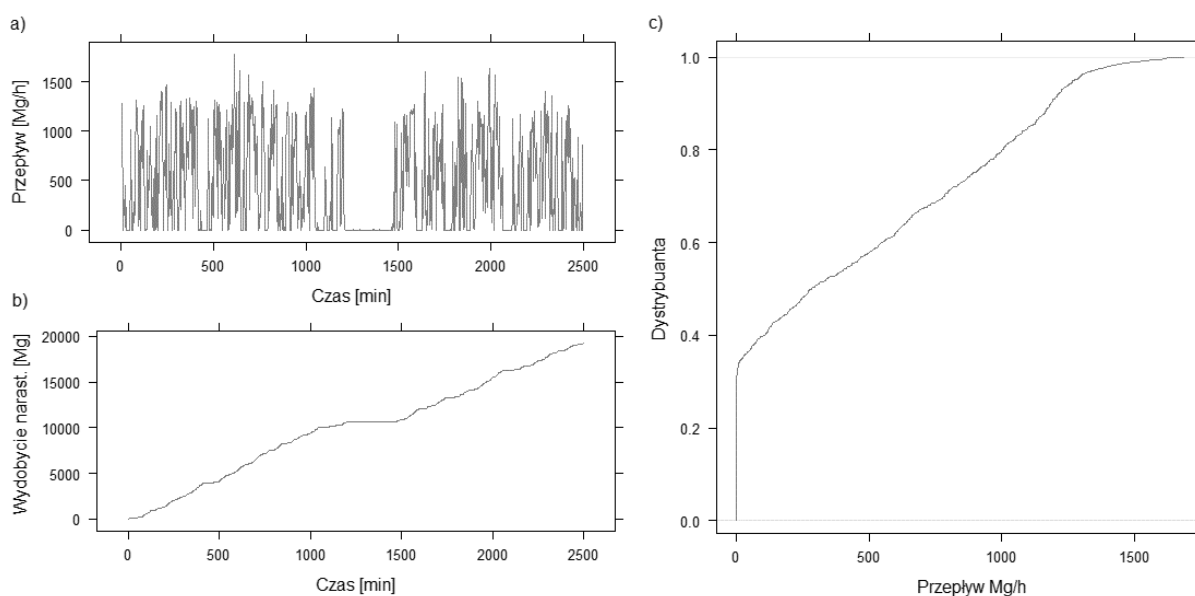
- a) Rozkład czasu pracy pomiędzy awariami [h].
 b) Rozkład Czasu wymaganego do naprawy [h].

Kontynuacja badań wymaga ostatecznie odwzorowania zmienności wydobywania w ujęciu krótkookresowym, wynikającej z zróżnicowanej wysokości furty ścianowej, predkości posuwu, zabioru bądź innych zjawisk związanych bezpośrednio z urabianiem, odpajaniem się i załadunkiem urobku o charakterze losowym. Badania krótkookresowej dynamiki przebiegu wydobywania z uwagi na istotne w tym przypadku różnice pracy instalacji strugowej i kombajnowej, przeprowadzone zostały osobno. W przypadku kombajnu ścianowego cykle pracy obejmują stałe operacje, tj. zawrębianie, przesuwanie napędu, czyszczenie i urabianie, co można zaobserwować bezpośrednio na pomiarze położenia kombajnu w ścianie (rys. 3.38). Załączony przykład został celowo wybrany w celu ilustracji zjawiska – na ogół jednak proces urabiania jest realizowany z mniejszymi lub większymi przerwami produkcji.



Rysunek 3.38. Przykładowy zapis pozycji kombajnu w ścianie w funkcji czasu, wyrażonej jako numer sekcji obudowy zmechanizowanej (opracowanie własne).

Analiza chwilowego przepływu urobku mierzonego bezpośrednio na wyjściu ze ściany kombajnowej została zamieszczona na rysunku 3.39. Rozkład na rysunku 3.39c wykazuje duże zróżnicowanie obserwowanych wartości nadawy z wyraźnie zaznaczoną górną wartością graniczną. Z dużym prawdopodobieństwem wartości przepływu urobku wynoszące poniżej 500Mg/h wynikają z zarejestrowania w 1-minutowym oknie pomiarowym jedynie częściowego cyklu urabiania wraz z zatrzymaniem. Obecność tego rodzaju zatrzymań powodować może spłaszczenie dolnej, granicznej wartości nadawy, co prawdopodobnie oddziałuje na kształt zamieszczonego rozkładu wartości.

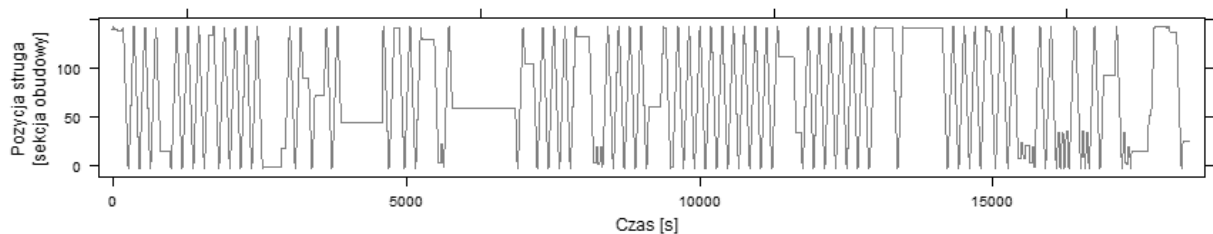


Rysunek 3.39. Zapis średniej wydajności na wyjściu ze ściany kombajnowej z 1-minutowym krokiem pomiarowym (opracowanie własne).

- a) Zapis czasowy chwilowego przepływu urobku.
- b) Skumulowane wydobywanie kopaliny w czasie pomiarów.
- c) Rozkład przepływu nadawy.

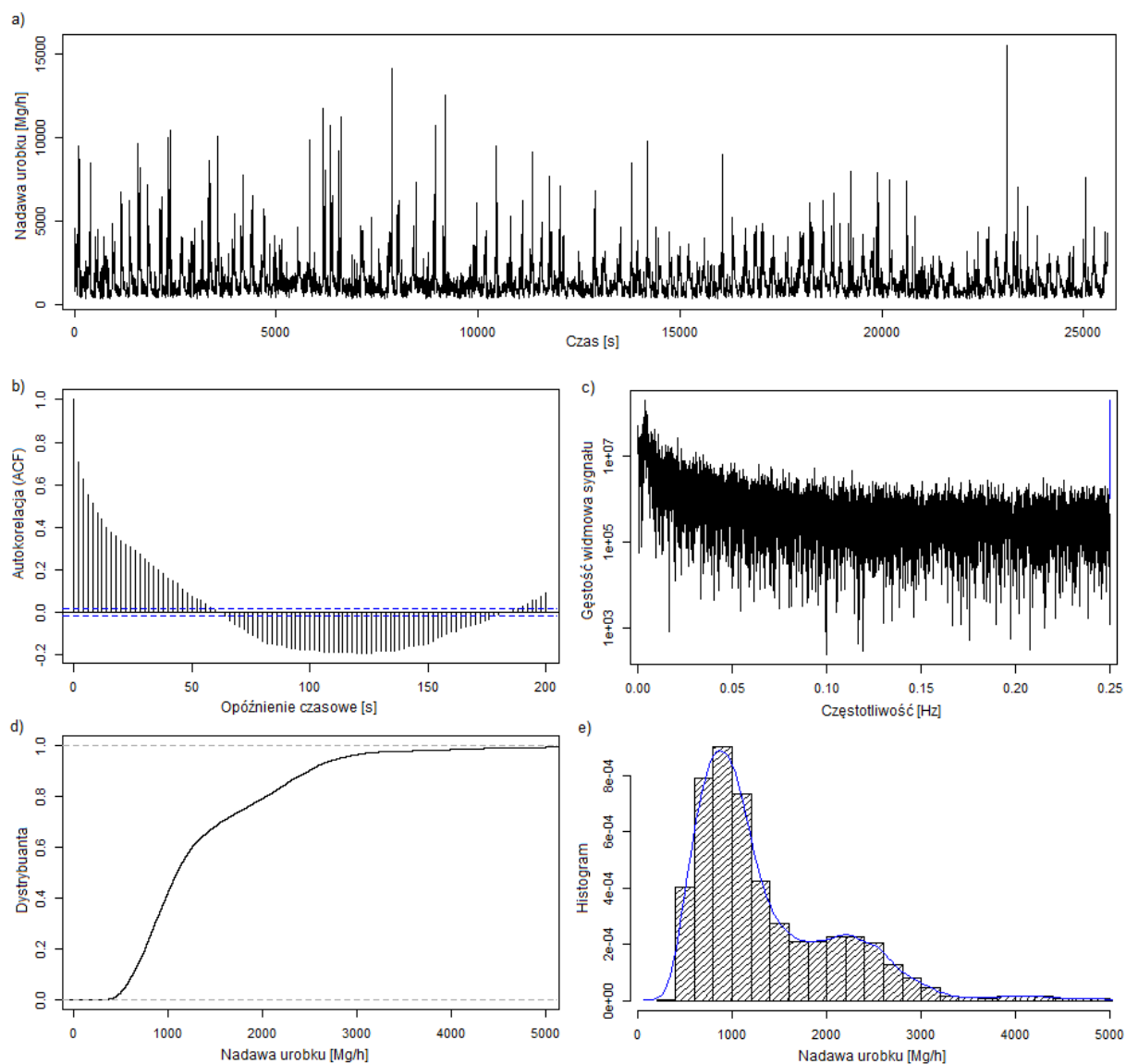
3.3.2. Strugowy system ścianowy

Analogicznie jak ma to miejsce w przypadku kombajnu, osiągalna wydajność chwilowa strugowego systemu wydobywczego może zostać oszacowana na podstawie znanych parametrów fizycznych ściany oraz rodzaju stosowanego wyposażenia, sprowadzając się do formuły operującej na cechach takich jak: wysokość, zabiór, prędkość posuwu oraz nieodłącznego procesu stochastycznego związanego z zmiennością owych parametrów w czasie. W przypadku struga zmienność ta zachodzi wskutek działania zjawisk silniej ograniczonych w czasie i przestrzeni, jak m.in. warunki stropowe, przerosty, przybierka spągu, stan rozparcia obudowy zmechanizowanej, co dodatkowo potęguje wysoka prędkość ruchu głowicy strugowej – wynoszącą średnio ok. 3 m/s (rys. 3.40). Ich skala i sposób oddziaływania nie pozwalają na pełne odwzorowanie rozpatrując tematykę niniejszej pracy i wymagają realizacji osobnych badań, stąd też ich przebieg został opisany wyłącznie funkcją losową. Mimo iż podjęto próby analizy obciążenia napędów głowicy strugowej w poszczególnych jej położeniach i w funkcji wybiegu ściany, nie przyniosły one rezultatów pozwalających na identyfikację jakichkolwiek prawidłowości.



Rysunek 3.40. Pozycja głowicy strugowej w ścianie (opracowanie własne).

Wysoka prędkość ruchu struga w stosunku do przenośnika ścianowego (prędkość liniowa struga ok. 3 m/s, prędkość przenośnika ok. 1,5 m/s) ma również inne konsekwencje. Dochodzi wówczas do kumulacji urobku na poszczególnych odcinkach przenośnika zgrzeblowego, szczególnie przy uwzględnieniu zarówno wysokiej prędkości głowicy, jak i zmiennego kierunku ruchu względem kierunku ruchu przenośnika (rys. 3.41).

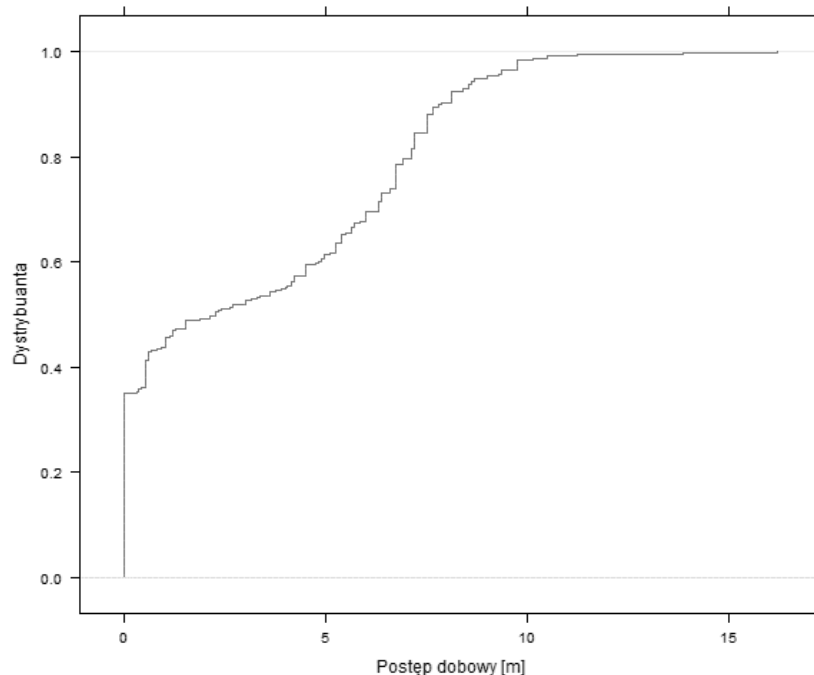


Rysunek 3.41. Charakterystyka wydajności chwilowej obserwowanej na wyjściu ze ściany strugowej (opracowanie własne).

Rysunek 3.41a pozwala zidentyfikować obecność charakterystycznych skoków wydajności chwilowej, które są spowodowane opisanym zjawiskiem. Histogram zaprezentowany na rysunku 3.41e pozwala stwierdzić, że skoki te mają odzwierciedlenie w obserwowanych dwóch poziomach nadawy oraz opisujących ich rozkładach, które dla załączonego przykładu opisać można wartością średnią na poziomie 1000 Mg/h oraz 2200 Mg/h. Analiza danych pozwala zauważyć względnie stały czasookres występowania zmian poziomu nadawy wynoszący około 240 sekund (rys. 3.41b). W celu odwzorowania nadawy realizowanej z strugowego kompleksu wydobywczego przyjęto, że wymagane jest uwzględnienie i zamodelowanie opisanych uprzednio zjawisk spiętrzania urobku.

3.3.3. Kombajn chodnikowy

Kombajny chodnikowe są szeroko stosowanymi maszynami górniczymi, w Polsce w głównej mierze wykorzystywanymi do drążenia wyrobisk głównych, udostępniających i przygotowawczych. Obok kompleksów ścianowych stanowią one dodatkowe źródło nadawy urobku w kopalniach węgla kamiennego, znajdując również zastosowanie przy wydobyciu soli. Na rysunku 3.42 zamieszczono przykładowy rozkład postępów dobowych kombajnu chodnikowego, sporządzony w formie dystrybuanty wartości.

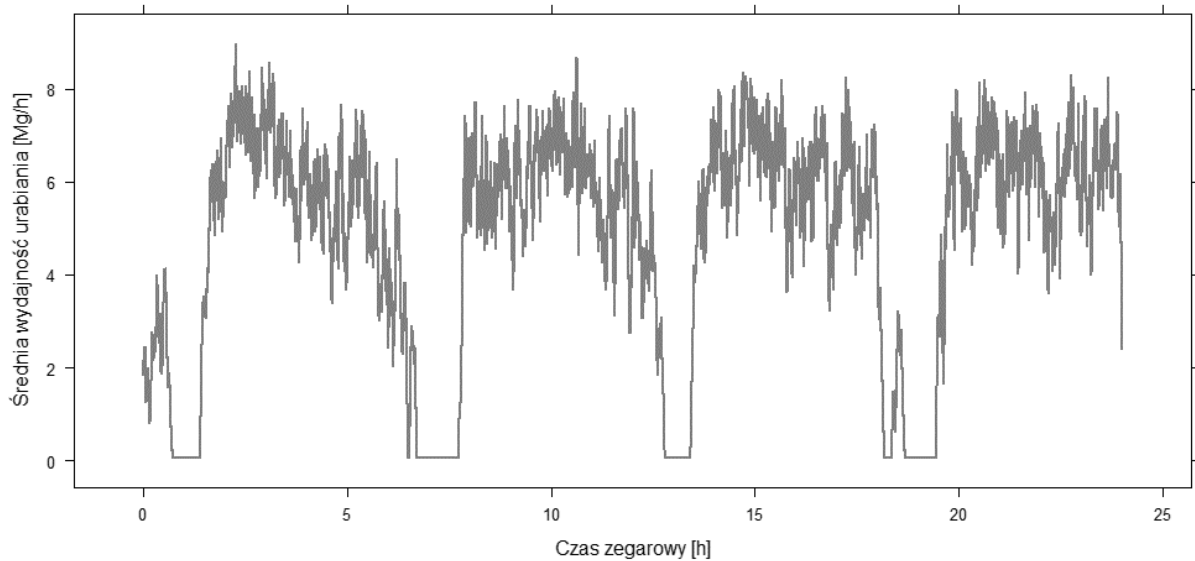


Rysunek 3.42. Rozkład postępu dobowego wykonanego przez kombajn chodnikowy (opracowanie własne).

Proces drążenia wyrobisk chodnikowych składa się z szeregu powtarzalnych i następujących kolejno po sobie operacji. Stanowią je kolejno:

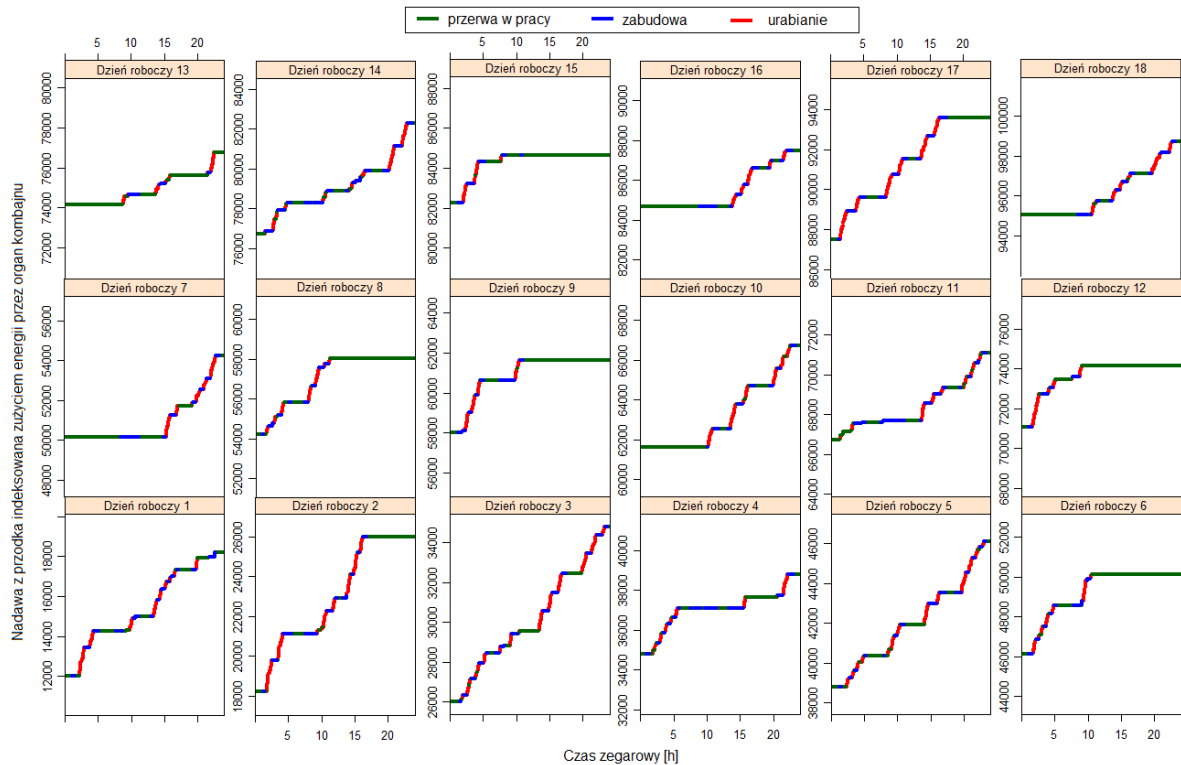
- urabianie calizny, wraz z przejazdem kombajnu od ociosu do ociosu (ok. 20–30 minut),
- rozkładanie pomostów roboczych, obrywka, siatkowanie ociosów (ok. 7–13 minut),
- podjazd i zabudowa stropnic, dokręcanie strzemion, założenie rozpór, osiatkowanie po całym obrysie – (ok. 3–7 minut),
- dostawienie i montaż bocznych łuków ociosowych, skręcanie obudowy, powrót kombajnu, ustawienie odrzwi i rozpór (ok. 6–12 minut),
- uzupełnienie rozpór, wypełnianie spoiwem worków wyładkowych (ok. 7–12 minut).

W pojedynczym cyklu postęp wynosi przeciętnie 0,9 m. Urobek z przodków chodnikowych pojawia się więc cyklicznie, z okresem wynoszącym od 45 do 80–120 minut w zależności od czynności pomocniczych, np. potrzeby czyszczenia przodka, transportu materiałów, zabudowy korytka wzmacniającego w stropie. Chodniki drążone w kamieniu za pomocą materiałów wybuchowych na ogół charakteryzują się znacząco mniejszymi postęпами, co zmniejsza znaczenie tego rodzaju punktu załadownego.



Rysunek 3.43. Średnia wydajność urabiania kombajnu chodnikowego zagregowana w funkcji czasu zegarowego – widoczne przerwy organizacyjne wymagane na transport załogi (opracowanie własne).

Na rysunku 3.43 zostały zamieszczone dane zagregowane w kontekście czasu zegarowego, pozwalające stwierdzić, że proces drążenia chodników cechuje się zbliżonym przebiegiem do eksploatacji przodków ścianowych, w rozumieniu organizacji procesu zilustrowanej między innymi na rysunku 3.35. Przerwy pomiędzy poszczególnymi zmianami są wyraźnie zarysowane, co daje potencjalną możliwość wykorzystania jednolitego modelu punktu załadunkowego do opisanie pracy zarówno kompleksów ścianowych, jak i kombajnów chodnikowych. Co więcej, z uwagi na cykliczność wykonywanych prac na przodkach i zasadniczo brak sytuacji, gdy załoga produkcyjna pozostawia niezabudowany przodek na przykładzie pierwszej zmiany produkcyjnej na rysunku 3.43 można wskazać, że nadawa w znacznym stopniu uzależniona jest od czasu trwania zmiany. Uwzględniając przerwy chroniczne o charakterze organizacyjnym oraz posługując się danymi empirycznymi opisującymi pracę kombajnu, analogicznie jak w przypadku kompleksu ścianowego, możliwe jest określenie przeciętnej długości cyklu urabiania oraz realizacji pozostałych prac wykonywanych w przodku chodnikowym.



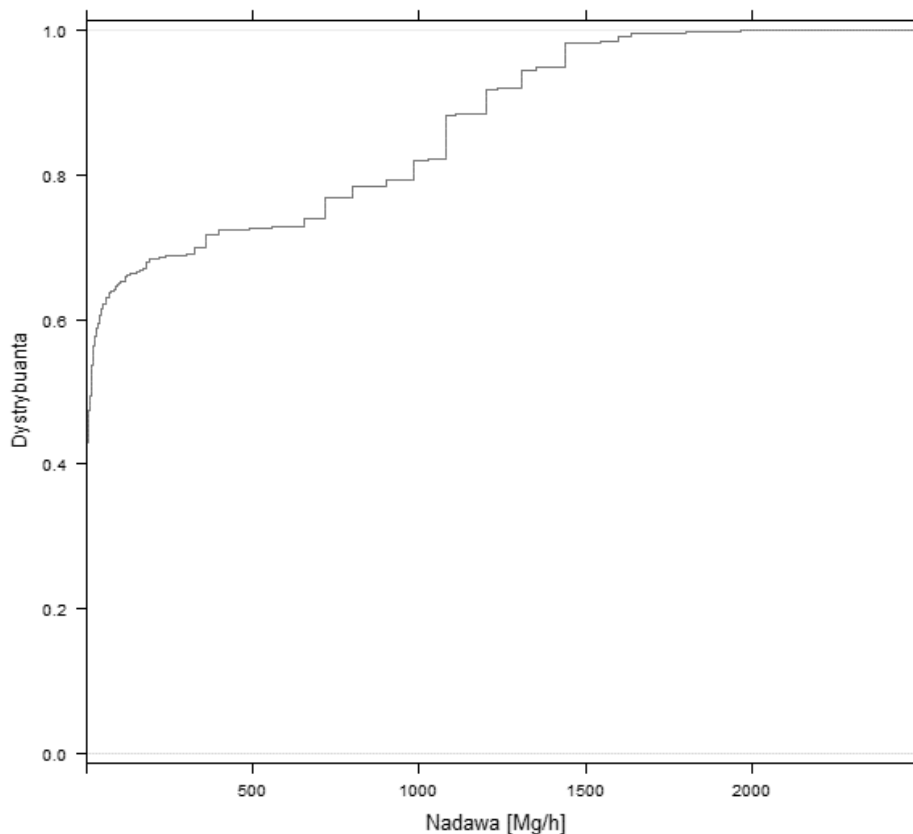
Rysunek 3.44. Ilustracja stanów pracy kombajnu chodnikowego w funkcji czasu zegarowego oraz wydobycia/postępu (wartości indeksowanej energią zużytą przez organ z uwzględnieniem poziomu oporów własnych) (opracowanie własne).

Na rysunku 3.44 zamieszczono wyniki uzyskane z zastosowaniem prostej metody detekcji stanu pracy kombajnu polegającą na ocenie parametrów prądowych kombajnu w ruchomym oknie czasowym. Zastosowana metoda pozwoliła na detekcję stanu urabiania, zabudowy oraz postojów kombajnu chodnikowego. Dane te w układzie czasu zegarowego oraz bezwymiarowego postępu (wydobywania) indeksowanego energią zużytą przez organ maszyny pozwalają zaobserwować cykliczność wraz z właściwymi czasami wykonania zadań. Dłuższe przerwy w pracy wskazują na zaistnienie nieplanowanych zdarzeń – awarii bądź realizacji innych prac w przodku chodnikowym. W okresie czasu ujętym rysunkiem 3.44 kombajn chodnikowy realizował do 3 cykli pracy na zmianie, wynikało to w głównej mierze z odległości przodka od szybu, a w efekcie bardzo długiego czasu wymaganego na transport załogi. Na uwagę zasługuje dodatkowo zróżnicowanie otrzymywanych wyników, aby to pokazać na rysunku zachowano ujednoczoną skalę na osi Y.

3.3.4. Punkt przesyowy

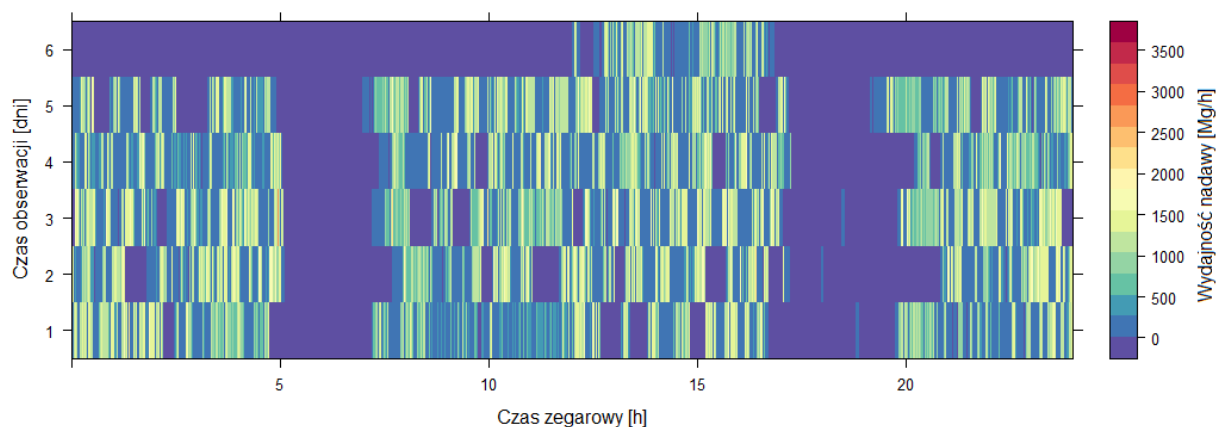
Zmechanizowane punkty przesyowe są podstawowymi miejscami załadunku urobku na przenośniki taśmowe w przypadku kopalń podziemnych rud metali eksploatujących kopalinę metodą komorowo-filarową. Ze względu na ich znaczącą ilość, wynoszącą do kilkudziesięciu sztuk na kopalni, ich obecność zmienia zasadniczo realia funkcjonowania układu transportowego. W skrajnych przypadkach pojedynczy, długi przenośnik taśmowy, może posiadać dwa lub trzy punkty nadawy urobku. Punkty te stanowią bezpośrednie miejsce styku systemu transportu maszynami samojezdnymi i pracującego w sposób ciągły systemu odstawy. W następstwie obiekty tego rodzaju mogą być traktowane zastępczo, w sposób zbliżony jak ma to miejsce w przypadku wcześniej opisywanych punktów nadawy lub jako wyjście z podsystemu transportu samojezdnego. Stan ten uzasadnia celowość wykorzystania zapisu pracy punktów przesyowych w przypadku modelowania pracy wyłącznie odstawy taśmowej. Jednocześnie w przypadku modelowania układu połączonego (o charakterze mieszanym) – modele punktów załadowniczych mogą być użyte w celach weryfikacyjnych.

Na rysunku 3.45 na podstawie danych zarejestrowanych przez wagę tensometryczną sporządzono przykładowy rozkład nadawy dla pojedynczego punktu przesyowego. Uwagę zwraca tutaj stosunkowo krótki czas nadawy urobku oraz względnie wysoka wydajność, zważając na rozproszoną lokalizację punktów przesyowych.



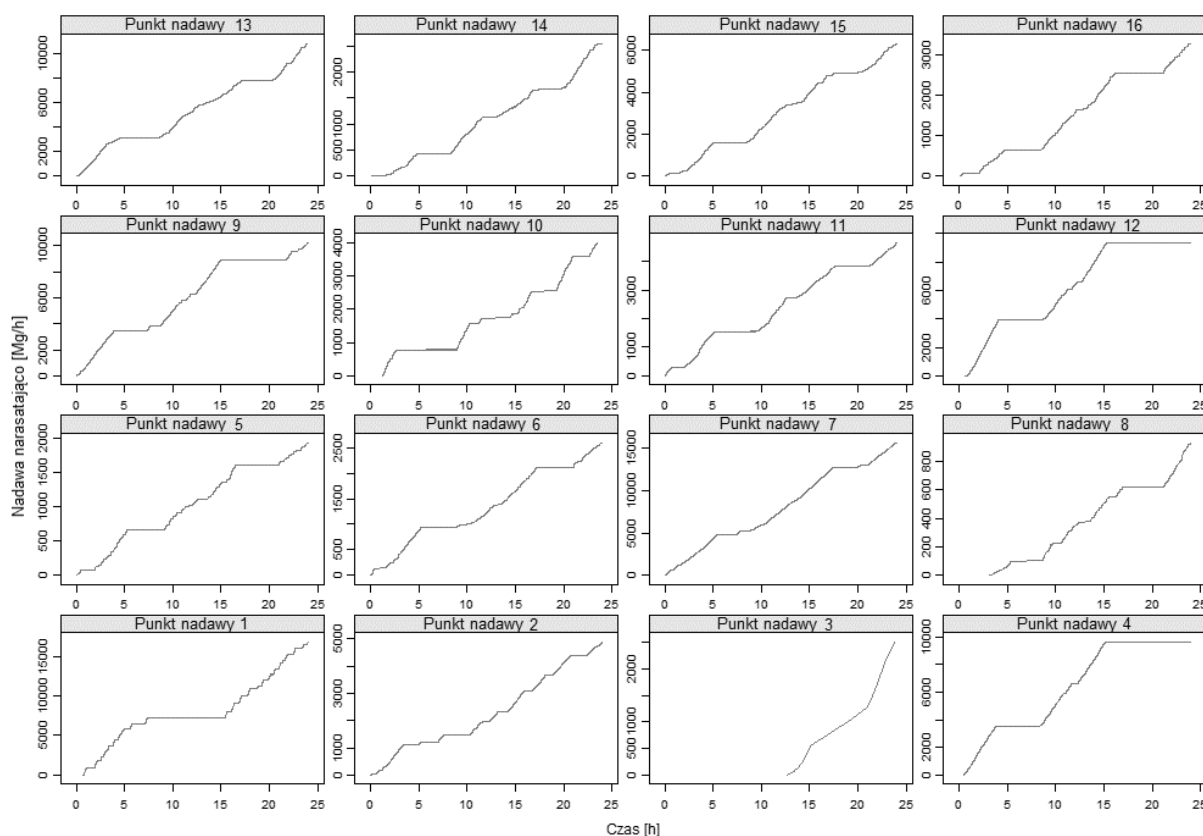
Rysunek 3.45. Rozkład wydajności nadawy dla wybranego punktu przesyowego (opracowanie własne).

Na kolejnym rysunku 3.46 zamieszczono chwilowe wskazania wagi umieszczonej bezpośrednio za punktem przesyowym w funkcji czasu zegarowego oraz kolejnych dni obserwacji. Analiza wartości średniej nadawy realizowanej podczas danej pory dnia pozwala zauważyć wyraźnie widoczne przerwy produkcyjne oraz dużą dynamikę nadawy z okresami jej całkowitego wstrzymania.



Rysunek 3.46. Nadawa urobku z punktu przesypowego w układzie czas zegarowy – dni produkcyjne (opracowanie własne).

W dalszej kolejności przeanalizowano zapis wskazań wagi w postaci skumulowanej z wybranych punktów odstawy taśmowej urobku w okresie 24 godzin pracy kopalni. Analiza tego rodzaju danych pozwala na szczegółową weryfikację modelu symulacyjnego i porównanie wyników do danych wyznaczonych empirycznie. Wyniki zostały zamieszczone na rysunku 3.47.



Rysunek 3.47. Wskazania wagi urobku w różnych fragmentach odstawy taśmowej (opracowanie własne).

Rysunek ten pozwala stwierdzić, że dynamika nadawy urobku jest mocno zróżnicowana, a długość przerw w nadawie urobku zależna od stanu przodków ścianowych – w tym przypadku urabianych za pomocą materiałów wybuchowych.

3.3.5. Pozostałe punkty nadawy

Pozostałe punkty nadawy urobku cechują się marginalnym lub całkowitym brakiem zastosowania w warunkach górnictwa podziemnego w Polsce. Wśród nich wyszczególnić należy przede wszystkim:

- przodek chodnikowy wyposażony w kombajn urabiający liniowo typu Continous Minner współpracujący z elastycznym przenośnikiem taśmowym lub samowładowczymi przodkowymi wozami odstawczymi (ang. *Shuttle Car*),
- przodek urabiany materiałami wybuchowymi z wykorzystaniem załadunku przy użyciu ładowarki bocznosypiącej lub ładowarki łapowej,
- szyb pogłębiany z zastosowaniem materiałów wybuchowych, ładowarek szybowych (m.in. typu Gryf) oraz górniczego wyciągu szybowego wyposażonego w kubły (jedno- lub dwunaczyniowego),
- szyb lub zbiornik urobku pogłębiany z zastosowaniem urabiania mechanicznego.

Opisane punkty załadunku w odniesieniu do wcześniej opisywanych obiektów należy uznać za marginalnie istotne. Bardzo szczegółowa charakterystyka procesu nadawy nie znajduje uzasadnienia w kontekście tematyki niniejszej pracy, gdyż ich ograniczone zastosowanie i wydajność nie wywierają znaczącego wpływu na przebieg procesu transportu urobku. Zastępczo mogą one być odwzorowane za pomocą modeli uogólnionych, stąd też ich odwzorowanie zostało przewidziane w modelu punktów załadunkowych (rozdział 5.5.). W tym miejscu należy jednak krótko scharakteryzować urabianie za pomocą materiałów wybuchowych, które na ogół odbywa się w następującej kolejności cykli:

- przygotowanie materiału do załadunku, transport materiałów, załadunek otworów strzałowych, wycofanie załogi, odpalenie ładunków, oczekiwanie w strefie bezpiecznej;
- wybieranie, prace porządkowe;
- siatkowanie, zabudowa obudowy, (w przypadku obudowy stalowej: wykładka, uszczelnienie wykładki w celu eliminacji pustek, kotwienie łuków stropnicowych);
- wiercenie otworów strzałowych.

W zależności od czasu potrzebnego na wiercenie otworów strzałowych i wybieranie (samo wybieranie urobku może trwać od 20 minut w kopalniach węgla kamiennego do 3 godzin w kopalniach rudy, wiercenie 40 otworów zajmuje ok. 2 godzin) opisany cykl robót na przodku trwa przeciętnie 2–3 zmiany.

3.4. Uogólnione wytyczne dla modeli symulacyjnych

Podsumowując dotychczasowe rozważania, należy zauważyć, że procesy transportu urobku w kopalniach podziemnych cechuje:

- wysoka dynamika, zmienne warunki działania i ewolucja przestrzenna,
- złożoność, związana m.in. ze strukturą systemu transportowego,
- dywersyfikacja i fragmentacja – zróżnicowane zasady i przebieg, wynikający z zastosowania odmiennych środków lub systemów transportowych,
- dyspersja w przestrzeni,
- liczne interakcje,
- liczne ograniczenia, m.in. przestrzenne związane z warunkami realizacji procesu,
- złożone zasady sterowania – obecność nadrzędnej oraz lokalnej logiki sterującej,
- zróżnicowane kryteria analizy i optymalizacji,
- konieczność analizy w odpowiednio długim horyzoncie czasowym – nierzadko z uwzględnieniem całego cyklu życia kopalni (ang. *Life of Mine*).

Cechy te decydują o niskiej wiarygodności uproszczonych metod obliczeniowych, przemawiając za zastosowaniem badań symulacyjnych. Uwagę zwraca również częste współistnienie i współpraca różnych systemów transportu urobku. Można przypuszczać, że ich punkty styku powinny koncentrować uwagę w sposób szczególny, gdyż mogą stanowić kluczowe węzły decydujące o ograniczeniach i efektywności całego procesu.

Dane pomiarowe poddane przekształceniu zgodnie z przykładami zawartymi w rozdziale i użyte techniki wizualizacji mogą być traktowane jako element metodyki analizy pracy istniejącego systemu transportowego w celu przygotowania danych wejściowych do modelu symulacyjnego. Użyte techniki oraz dane źródłowe są niezwykle istotne, zważywszy na dalszą potrzebę kalibracji i weryfikacji poprawności modeli symulacyjnych. Szczegółowy wybór parametrów techniczno-ruchowych wymaganych do parametryzacji modeli nadawy i modeli maszyn oraz urządzeń transportowych w głównej mierze zależy jednak od obranego celu badawczego oraz cech indywidualnych rozpatrywanego przypadku. Skalowalność i zróżnicowanie zastosowań, dywersyfikacja cech obiektów uczestniczących w procesie transportowym ograniczają zasadność przygotowania jakiegokolwiek stałej listy parametrów techniczno-ruchowych wymaganych do budowy modeli. Parametry te można jednak pogrupować na następujące kategorie:

- położenie obiektu w przestrzeni (lokalizacja, długość, nachylenie),
- stan pracy obiektu (w tym również sekwencja pracy),
- parametry wydajnościowe skorelowane z czasem i stanem pracy (wydajność wyjściowa, prędkość i kierunek przemieszczania, jednostkowa pojemność, czas wykonania cyklu),
- parametry eksploatacyjne (uszkodzalność, naprawialność, dostępność czasowa),
- interakcje zewnętrzne (lista zadań, instrukcje warunkowe, zewnętrzne zmienne sterujące).

Wyszczególnione parametry opisujące stan pracy, parametry wydajnościowe i użytkowe stanowią zbiór próbek pomiarowych o charakterze statystycznym, a zatem opisywać je będą rozkłady wartości. W pracy poza zastosowaniem odpowiednich miar statystycznych, istotną rolę mogą pełnić korelacje pomiarów chwilowych oraz wartości zagregowanych w czasie, pozwalają one na obserwację dynamiki zmian wartości. Ten rodzaj obserwacji wykorzystany został m.in. w zakresie weryfikacji działania modeli.

4. Symulacja procesów transportowych

Modele symulacyjne powinny cechować przede wszystkim jak najwyższą użyteczność w zakresie oceny wielokryterialnej rozwiązań techniczno-organizacyjnych, wywierających wpływ na przebieg procesów transportowych urobku.

Rozpatrując złożoność procesów transportowych oraz zróżnicowanie potrzeby w aspekcie ich analizy, można zauważyć, że opracowanie efektywnych modeli symulacyjnych jest zadaniem wymagającym gruntownego przygotowania technicznego. W związku z tym uzasadnione wydaje się określenie wymagań, co do ogólnych funkcjonalności modeli, jak również dokonanie przeglądu możliwości, stosowanych technik i podejść w zakresie symulacji procesów transportowych.

4.1. Wprowadzenie do symulacji komputerowej

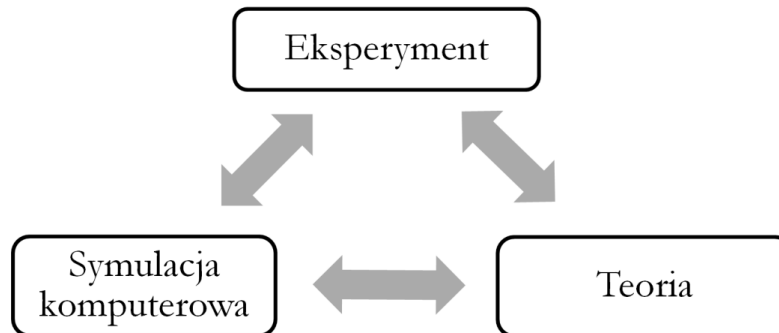
Początki stosowania badań symulacyjnych sięgają lat czterdziestych ubiegłego wieku, gdy narodziło się podejście nazwane metodą Monte Carlo. W tym okresie rozpoczęła się era postępu w dziedzinie cyfrowej techniki obliczeniowej oraz zwiększyło się znaczenie i rola badań operacyjnych tudzież pokrewnych dyscyplin naukowych, jako podstawy wsparcia podejmowanych decyzji. Choć początkowo zastosowanie symulacji jako metody badawczej obejmowało nauki ścisłe takie jak fizyka, matematyka, chemia, astronomia, wraz z postępującą komputeryzacją, symulacja komputerowa zaczęła odgrywać coraz większą rolę w rozwoju nauki i techniki.

Obecnie symulacja komputerowa jest narzędziem szeroko stosowanym zarówno w nauce, jak i niemal każdej gałęzi działalności gospodarczej. Metody symulacji komputerowej są w stanie dostarczyć inżynierom narzędzi niezbędnych w wielu dziedzinach m.in.: elektrotechnice, automatyce, mechanice, mechanice płynów, transporcie publicznym i przemysłowym. Przykłady zastosowania modeli symulacyjnych można bez najmniejszego trudu odnaleźć w naukach przyrodniczych, socjologii, zarządzaniu. Dzięki szerokiemu zastosowaniu w ocenie sytuacji obarczonych niepewnością symulacje zyskały bardzo szerokie zastosowanie w dziedzinie nauk ekonomicznych. Dostępna obecnie skala obliczeń, pojemność pamięci cyfrowej, istnienie wielu paradygmatów programowania sprawia, że pojęcie symulacji komputerowej wykracza dziś daleko poza kanwy tradycyjnych zastosowań obejmujących przede wszystkim numeryczne rozwiązanie równań odwzorowujących zjawiska zachodzące w otaczającym świecie. Ostatnie pięćdziesięciolecie to okres formułowania zupełnie nowych podejść w aspekcie realizacji symulacji komputerowej na zróżnicowanym poziomie abstrakcji odwzorowania stanu rzeczywistego. Wśród nich wymienić można te najbardziej istotne, zważając na tematykę pracy, jak m.in.: metodę systemów dynamicznych (ang. *Dynamic Systems*), metodę kolejnych zdarzeń (ang. *Discreet Event Simulation*), metodę dynamiki systemów (ang. *Systems Dynamics*), metodę agentową (ang. *Agent-Based Simulation*), metodę elementów dyskretnych (ang. *Discrete Element Method*), metodę przestrzeni komórkowych (ang. *Cellular Automata Simulation*). Symulacja stanowi nieocenione źródło poznania, umożliwiające zarówno realizację przyspieszonych badań, jak również projektowanie złożonych struktur technologicznych.

W dalszej części rozdziału zawarto podstawowe informacje pozwalające na zrozumienie dalszych zadań podejmowanych kolejno w celu opracowania, weryfikacji i walidacji modeli symulacyjnych. Uwagę skoncentrowano również na ogólnej tematyce badań symulacyjnych oraz istniejących koncepcjach stosowania symulacji w zakresie modelowania procesów transportowych.

4.1.1. Definicja symulacji komputerowej

Potrzeba realizacji eksperymentów symulacyjnych wynika z konieczności rozwiązania problemów o zbyt złożonej naturze dla tradycyjnego podejścia analitycznego. Szerokie zastosowanie symulacji w modelowaniu procesów rzeczywistych o wysokim stopniu złożoności, umożliwia obecnie nie tylko rozwiązanie szerokiej gamy zidentyfikowanych problemów, lecz również stanowi bazę umożliwiającą formułowanie zupełnie nowych kierunków badawczych (rys. 4.1). W niektórych przypadkach przemawia to za zastosowaniem symulacji, również w warunkach gdy podejście analityczne jest wystarczające do rozwiązania napotkanych problemów.



Rysunek 4.1. Trójkąt „eksperyment – teoria – symulacja” podstawowe źródła poznania (Wilhelm 1987).

W literaturze przedmiotu pracy odnaleźć można zróżnicowane definicje symulacji, m.in:

- *Symulacja jest użyciem modelu w celu chronologicznego tworzenia historii stanów modelu, która jest traktowana jako historia stanów modelowanego systemu* (Evans, Wallace, i Sutherland 1967).
- *Symulację definiujemy jako technikę numeryczną służącą do dokonywania eksperymentów na pewnych rodzajach modeli matematycznych, które opisują przy pomocy maszyny cyfrowej zachowanie się złożonego układu w ciągu długiego okresu czasu.* (Naylor 1975).
- *Symulacja jest numeryczną techniką komputerową służącą eksperymentalnemu badaniu w czasie procesów stochastycznych lub deterministycznych* (Schruben i Margolin 1978).
- *Symulacja obejmuje opracowanie modelu rzeczywistego systemu, a następnie przeprowadzenie doświadczeń na modelu w celu zrozumienia, zachowanie systemu i/lub oceny różnych strategii jego działania* (Shannon 1998).

Istotę symulacji (łac. *Simulatio* – „udawanie”, *similis* – „podobny”) stanowi odtworzenie przebiegu zjawisk za pomocą modelu odwzorowującego oryginał. Symulacja komputerowa, pomimo tego iż wyróżnia się określonymi spójnymi cechami, takimi jak m.in.: obecność modelu komputerowego, jest jednak mało specyficzną metodą badawczą. Trudności w jednoznacznym sformalizowaniu definicji symulacji komputerowej, wynikają zarówno z istnienia wielu, zróżnicowanych, dynamicznie rozwijających się metod i technik symulacyjnych, jak i ogólnego postępu w obszarze techniki cyfrowej, włączając w to dostępność licznych paradygmatów programowania, jak i konkretnych środowisk programistycznych. Z tego powodu symulację komputerową zdefiniować można w sposób ogólny, jako podejście badawcze stanowiące zbiór technik i metod umożliwiających opracowanie komputerowego modelu analizowanego procesu lub systemu oraz przeprowadzenie na nim eksperymentów. Skutkiem tego modelowanie symulacyjne stanowi swoisty proces wyszukiwania w systemie cech i związków istotnych z racji rozpatrywanego celu symulacji oraz odwzorowania ich za pośrednictwem stosownych funkcji lub algorytmów. W powyższym ujęciu komputerowy model symulacyjny, będący tematem niniejszej pracy, rozumiany być może jako zbiór algorytmów i funkcji matematycznych

umożliwiających zrozumienie zachowania modelowanego systemu, poprzez oddziaływanie wielkościami mającymi swoje odpowiedniki w rzeczywistości. Symulacja stanowi natomiast proces manipulowania modelem w sposób umożliwiający poznanie jego zachowania i obserwację potencjalnych oddziaływań.

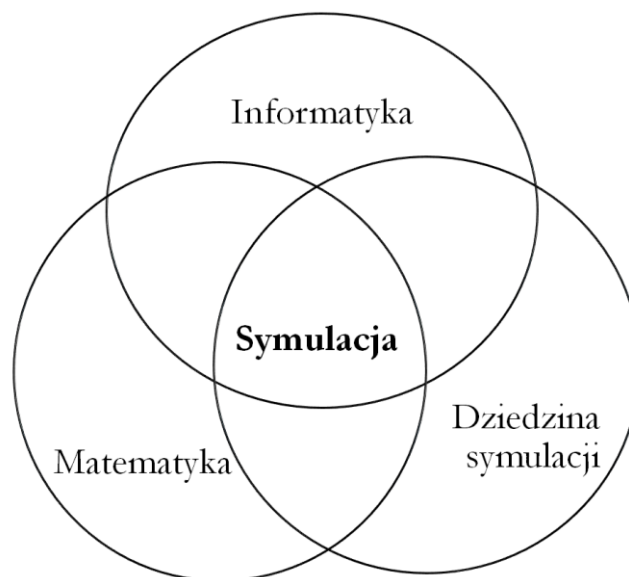
Zważając na temat pracy na szczególną uwagę zasługuje sam proces opracowania modelu symulacyjnego. Modelowanie (łac. *Modulus* – „miara”, „wzór”) – jest pojęciem operującym na zależnościach pomiędzy systemami rzeczywistymi i reprezentującymi je modelami konceptualnymi. Czynność ta jest w pewnym stopniu procesem naturalnym dla ludzkiego umysłu, którego funkcjonowanie w wielu względach przypomina operacje na uproszczonych modelach rzeczywistości. Można w tym zakresie wyróżnić dwa podstawowe podejścia w aspekcie modelowania symulacyjnego:

- z góry na dół (ang. *top down*, *Macro to micro*),
- z dołu w górę (ang. *down top*, *micro to Macro*).

W procesie modelowania decydującą rolę odgrywa pojęcie abstrakcji, która polega na celowym, myślowym pomijaniu lub odwzorowaniu przedmiotowych cech lub relacji. Abstrahowanie decyduje o poprawności przyjętego modelu. Przykładowo, zbyt uproszczona reprezentacja rzeczywistości w modelu, prowadzi w konsekwencji do pominięcia istotnych z punktu widzenia celu badania zależności istniejących w realnym systemie.

4.1.2. Narzędzia badań symulacyjnych

Należy zaznaczyć, że przywoływane w pracy techniki symulacji komputerowych stanowią aktualnie interdyscyplinarną dziedzinę badań, wymagającą oprócz dziedziny macierzystej, znajomości zagadnień z zakresu informatyki oraz matematyki (rys. 4.2).



Rysunek 4.2. Przestrzeń dziedzinowa technik symulacji komputerowej (Landau 2008).

Równocześnie, z uwagi na szerokie zastosowanie badań symulacyjnych, dostępne są zróżnicowane środowiska symulacyjne, wyposażone w graficzny interfejs użytkownika, które umożliwiają realizację badań symulacyjnych bez znajomości stosowanych języków programistycznych, jak i metod modelowania matematycznego. Fakt ten korzystnie wpływa na ilość zastosowań badań symulacyjnych

w różnych dziedzinach nauki i techniki. Zwiększa jednak równocześnie ryzyko popełnienia elementarnych „błędów w sztuce”, ponieważ wykorzystanie danego środowiska symulacyjnego nie jest równoważne ze znajomością elementarnych zasad jego działania. Korzystanie z rozwiązań stanowiących dla użytkownika czarną skrzynkę (ang. *black box*), powodować może przekłamania zarówno na etapie modelowania rzeczywistości, realizacji symulacji, jak i interpretacji wyników. Szeroki opis tematyczny zagrożeń związanych z stosowaniem metod symulacyjnych ujęty został w pracy (Banks i Chwif 2011). Na podstawie przeprowadzonego przeglądu zastosowań symulacji oraz oprogramowania stosowanego w tym zakresie, tudzież wyników pracy (Tarshizi 2014), wyróżnić można następujące klasy oprogramowania symulacyjnego:

- języki ogólnego przeznaczenia (C, C++, Python, Java, Visual Basic, Fortran) oraz środowiska do obliczeń naukowych i inżynierskich (R, Matlab, Octave, MathCAD),
- języki symulacyjne (ACSL, AS, Dynamo, ESP, FORSIM, GASP, GPSS/H, GSP, iThink, MILTRAN, NSS, OPS, Poses++, Power, QNAP, SEAL, SILLY, SIMAN, SIMCON, SIMPAC, SIMPL, SimPy, SIMSCRIPT, SIMTRAN, Simula, Simula-67, SLAM, SLANG, SOL, SPL, Stella, VisSim, XMLlab),
- środowiska symulacyjne: (@RISK, Anylogic, Arena, AutoMod, AweSim, Cinema, CrystalBall, EcosimPro, eM-Plant, Factor, Flexim, Promodel, ProModel, Rockwell Arena, Saber-Simulator, Simevents (Matlab), Simfactory, Simio, Simul8, Simulink, Vensim, Witness),
- dedykowane dla branży górniczej symulatory (m.in.: SimMine).

Wybór stosowanego narzędzia może być podyktowany wieloma względami. Pakiety i środowiska symulacyjne dostarczane w formie zamkniętego oprogramowania umożliwiają zdecydowanie szybszą budowę modeli symulacyjnych z minimalnym lub całkowitym wyeliminowaniem konieczności programowania. Niezaprzeczną zaletą środowisk symulacyjnych jest dostępność interfejsu oraz szeregu użytecznych narzędzi umożliwiających wizualizację wyników poprzez symulacje, wykresy, obróbkę danych wsadowych, statystykę danych wyjściowych i gotowe raporty wynikowe. Nieco bardziej wymagające języki symulacyjne umożliwiają natomiast uproszczenie rozwoju symulacji, poprzez narzucenie poprawności technicznej tworzenia programów symulacji według pewnych schematów symulacji, co nie oznacza jednak wyeliminowania tzw. błędów w sztuce. Implementacja w językach ogólnego zastosowania wymaga najwięcej pracy i umiejętności programistycznych w celu opracowania kompleksowego modelu symulacyjnego. Niezaprzeczną zaletą takiego rozwiązania jest jednak to, że dostarcza najwięcej możliwości i zapewnia największą elastyczność w zakresie funkcjonalnym. W zależności od specyfiki wymagań język ogólnego przeznaczenia umożliwić może realizację dedykowanych funkcji, nieprzewidzianych przez autorów gotowych bibliotek lub oprogramowania, jak również dostosowanie i optymalizację algorytmu symulacyjnego według zdefiniowanych potrzeb. Rozwiązanie to daje przewagę w przypadku potrzeby odwzorowania złożonych, specyficznych reguł logicznych działania modelu lub cech obiektów. W aspekcie tematu pracy problem taki stanowić może odwzorowanie lokalnych i nadrzędnych reguł sterowania procesem transportowym oraz ruchem obiektów samojezdnych. Stwierdzono również, że specyficzne wymagania w tym zakresie formułować mogą modele punktów nadawy, potrzeba zorientowania zadań wydobywczych, infrastruktury i parametrów geologicznych urobku w dynamicznym modelu strukturalnym i przestrzennym.

W związku z tym wraz z intensyfikacją badań nad procesem transportowym i towarzyszącym mu rozwojem modeli symulacyjnych, podjęto decyzję o wykorzystaniu w tym zakresie wyłącznie języków ogólnego przeznaczenia. Istotnym czynnikiem, który przemawiał za tym wyborem, jest fakt, że języki symulacyjne są bardzo specyficzne a ich obszar zastosowania mocno ograniczony, toteż ewentualna

przenośność modelu lub rozbudowa o struktury funkcjonalne w szczególności obiektowe, obejmujące m.in. modele danych wejściowych, zwykle nie jest możliwa lub jest bardzo czasochłonna.

4.1.3. Etapy badań symulacyjnych

Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami, symulacja może być niezwykle przydatnym narzędziem badawczym, jednak podobnie jak pozostałe metody, posiada swoje zalety i wady. Jedną z jej podstawowych wad jest wrażliwość na błędne założenia, błędy w sztuce jak również przyjęcie nieprawidłowych danych wejściowych. Ostatnia sytuacja często określana jest w sposób dosadny tzw. zasadą GIGO (ang. *Garbage In, Garbage Out*). Stąd też szczególnego znaczenia w obrębie niniejszej pracy nabiera zarówno odwzorowanie właściwych w przestrzeni czasu wartości masowych nadawy punktów załadunkowych, co zostało przeprowadzone w rozdziale 3.3, jak również przyjęcie właściwego planu realizacji badań symulacyjnych. Plan ten powinien przede wszystkim umożliwić wykrycie uchybień obarczających wyniki dalszych badań. Wskazane jest zatem, aby zastosować się w tym względzie do pewnych podstawowych, umownych wytycznych dotyczących opracowanego modelu oraz sposobów postępowania badawczego z użyciem metod symulacyjnych.

Bardzo szczegółowa w zakresie metodycznym, jak również praktycznych wskazówek, jest literatura zagadnienia (Banks 1998; Bossel 1994; Robinson 2004; Law 2013), która definiuje poszczególne etapy realizacji badań symulacyjnych. Podział prezentowany w poszczególnych pracach nie jest jednak homogeniczny, stąd też w dalszej części rozdziału postanowiono w jak najszerszym ujęciu scharakteryzować modelowy przebieg badań symulacyjnych. Wyróżniono w tym zakresie następujące etapy realizacji badań symulacyjnych:

1. Sformułowanie celów i założeń modelowania.
2. Budowa bazy wiedzy i bazy danych o modelowanym systemie.
3. Wybór kategorii modelu, przygotowanie danych wejściowych.
4. Określenie struktury modelu i jego budowa.
5. Implementacja modelu – sprowadzenie modelu do programu komputerowego.
6. Ocena zasadności modelu – weryfikacja i walidacja działania modelu.
7. Planowanie eksperymentu symulacyjnego.
8. Realizacja eksperymentu symulacyjnego.
9. Analiza i interpretacja wyników symulacji.
10. Dokumentowanie symulacji.
11. Praktyczne wykorzystanie wyników.

Pierwszy z wymienionych etapów – formułowania celów i założeń modelu – ma na celu określenie obrębu analizowanego systemu poprzez wydzielenie go z otoczenia oraz obszaru lub domeny systemu, którego będzie dotyczyć analiza. W etapie tym sprecyzowany zostaje problem badawczy oraz cel realizacji badania. W następnym kroku realizowane są procesy akwizycji, gromadzenia i interpretacji danych dotyczących modelowanego systemu. Kompleksowość bazy wiedzy jest szczególnie istotna z uwagi na prawidłowość założeń przyjętych na etapie tworzenia i wyboru kategorii modelu. Zważając na tematykę pracy, dane obejmować powinny w szczególności:

1. Opis obiektów (opis realizowanych procesów i wzajemnych interakcji).
2. Strukturę i przestrzenną lokalizację obiektów (relacje między obiektami, położenie w przestrzeni).
3. Organizację i zasady sterowania procesem transportowym (harmonogramy pracy, reguły decyzyjne).

4. Modele punktów załadunkowych opracowane na podstawie planów kopalni i danych statystycznych (map i harmonogramów eksploatacji, raportów produkcyjnych, danych pomiarowych dotyczących pracy maszyn górniczych).
5. Dane weryfikacyjne modelu (pomiar z wag, wypełnienie zbiorników, obciążenie napędów, liczba skipów wydobytych na powierzchnię).

W dalszej kolejności powinno nastąpić określenie kategorii modelu oraz wstępne przygotowanie danych wejściowych do symulacji. Na tym etapie wykonywane jest formułowanie modelu, które oznacza ustalenie zasad zachowania modelu, w szczególności wzajemnych zależności i interakcji czynników, wyróżnienie pętli sprzężeń zwrotnych. Etap modelowania rzeczywistego systemu może zostać przeprowadzony zarówno na bazie obserwacji stanu wejść i wyjść systemu, jak i stanu wejść i funkcji transformacji lub analizy całej jego struktury. Następnym etapem, który może być niezwykle pracochłonny i wymagający uwagi, to implementacja modelu, która obejmuje algorytmizację modelu za pomocą języków programistycznych lub dedykowanych środowisk symulacyjnych. Kolejnym krokiem niejako towarzyszącym etapowi implementacji jest proces weryfikacji i walidacji – szczególnie etap budowy modelu, który powinien być wykonywany zawsze z uwzględnieniem celu symulacji oraz rozpatrywanych zastosowań modelu. W najprostszym ujęciu weryfikacja polega na sprawdzeniu prawidłowości przekształcania modelu formalnego w kod komputerowy. Walidacja ma na celu uzasadnienie użyteczności i prawidłowości modelu w aspekcie przyjętych celów badawczych, a zatem sprawdzeniu czy model posiada zadawalający stopień dokładności, zgodny z zamierzonym zastosowaniem modelu. Walidacja modelu może być zrealizowana w wieloraki sposób (Karkula 2012; Robinson 1997; Balci 2003), między innymi przez:

- porównanie z innymi modelami,
- metodę ekspertową,
- test Turinga,
- testy degeneracyjne,
- testy stałych wartości,
- testy warunków ekstremalnych,
- metody historyczne,
- metody grafiki operacyjnej,
- metody śledzące,
- metody badania rodzin trajektorii,
- weryfikację zdarzeniową,
- walidację danych historycznych,
- weryfikację wewnętrzną,
- weryfikację predykcyjną,
- weryfikację zdarzeniową,
- analizę wrażliwości.

W niniejszej pracy, jako wiodące podejście w zakresie weryfikacji algorytmów, wykorzystano porównanie relacji wejście-wyjście modelu i systemu rzeczywistego, co było możliwe w drodze szczegółowego opracowania danych wejściowych na potrzeby odwzorowania obiektów występujących w symulacji, jak i w zakresie weryfikacji działania modelu.

Kluczowym etapem następującym po ocenie zasadności modelu, bezpośrednio przed wykonaniem eksperymentu, jest jego zaplanowanie. Ponieważ etap realizacji badań symulacyjnych (eksperymentu) oznacza numeryczne rozwiązanie modelu przy ustalonych założeniach, planowanie doświadczeń wiąże się również ze zmianą tych założeń, co ma na celu właściwe i sprawne badanie wpływu otoczenia,

efektów zmiany w obrębie obiektu symulacji lub roli procesów stochastycznych. Zasadniczo celem planowania jest uzyskanie przebiegu eksperymentu gwarantującego maksymalną ilość wartościowych informacji przy minimalnej liczbie eksperymentów. Realizowana bezpośrednio po eksperymencie analiza i interpretacja wyników symulacji, może wymagać statycznej analizy pokaznego zbioru próbek danych będących efektem przeprowadzenia eksperymentu lub szeregu eksperymentów symulacyjnych. Stąd też szerokie wykorzystanie na tym etapie znajdują metody statystyczne, w tym eksploracyjna analiza danych poprzez wizualizacje pomiarów na wykresach z wykorzystaniem metod wyróżniania – tak jak zostało to wykonane w niniejszej pracy. Jako ostatni etap bezpośrednio związany z otrzymanymi wynikami należy wymienić opracowanie dokumentacji oraz praktyczne wykorzystanie wyników.

Zasadniczo wszystkie wyszczególnione etapy mogą przyjąć charakter cykliczny lub iteracyjny, prowadząc do powstania więcej niż jednej wersji modelu. Stan ten wynika wprost ze stopnia złożoności problemu, złożoności samego modelu oraz wpływu warunków niepewności. Otrzymanie właściwego rozwiązania funkcjonalnego lub cech użytkowych modelu częstokroć wymagało w niniejszej pracy przeprowadzenia wielu poprzedzających eksperymentów symulacyjnych i wprowadzania sukcesywnych poprawek. W opisanej sytuacji wykorzystanie wyników uzyskanych z modelu w pierwszej kolejności prowadziło do kwestii związanych z ciągłym doskonaleniem jego budowy w aspekcie cech użytkowych lub funkcjonalnych. Finalnie etap opracowania i rozbudowy modelu podobnie jak realizacja eksperymentów symulacyjnych powinien być zwieńczony opracowaniem dokumentacji umożliwiającej chronologiczne śledzenie rozwoju modelu oraz eksperymentów. W niniejszej pracy dokumentacja rozwiązań zamieszczona została w rozdziałach 5, 6 i 7 opisujących kolejno sposób działania modeli, przewidziane funkcje użytkowe oraz przebieg i wyniki ich walidacji.

4.1.4. Symulacje procesów transportowych

Symulacja procesów transportowych, z uwagi na swój specyficzny charakter, przebieg i ogólną problematykę, stanowi osobną poddziedzinę symulacji komputerowych. W ogólnym ujęciu, podobnie jak symulację systemów produkcyjnych, wykonuje się ją najczęściej w celach:

- prognostycznych – obejmujących wyznaczenie parametrów funkcjonowania modelu dla określonych warunków,
- identyfikacyjnych – obejmujących opis praw i zasad funkcjonowania systemu,
- racjonalizacyjnych – obejmujących wyznaczenie parametrów, dla których działanie systemu spełnia założone normy jakościowe procesu.

Typowe zastosowanie modeli symulacyjnych procesów transportowych obejmuje dodatkowo różne cele szczegółowe, takie jak: identyfikacja wąskich gardeł, określenie wrażliwości na zmianę parametrów wejściowych, określenie pojemności i elastyczności badanego obiektu, optymalizację jego struktury funkcjonalnej, określenie wydajności pracy, opóźnień w dostawie, wskaźników niezawodnościowych systemu, w tym możliwej redukcji przyczyn postojów. Przyjęty cel realizacji badań zależy więc przede wszystkim od rodzaju odwzorowanego systemu. W najprostszym ujęciu badania systemów transportowych obejmować mogą:

- systemy transportu publicznego – drogowe, kolejowe, lotnicze, morskie,
- systemy logistyczne przedsiębiorstw, z dodatkowym podziałem na: logistykę zaopatrzenia, logistykę produkcji, logistykę dystrybucji.

Znacząca część pozycji literaturowych poświęcona jest stricte problematyce symulacji ruchu ulicznego (ang. *traffic simulation*), w tym kwestii organizacji pracy zbiorowych systemów komunikacji

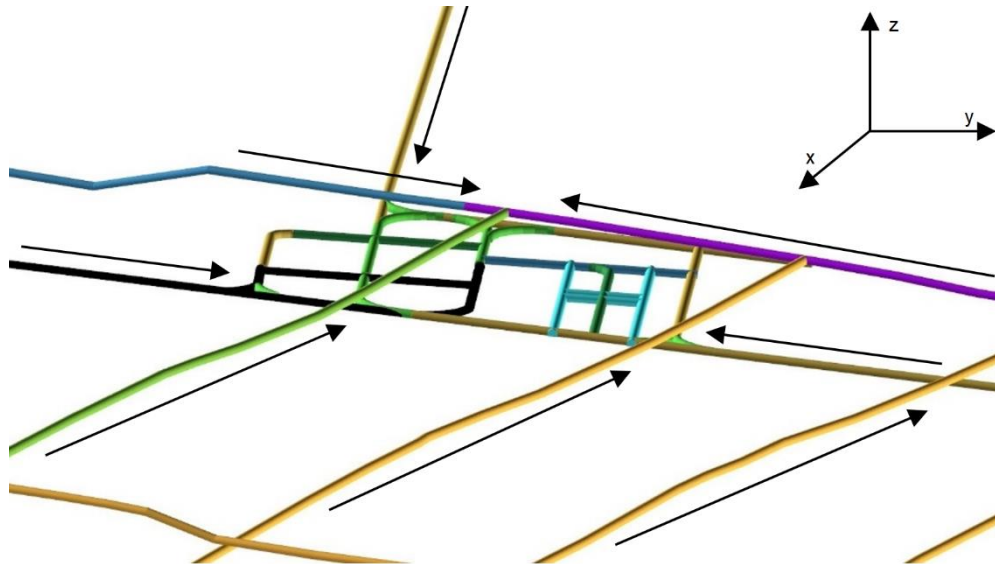
(Zhou i in. 2019). Tematyka ta począwszy od lat sześćdziesiątych systematycznie zyskuje na znaczeniu wraz z rozwojem sieci komunikacyjnych, obszaru metropolii i upowszechnieniem środków transportu kołowego. Modele symulacyjne przeznaczone do analizy ruchu ulicznego, pomimo wielu podobieństw, mają jednak ograniczone zastosowanie w aspekcie niniejszej pracy. Zastosowanie znajduje jednak syntetyczny podział tychże symulacji na tzw. podejście makroskopowe i mikroskopowe. Podział ten identyfikuje dwie podstawowe struktury modelu ruchu:

- W ujęciu makroskopowym proces transportowy opisywany jest funkcyjną zależnością charakterystyczną dla danej gałęzi transportowej. Podejście makroskopowe zakłada opisanie ruchu drogowego poprzez funkcję o wyższym poziomie uogólnienia, operującą zwykle w dłuższym horyzoncie czasowym, wyrażoną wskaźnikami wydajnościowymi elementów infrastruktury komunikacyjnej (tras).
- W podejściu mikroskopowym proces transportowy jest opisywany poprzez bezpośrednie odwzorowanie zachowania pojedynczych pojazdów, ich cech oraz preferencji. Modele mikroskopowe operują na znacznie dokładniejszym opisie procesu, mając na celu odwzorowanie ruchu poszczególnych pojazdów w sposób jak najbardziej zbliżony z rzeczywistością. Realizacja badań w tym przypadku wymaga jednak dokładniejszych danych wejściowych tudzież badania cech i zachowania poszczególnych jednostek, w celu odwzorowania ich ruchu.

Opisana klasyfikacja podejść posłużyła do budowy wstępnych założeń względem modeli przewidując potrzebę opracowania modelu uproszczonego oraz szczegółowego, które mogą być zamiennie stosowane w zależności od potrzeb.

W obszarze bezpośredniego zainteresowania, zważając na temat pracy, znajdują się kwestie związane bezpośrednio z logistyką produkcji seryjnej lub masowej. Dotyczy to w szczególności systemów masowego transportu przemysłowego (*ang. bulk material handling*), do których zaliczyć można systemy transportu urobku i które pomimo dużego zróżnicowania w wielu przypadkach charakteryzują zbliżone zasady działania oraz kwestie problematyczne. Niesie to ze sobą możliwość potencjalnego wykorzystania stosowanych w tym zakresie technik symulacyjnych. Jakkolwiek z uwagi na rodzaj elementów podlegających transportowi, zróżnicowane warunki realizacji oraz wymagania użytkownika (przedsiębiorcy), można mówić tu wyłącznie o zaadoptowaniu pewnych podejść i doświadczeń.

Bardzo wyraźne różnice w obszarze funkcjonalnym wskazać można pomiędzy transportem masowym materiału a produkcją seryjną. Przykładowo w odniesieniu do produkcji seryjnej śledzenie przepływu pojedynczego zamówienia (produktu) jest kwestią zasadniczą, zważając na zachowanie norm jakościowych i zapewnienie warunków pełnego śledzenia (*ang. traceability*) przebiegu produkcji. W odniesieniu do przypadku transportu zbiorczego materiału (*ang. bulk material handling*) jakkolwiek identyfikacja i śledzenie masy jest kwestią czysto umowną, istotną głównie z technologicznego punktu widzenia. Analogiczne różnice dotyczą samego podejścia do symulacji i potencjalnych sposobów lub kierunków optymalizacji. W przypadku analizy sieci transportowych publicznych zwyczajowo podstawowym celem symulacji jest zapewnienie jak najkrótszego czasu przejazdu. W przypadku analizy transportu masowego, gdy ładunek nie ulega niekorzystnym zmianom w funkcji czasu, parametr ten nie jest istotny, znaczenia nabiera jednak ciągłość procesu w kluczowych punktach pomiarowych.



Rysunek 4.3. Ilustracja przebiegu wyrobisk transportowych w przestrzeni trójwymiarowej (opracowanie własne).

Proces transportu urobku realizowany w warunkach ruchowych zakładu górniczego w uproszczeniu opisać można, jako ruch po torze liniowym: prostoliniowym lub krzywoliniowym (rys. 4.3). Trajektoria ruchu urobku na ogół ograniczona jest siecią istniejących wyrobisk oraz przebiegiem w ich obrębie dróg transportowych. Taka sytuacja dotyczy zarówno liniowych lub cyklicznych systemów transportowych takich jak przenośniki taśmowe i kolej kopalniana, jak również maszyn górniczych samojezdnych. Naturalną konsekwencją tego stanu jest możliwość zredukowania przestrzeni do położenia opisanego na długości obiektu liniowego, który stanowią mogą wyrobiska transportowe zdefiniowane w przestrzeni trójwymiarowej. Wyjątkowy przypadek, w którym analiza ruchu w pewnych sytuacjach wymagać może odwzorowania w trzech wymiarach, stanowią górnicze zbiorniki urobku. Przy czym dotyczy to wyłącznie sytuacji, gdy kolejność urobku opuszczającego zbiornik jest nader istotna, zważywszy na cel symulacji. Co więcej, odwzorowanie to może być przeprowadzone w sposób uproszczony poprzez odpowiednią konfigurację wielu obiektów o charakterze kolejkowym. Jakkolwiek należy zaznaczyć, że szczegółowe odwzorowanie procesu transportowego wewnątrz obiektów takich jak przesypy, kieszenie załadunkowe wozów odstawczych, kieszenie skipowe oraz inne przykłady obejmujące mechanikę transportu materiałów sypkich wewnątrz obiektu, nie jest wymagane biorąc pod uwagę cel pracy. Uzasadnić to można systemowym podobieństwem do obiektów stosowanych w górnictwie odkrywkowym, obiektów stosowanych w budownictwie, przemyśle lub rolnictwie, gdzie symulacje klasy DEM zyskały wszechstronne zastosowanie. Tego rodzaju analizy i symulacje wykonywane są z powodzeniem od lat przez projektantów maszyn i urządzeń w specjalistycznym, przeznaczonym do tego celu oprogramowaniu, toteż trudno wskazać wartość dodaną wynikającą z włączenia tejże tematyki do niniejszej pracy. Z tego względu w pracy, jako wystarczające przyjęto systemy kolejkowe FIFO, LIFO, systemy losowe oraz dowolne ich kombinacje funkcjonalne i strukturalne, tudzież modele opisane prawdopodobieństwem. Planowanie i rozwój modeli symulacyjnych typu DEM potraktowano jako odrębny temat badawczy, zakładając, że modele te w pewnych warunkach dostarczyć mogą wyników umożliwiających uproszczone odwzorowanie fizycznego zachowania obiektów funkcjonalnych.

4.2. Klasyfikacja modeli symulacyjnych

Symulacja komputerowa nie jest pojęciem jednorodnym (rozdział 4.1.1), a raczej zbiorem różnorodnych metod i technik. Metodologia symulacyjna wprowadza wieloaspektową klasyfikację komputerowych modeli symulacyjnych. Zestawienie podstawowych kryteriów podziałowych modeli symulacyjnych usystematyzowane i przyjęte na potrzeby pracy, zamieszczono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Klasyfikacja modeli symulacyjnych z uwagi na kryteria podstawowe (opracowane na podstawie (Łatuszyńska 2011)).

Lp.	Kryterium podziału	Podgrupy
1	Sposób odwzorowania upływu czasu (stanu systemu)	<ul style="list-style-type: none"> – model ciągły (quasi-ciągły) – model dyskretny (sterowany zdarzeniami) – model mieszany (ruch mas jednostkowych ciągły dla obiektu, dyskretny dla systemu)
2	Sposób odwzorowania masy urobku	<ul style="list-style-type: none"> – model ciągły (o zmiennych skupionych lub rozproszonych) – model dyskretny, – model mieszany
3	Sposób odwzorowania przestrzeni (na poziomie obiektów lub w obrębie całego systemu)	<ul style="list-style-type: none"> – model ciągły (quasi-ciągły) – model dyskretny (z regularną lub nieregularną siatką danych) – model mieszany
4	Uwzględnienie niepewności	<ul style="list-style-type: none"> – modele deterministyczne (w tym chaotyczne) – modele stochastyczne
5	Interakcje symulacji z otoczeniem i czasem rzeczywistym	<ul style="list-style-type: none"> – symulacja w czasie rzeczywistym – symulacja offline
6	Rząd (zagłębienie) symulacji	<ul style="list-style-type: none"> – symulacja pierwszego rzędu, – drugiego rzędu – trzeciego rzędu
7	Liczba komputerów	<ul style="list-style-type: none"> – symulacja rozproszona (równoległa) (<i>Aggregate Level Simulation Protocol (ALSP)</i>, <i>Distributed Interactive Simulation (DIS)</i>, <i>High Level Architecture (simulation) (HLA)</i>, <i>Test and Training Enabling Architecture (TENA)</i>) – lokalna (sekwencyjna)

Oprócz zaproponowanych kryteriów można wyróżnić również podział na symulacje statyczne i dynamiczne, chociaż z uwagi na liczne interpretacje dostępne w literaturze, wniosujące symulacje komputerowe z definicji charakteryzować powinny się dynamicznym modelem, podział ten jest sporny. Bogata literatura przedmiotu przedstawia również pochodne podziały, chociażby ze względu na typ funkcji stanu użytych w celu modelowania procesów ciągłych m.in.: liniowe, nieliniowe, o zmiennych skupionych (ang. *Ordinary Differential Equation*, ODE), o zmiennych rozproszonych (ang. *Partial Differential Equation*, PDE), które zostały szczegółowo opisane w dalszej części rozdziału.

Najbardziej istotny, uwzględniając specyfikę pracy, jest jednak podział ze względu na zmienności stanu systemu w czasie, co podyktowane jest w głównej mierze własnościami systemu, będącego przedmiotem odwzorowania. Kluczowy z perspektywy formułowania modelu matematycznego, dychotomiczny podział symulacji komputerowej obejmuje odwzorowanie zmian stanów systemu w czasie za pośrednictwem funkcji ciągłych lub funkcji dyskretnych (równanie 4.1).

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \quad 4.1$$

gdzie:

- $\mathbf{x}(t)$ – wektor stanu symulacji,
- $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ – zmienne stanu.

Zmienne stanu (równanie 4.1) wyznaczają zatem przestrzeń, w której każdy punkt określa pewien chwilowy stan systemu i która jest nazwana przestrzenią stanów systemu. Tym samym podział ten wynika przede wszystkim z możliwości wyróżnienia w modelowanym systemie rzeczywistych lub umownych zdarzeń korespondujących ze skokową zmianą stanów aktywności. Dotyczyć to może przykładowo wyszczególnienia przyjazdów i odjazdów wozów odstawczych, bądź też umownego traktowania transportu, jako procesu ciągłego w formie przepływu strugi urobku w wybranym punkcie przenośnika taśmowego.

Modelowanie dyskretne jest na ogół wykorzystywane w gospodarczych dziedzinach nauki, gdzie często operuje się na pojęciach zdarzeń (faktów, transakcji), np. w modelowaniu procesów produkcyjnych, ekonomicznych.

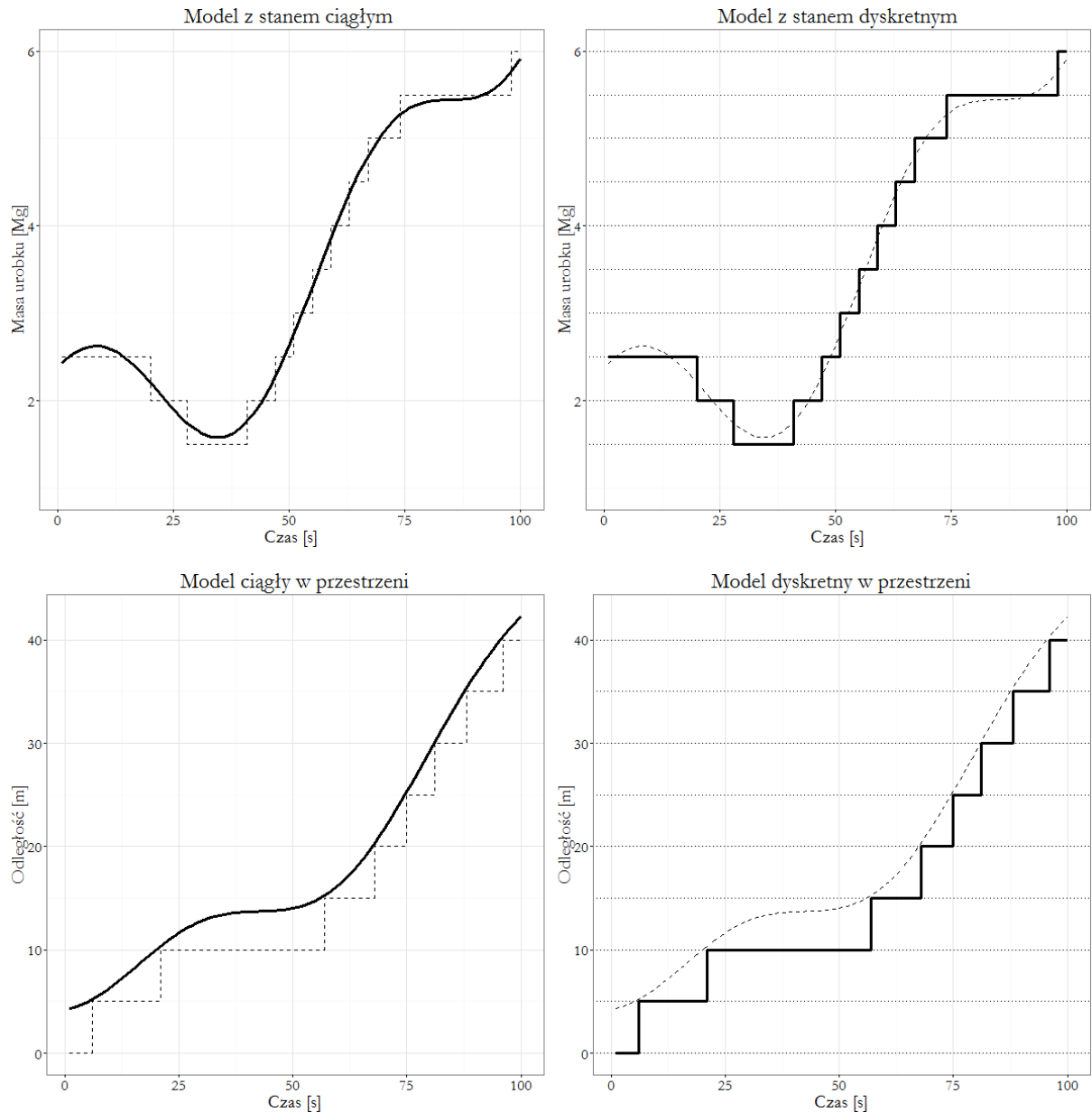
Modelowanie ciągle jest właściwe dla wielu procesów fizycznych i chemicznych. Należy jednak mieć na uwadze, że ciągłość może obejmować różne formy, gdyż końcowo symulacji poddawany jest wpływ czasu, przestrzeń, masa oraz prawdopodobieństwo. Wskutek tego metody symulacji ciągłej w czasie, pozwalają na odwzorowanie masy urobku zarówno jako elementu dyskretnego posiadającego określoną prędkość i położenie, jak i substancji semi-ciągłej w funkcji przestrzeni. Ze względów funkcjonalnych z użyciem ciągłych metod symulacyjnych, odwzorowywane są w pierwszej kolejności procesy dynamiczne możliwe do precyzyjnego opisanie za pomocą układu równań matematycznych obejmujące aksjomaty fizyczne takie jak przykładowo równania mechaniki płynu w przypadku symulacji CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*).

Należy zaznaczyć, że w niniejszej pracy nieodzowne na etapie symulacji lub przetwarzania jej wyników będzie co najmniej częściowe wykorzystanie matematycznego zapisu równań ruchu. Podział przedstawiony w literaturze (Vande Wouwer, Saucez, i Vilas 2014), pozwala w tym zakresie wyróżnić:

- model równań różniczkowych cząstkowych – PDE (ang. *Partial Differential Equation*),
- model równań różniczkowych zwyczajnych (o zmiennych skupionych) – ODE (ang. *Ordinary Differential Equations*),
- model równań różniczkowych zwyczajnych z równaniami algebraicznymi (ang. AE *Algebraic Equations*) w tym DAE (*Differential Algebraic Equations*),
- model równań różniczkowych cząstkowych z równaniami algebraicznymi – PDAE (ang. *Partial Differential Algebraic Equations*),
- model równań różniczkowych zwyczajnych z opóźnieniem DDE (ang. *Delay Differential Equation*),
- model równań różniczkowych cząstkowych z opóźnieniem PDDE (ang. *Partial Delay Differential Equation*),
- model równań różniczkowych stochastycznych SDE (ang. *Stochastic Differential Equation*).

Podstawową formą opisu modeli dynamiki obiektów o parametrach skupionych są równania różniczkowe zwyczajne (ODE). Jednak wiele procesów fizycznych i chemicznych jest opisywanych parametrami, w których zmienne stanu zależą od więcej niż jednej zmiennej niezależnej, jak przykładowo czas i przestrzeń. Zatem w sytuacji, gdy jest to uzasadnione lub wymagane, zmienne stanu mogą zostać opisane za pomocą układu równań różniczkowych cząstkowych (PDE). Wykonanie badań symulacyjnych w tym przypadku sprowadza się do numerycznego rozwiązania rozpatrywanego układu równań przy zastosowaniu jednej z wielu metod takich jak m.in. metoda skończonych różnic lub metoda linii. Należy mieć na uwadze fakt, że w celu realizacji badań, model symulacyjny oprócz równań różniczkowych stanu, powinien uwzględniać warunki brzegowe (ang. *Boundary Sonditions*, BCs) oraz warunki początkowe (ang. *Initial Conditions*, ICs). Dodatkowo należy mieć na uwadze, że w symulacji komputerowej, z wyjątkiem zastosowania komputerów analogowych, trudno mówić o bezpośrednim

wykorzystaniu modeli ciągłych (w sensie stricte – kontynualnych). W praktyce symulacyjnej ciągłe zmiany stanów systemu uzyskiwane są numerycznie, dzięki odpowiednio dobranym, szybkim i pomijalnie krótkotrwałym zmianom dyskretnym systemu – tzw. dyskretyzacji modelu ciągłego (m.in. symulacja ciągła realizowana metodą stałego kroku). Kontinuum czasoprzestrzenne w obu przypadkach zostaje podzielone i zastąpione przez skończony zbiór punktów, elementów lub przedziałów. Różnice w tym zakresie obejmujące odwzorowanie stanu, czasu i przestrzeni zostały opisane przykładem zamieszczonym na rysunku 4.4.

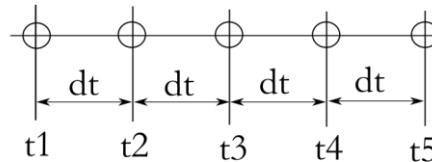


Rysunek 4.4. Ilustracja podstawowych kryteriów podziału modeli symulacyjnych (opracowanie własne).

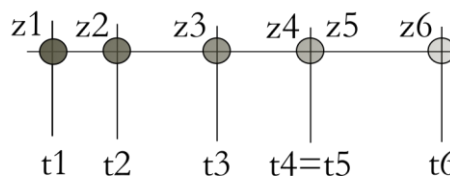
Praktyczna algorytmizacja dynamicznych modeli symulacyjnych wymaga przede wszystkim ustalenia metody odwzorowania upływu czasu, co ma bezpośrednie przełożenie na sposób i moment wykonywania obliczeń, wymagane dane wejściowe, model symulacyjny, format i metodę przetwarzania wyników. Specyficzne podejście stanowi tutaj symulacja zdarzeń dyskretnych (DES), która odznacza się brakiem stałego kroku czasowego – upływ czasu następuje od zdarzenia do zdarzenia (rys. 4.5), przy założeniu, że pomiędzy kolejnymi zdarzeniami nie nastąpi żadna istotna zmiana w systemie. Ten rodzaj

modelowania w przeciwieństwie do symulacji ciągłej ze stałym krokiem czasowym (aktualizującym stan systemu równocześnie dla wszystkich obiektów na końcu odcinka dt) nie wymaga obliczeń w przypadku braku aktywności systemu oraz eliminuje problemy związane z doбором kroku symulacji (dt). Tę własność można utożsamiać z potencjalnym wzrostem szybkości realizacji samej symulacji oraz teoretyczną możliwością zgłębiania przebiegu procesu w ujęciu „od ogółu do szczegółu”, bazując na zapisie sekwencji zdarzeń w czasie w obrębie obiektów o znanych cechach funkcjonalnych.

Metoda stałego kroku



Metoda kolejnych zdarzeń



Rysunek 4.5. Metoda kolejnych zdarzeń – upływ czasu, opracowane na podstawie (Banks 2014).

W niniejszej pracy konieczne uzupełnienie stanowią dodatkowe zmienne zewnętrzne lub funkcje opisane w czasie, takie jak m.in. harmonogram eksploatacji, organizacja godzin pracy, wydajność nadawy, sygnał sterujący położeniem kłapy w punkcie załadunkowym, zadana prędkość taśmy przenośnika. Bez ich uwzględnienia oraz dopasowania do reprezentacji dyskretnej lub ciągłej przyjętej w modelu, realizacja badań symulacyjnych nie będzie możliwa.

Należy podkreślić, że nadrzędnym celem modelowania ruchu urobku jest określenie zmian stanu procesu w przestrzeni i czasie, przy czym pożądany opis jest uzależniony od indywidualnych potrzeb. Stąd też z uwagi na tematykę pracy, szczególnie kluczowa decyzja związana z opracowaniem modeli symulacyjnych, obejmuje wybór właściwego sposobu odwzorowania masy transportowanego urobku. Zasadnicze różnice pomiędzy reprezentacją masy urobku w przestrzeni warunkują dalsze podejście, przede wszystkim w zakresie sposobu odwzorowania upływu czasu. W zależności od obiektów stanowiących elementy systemu bezpośrednio związane z realizacją procesów transportowych, w niektórych przypadkach symulacja może uwzględniać ciągłe funkcje przepływu urobku w poszczególnych lokalizacjach lub wyodrębniać poszczególne porcje urobku, obliczając ich przemieszczenia za pośrednictwem funkcji ciągłych lub dyskretnych. Zagadnienie wyboru najodpowiedniejszego podejścia w tym zakresie obejmuje dodatkowo szereg problemów związanych między innymi z samą kwantyfikacją urobku, rozumianą jako umowne zastąpienie kontinuum masy urobku zapisem liczbowym. Zarówno samo podejście do modelowanego procesu, jak i jego umowna ciągłość lub nieciągłość w funkcji przestrzeni, czasu, odwzorowania stanów systemu umożliwia opracowanie szeregu różnorodnych modeli, w tym rozwiązań mieszanych o zróżnicowanych własnościach i przydatności w kontekście tematu pracy (Fioroni i in. 2007).

W ujęciu dyskretnym ruch masy jest odwzorowany za pośrednictwem ściśle wyodrębnionych elementów. W przypadku niniejszej pracy stanowią one mogą tzw. masy jednostkowe, nazywane również masami skupionymi lub dyskretnymi, które dodatkowo mogą być opisane indywidualnymi cechami jakościowymi lub ilościowymi. Wybór odpowiedniej szczegółowości odwzorowania owych

mas, ma zasadniczy wpływ na dokładność obliczeń i szybkość realizacji badań symulacyjnych. Tym samym określa średnią długość kroku czasowego pomiędzy aktywnościami systemu (zmianami w przestrzeni stanu symulacji), które stanowią momenty zmiany położenia mas w obrębie wyszczególnionych obiektów realizujących funkcję transportową.

W ujęciu ciągłym masa może być odwzorowana przez funkcję opisującą chwilową wydajność w danym punkcie systemu lub wartość liczbową reprezentującą stan akumulacji w przestrzeni i czasie. Realizacja symulacji quasi-ciągłej z modelem opisanym równaniami różniczkowymi zwyczajnymi lub cząstkowymi wymaga odpowiedniej szczegółowości czasowej, co w dalszej perspektywie rzutuje na szybkość symulacji. Oprócz doboru kroku czasowego podstawowy problem związany jest z odwzorowaniem położenia mas w przestrzeni obejmując algorytmizację procedur obliczeniowych, w sposób pozwalający na uproszczenie ich liczby. Przykładowo zastosowanie symulacji numerycznej przemieszczeń urobku na taśmie przenośnika metodą ciągłą ze stałym krokiem czasowym, przy stałej prędkości, skutkować może umownym wyodrębnieniem odcinków czasu, a zarazem odcinków taśmy przenośnika odpowiadających zmianom układu w przedziale pomiędzy poszczególnymi krokami symulacji. Odwzorowanie równań cząstkowych może w tym przypadku z powodzeniem zostać uproszczone do odpowiednich przesunięć struktury danych o charakterze listy. Posługując się skumulowanym zapisem przepływu urobku na wyjściu z obiektu, w rezultacie możliwe staje się wyodrębnienie tzw. mas elementarnych w zależności od przyjętej szczegółowości kwantyfikacji. Ich wyszczególnienie pozwala w dalszej kolejności na wsteczną, równie precyzyjną lokalizację w czasie i przestrzeni na taśmie przenośnika. Właściwość ta jest stosowana w zakresie konwersji zapisu ciągłego na dyskretny i w niniejszej pracy zostanie zastosowana tam, gdzie to jest wskazane w celu eksploracji wyników w ujęciu „od ogółu do szczegółu”.

Należy podkreślić, że zarówno ciągłe, jak i dyskretne podejście posiada swoje wady i zalety. W przypadku mas dyskretnych – urobek dodatkowo może być śledzony od momentu pojawienia się w modelu do zakończenia udziału w procesie, co może w pewnych zastosowaniach być cechą bardzo pożądaną. Podobnie może on posiadać pewne indywidualne atrybuty lub klasy umożliwiające parametryzację oddziaływań z otoczeniem, przez co może wpływać w swoisty sposób na przebieg procesu transportowego obejmującego m.in. przesiewanie urobku. Co ważniejsze, stosując języki programistyczne zorientowane obiektowo, opis cech mas dyskretnych może być elastycznie rozbudowywany, bez konieczności modyfikacji głównego algorytmu obliczeniowego, co jest zdecydowanie bardziej efektywne. Zastosowanie modelu z masą ciągłą, daje natomiast możliwość prostego i precyzyjnego podziału określonej jednostki alokacji masy. Jest to istotne m.in. podczas rozdzielania strugi urobku, który to proces nie jest możliwy wprost do przeprowadzenia w przypadku zastosowania mas dyskretnych. Jednocześnie zachowanie stałego kroku czasowego w przypadku modeli z masą ciągłą upraszcza dalece proces przygotowania i wizualizacji wyników obliczeniowych. Zastosowanie mas dyskretnych, w pewnym sensie sugeruje realizację symulacji z wyodrębnieniem zdarzeń stanowiących o zmianie stanu aktywności lub położenia dyskretnych porcji urobku. Nie jest to jednak nieodzowne, o czym świadczy istnienie i szerokie zastosowanie symulacji DEM, gdzie ruch obiektów może być opisany funkcją ciągłą, a model symulacyjny traktuje poszczególne cząstki jako obiekty o określonym stanie w ciągłej funkcji czasu i przestrzeni. W przypadku symulacji wykorzystujące masy jednostkowe, zakładającej skokowe zmiany aktywności systemu, zastosowanie stałego upływu czasu wydaje się bezpodstawne, jednak rozpatrując konieczność zestawienia wyników w formie przebiegów i rozkładów czasowych, takie podejście może znaleźć pewne uzasadnienie.

Systematyzując i upraszczając powyższe przemyślenia, przemieszczenia masy urobku w zależności od przyjętego podejścia i metody symulacyjnej może zostać szczegółowo opisane przez:

- ciągłą funkcję wydajności procesu transportowego w obrębie dyskretnych lokalizacji funkcjonalnych opisaną układem równań skupionych (ODE),
- ciągłą funkcję gęstości nasypowej urobku, opisaną w ciągłym wymiarze przestrzeni i czasu za pomocą równań cząstkowych (PDE),
- położenie dyskretnej masy urobku w ciągłej przestrzeni i z ciągłym układem równań stanu odwzorowującym wektory sił i prędkości (DEM),
- lokalizację dyskretnych mas urobku w obrębie dyskretnych obiektów funkcjonalnych z ewidencją sekwencji dyskretnych zdarzeń związanych ze zmianą aktywności (DES).

Zastosowanie każdego z wymienionych sposobów zapisu przepływu urobku, może być uzasadnione w określonych okolicznościach. Wybór techniki i formy odwzorowania rzeczywistego procesu za pośrednictwem modelu, powinien być dostosowany do konkretnych zastosowań i cech modelowanego procesu – w tym obiektów funkcjonalnych. Ponadto w wielu przypadkach zachodzić może potrzeba transformacji formatu zapisu na inny, co wynikać może m.in. z potrzeby wizualizacji wyników w postaci schematów, map, wykresów lub też konieczności odwzorowania różnych obiektów funkcjonalnych. Przykład stanowić tu może wóz odstawczy, gdzie opisana w przestrzeni gęstość nasypowa dla skrzyni ładunkowej odgrywa marginalne znaczenie w aspekcie odwzorowania ruchu samej maszyny. Jakkolwiek w przypadku przENOŚNIKA taśmowego tożsame odwzorowanie dla urobku znajdującego się na taśmie o znaczącej długości, znajduje pełne uzasadnienie funkcjonalne. Zważywszy na to, określenie właściwych cech funkcjonalnych modelu symulacyjnego, jest zadaniem kluczowym. Zagadnienie to zostało poddane szczegółowemu rozeznaniu z uwzględnieniem zróżnicowanych perspektyw docelowych zastosowań modeli symulacyjnych. W tabeli 4.2 zamieszczono odniesienie do cech o charakterze aplikacyjnym, które są istotne z perspektywy funkcjonalności i zakresu stosowalności docelowych modeli symulacyjnych w niniejszej pracy.

Tabela 4.2. Klasyfikacja modeli symulacyjnych procesów transportu urobku z uwzględnieniem kryteriów szczegółowych (opracowanie własne).

Kryterium podziału	Podgrupy
Rodzaj modelowanego procesu transportowego	<ul style="list-style-type: none"> – proces ciągły – proces dyskretny – proces mieszany
Sterowanie procesem transportowym	<ul style="list-style-type: none"> – brak sterowania lub stała konfiguracja – regulacja autonomiczna z wykorzystaniem reguł decyzyjnych – sterowanie manualne – decyzje losowe
Skala modelu	<ul style="list-style-type: none"> – kopalnia – fragment kopalni – obiekt transportowy lub ciąg obiektów
Sposób odwzorowania rzeczywistości	<ul style="list-style-type: none"> – model reprezentatywny, uogólniony – model rzeczywisty
Horyzont czasowy symulacji	<ul style="list-style-type: none"> – długi (np. 15 lat) – średni (miesiąc – rok) – krótki (zmiana, doba, tydzień)
Zmiany konfiguracji modelu w czasie	<ul style="list-style-type: none"> – rzeczywiste – uproszczone – bez zmian
Harmonogram produkcyjny	<ul style="list-style-type: none"> – bliżej nieokreślony (w warunkach dużej niepewności) – ustalony ze zmienną losową (wieloscenariuszowe) – deterministyczny
Czas realizacji procesu	<ul style="list-style-type: none"> – symulacja ex-post (historyczna lub kontrfaktyczna) – symulacja w czasie rzeczywistym – symulacja ex-ante
Precyzja odwzorowania procesu transportowego	<ul style="list-style-type: none"> – model mikroskopowy – model makroskopowy

	– podejście mieszane
Interakcje obiektów	– złożone (w tym dalekie) – ograniczone – brak
Alokacja obiektów	– minimalna liczebność – maksymalna liczebność
Precyzja obliczeń	– wysoka – niska – zmienna (z stałym błędem)
Cel symulacji	– identyfikacyjny (objaśniający, pozwalający na zrozumienie systemu, eksploracja, heurystyka) – predykcyjny – racjonalizacyjny
Liczba wymiarów ruchu	– model trójwymiarowy – model dwuwymiarowy – model jednowymiarowy (liniowych odcinków transportowych)

Na wstępnym etapie formułowania założeń należy stwierdzić, że zdefiniowanie i powołanie wyodrębnionych obiektów funkcjonalnych jest uzasadnione i kluczowe z uwagi na możliwość zarówno analizy wyników, przygotowania danych wejściowych dla modelu systemu, jak też samej algorytmizacji ich działania. Reguły przyjęte w zakresie szczegółowości i ilości obiektów wyodrębnionych w środowisku symulacyjnym odgrywają zasadnicze znaczenie rozpatrując funkcjonalność modelu, co zostało podkreślone w kategoriach podziałowych ujętych w tabeli 4.2. Przykładowo, wyodrębniając jako obiekty kolejne odcinki trasy przemożnika, można dokonać umownej dyskretyzacji przestrzeni, tworząc w istocie szereg obiektów odwzorowujących stan symulacji opisany równaniami cząstkowymi. Analogiczny zabieg zwielokrotnienia obiektów można zastosować w celu odwzorowania procesów mieszania się urobku w zbiorniku retencyjnym, co pozwala na uproszczone odwzorowanie ruchu urobku w trójwymiarowej przestrzeni. Analogicznie jak w przypadku metody linii charakterystycznych, układ taki odwzorowuje równania różniczkowe cząstkowe z określoną dyskretyzacją przestrzeni poprzez układ równań o zmiennych skupionych. Szczegółowość dekretacji obiektów narzucona przez badacza na etapie wprowadzania danych i wyodrębniania obiektów, rzutuje zatem wprost na funkcjonalność modelu, pozwalając uzyskać pewną przestrzeń elastyczności w aspekcie dopasowania konfiguracji modelu do rzeczywistych potrzeb badawczych. Cecha ta, pomimo że nie stanowi metodycznego podziału modeli symulacyjnych, może w wielu przypadkach decydować o zakresie stosowalności modelu. Zakładając wyodrębnienie w symulacji obiektów funkcjonalnych, które zostały opisane w rozdziale trzecim, klasyfikację przeprowadzoną w tabelach 4.1 oraz 4.2 uproszczyć można do głównych cech podziałowych, opisujących główne właściwości modeli opracowanych w dalszej części pracy. Zaliczyć do nich można:

- dyskretyzację bądź linearyzację strumienia masy transportowanego urobku;
- wyodrębnianie, odwzorowanie i interakcję wzajemną obiektów tj.:
 - założenia odnośnie ilości powołanych w symulacji obiektów,
 - możliwość dynamicznej dekretacji obiektów w celach odwzorowania przestrzeni,
 - określenia zasięgu oraz możliwych interakcji między obiektami,
 - sposób translacji wymiarów przestrzeni, stanu, masy urobku, cech urobku pomiędzy obiektami różnych typów,
 - sposób oddzielenia mikrosymulacji wewnętrznej obiektów od interakcji zewnętrznych pomiędzy obiektami;
 - określenia kolejności i sposobu realizacji obliczeń na poziomie makrosymulacji, obejmującej wszystkie zdefiniowane obiekty.

Podsumowując wcześniejsze rozważania, warto podkreślić, że rozpatrywane metody symulacji procesów transportowych pozwalają wyróżnić wiele zróżnicowanych podejść. Tutdzież podział metod symulacyjnych interesujących z perspektywy tematyki pracy obejmuje szereg cech związanych zarówno z techniką i formą implementacji, założeniami teoretycznymi, jak i również ich potencjalnym zakresem aplikacyjnym.

4.3. Modele z masą ciągłą

Modele z masą ciągłą z uwagi na prostą konstrukcję i założenia stanowiły jedno z pierwszych opracowanych przez autora modeli symulacyjnych. Ich zastosowanie na wczesnym etapie badań pozwoliło sformułować szereg dalszych wniosków i wymagań względem modeli docelowych. Zrozumienie sposobu ich działania jest kluczowe z perspektywy realizacji tematu pracy. Modele z masą ciągłą zostały użyte zarówno w celach symulacyjnych, jak również ich uproszczona forma znalazła zastosowanie w przetwarzaniu danych wejściowych i wyjściowych w modelach z masą dyskretną.

4.3.1. Model z równaniami różniczkowymi cząstkowymi

Punktem startowym w celu odwzorowania przemieszczeń urobku jest kinematyczne równanie ruchu, które opisuje zależność określającą położenie ciała w przestrzeni, w funkcji czasu. Zgodnie z równaniem 4.2, zmiana położenia transportowanej masy urobku w czasie zależy od prędkości liniowej.

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = v_i(t) \quad 4.2$$

gdzie:

$x_i(t)$ – położenie jednostkowe,

$v_i(t)$ – prędkość jednostkowa.

Ponieważ prędkość chwilowa ciała jest pochodną położenia względem czasu, pozycję obiektu w ruchu prostoliniowym opisać można uproszczonym równaniem 4.3.

$$x(t) = x_0 + vt \quad 4.3$$

gdzie:

x_0 – położenie początkowe,

v – prędkość.

Równanie to wytycza tor ruchu ciała i stanowi podstawę modeli symulacyjnych bazujących na jednym z podstawowych równań różniczkowych cząstkowych – równaniu transportu. Zastosowanie ograniczenia do geometrii ruchu urobku w przestrzeni jednowymiarowej pozwala na sformułowanie zależności ilości masy urobku znajdującej się w danym czasie pomiędzy umownymi, dowolnymi punktami x_1 i x_2 (równanie 4.4).

$$q = \int_{x_1}^{x_2} u(t, x) dx \quad 4.4$$

gdzie:

q – ilość masy urobku znajdująca się w przestrzeni (x_1, x_2) w czasie t ,
 $u(t, x)$ – gęstość jednostkowa masy urobku w punkcie x i czasie t .

Zmianę ilości masy zgromadzonej na odcinku przestrzeni (x_1, x_2) opisać można równaniem uwzględniającym wydajność chwilową, rozumianą jako ilość masy przepływającej w zadanym punkcie w danym okresie czasu.

$$\frac{dq}{dt} = Q(t, x_1) - Q(t, x_2) \quad 4.5$$

gdzie:

Q – chwilowa wydajność przepływu masy w punkcie x i czasie t .

Równanie 4.4 i 4.5 pozwala wyprowadzić zgodnie z prawem zachowania masy związek opisany równaniem 4.6, w którym wydajność chwilowa zależy wprost od jednostkowej gęstości oraz stałej c odwzorowującej relację między położeniem a czasem – prędkość przemieszczania masy.

$$Q(t, x) = cu(t, x) \quad 4.6$$

gdzie:

c – relacja między położeniem a czasem (prędkość transportowa).

Ostatecznie zależność opisaną wzorem 4.6 można przekształcić do postaci równania 4.7, zwanego dalej liniowym równaniem transportu.

$$u_t + cu_x = 0 \quad 4.7$$

Praktyczna implementacja symulacji numerycznej bazującej na wykorzystaniu równań różniczkowych cząstkowych opisujących stan systemu w czasie, posiada wiele korzyści w aspekcie tematyki niniejszej pracy, zaliczyć do nich można m.in.:

- precyzyjne oszacowanie pozycji urobku w funkcji czasu,
- szybki podgląd stanu w przestrzeni oraz efektywną wizualizację procesu w czasie,
- prostsze odwzorowanie zmian prędkości ruchu masy urobku (z uwagi na znane położenie każdej masy),
- możliwość odwzorowania procesów zachodzących w przestrzeni trójwymiarowej jak m.in.:
 - profil trasy przenośnika,
 - niecka taśmy przenośnika,
 - zbiornik retencyjny urobku.

Działania ukierunkowane na opracowanie modeli symulacyjnych podjęte na potrzeby niniejszej pracy, pozwoliły również na zidentyfikowanie szeregu wad tego rodzaju obliczeń. Wśród najbardziej istotnych, rzutujących na dalsze zastosowanie w kontekście analiz wielokryterialnych wymienić należy między innymi:

- czasochłonność i pamięciochłonność symulacji wynikająca z ilości elementarnych obliczeń i rozmiaru wektorów zmiennych stanu,
- problem z zachowaniem bilansu masy,
- problem przeliczeń realizowanych w trakcie zmian prędkości ruchu skutkujący rozprzestrzenianiem się skupionej masy,
- problem z odwzorowaniem ruchu obiektów transportowych samojezdnych,
- problem odwzorowania obiektów cyklicznych, których działania opisują głównie warunki logiczne.

Większość problemów związanych z praktycznym opracowaniem algorytmu symulacji jest związana z dyskretyzacją przestrzeni i zachowaniem zgodności linii ruchu wytyczonymi w przestrzeni i czasie. Z względów optymalizacyjnych wskazane jest, by przekazanie urobku pomiędzy kolejnymi dyskretnymi punktami przestrzeni w kolejnych krokach czasowych zachodziło bez zbędnych podziałów i przeliczeń w relacji 1 do 1. Tego rodzaju implementacja oraz kwestie problematyczne z nią związane zostały opisane w rozdziale 4.3.3.

Należy mieć jednocześnie na uwadze, że jakkolwiek realizacja modelu z masą ciągłą wymaga spełnienia różniczkowego równania zachowania masy (równanie 4.8).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad 4.8$$

gdzie:

- ρ – gęstość masy,
- v – prędkość przepływu,
- t – czas.

Kwestia ta jest szczególnie istotna w przypadku podejścia opisanego w następnym rozdziale. Działania związane z przeliczeniem wydajności chwilowych w sytuacji zmian prędkości liniowej, skutkować mogą potencjalną utratą lub zwiększeniem masy urobku.

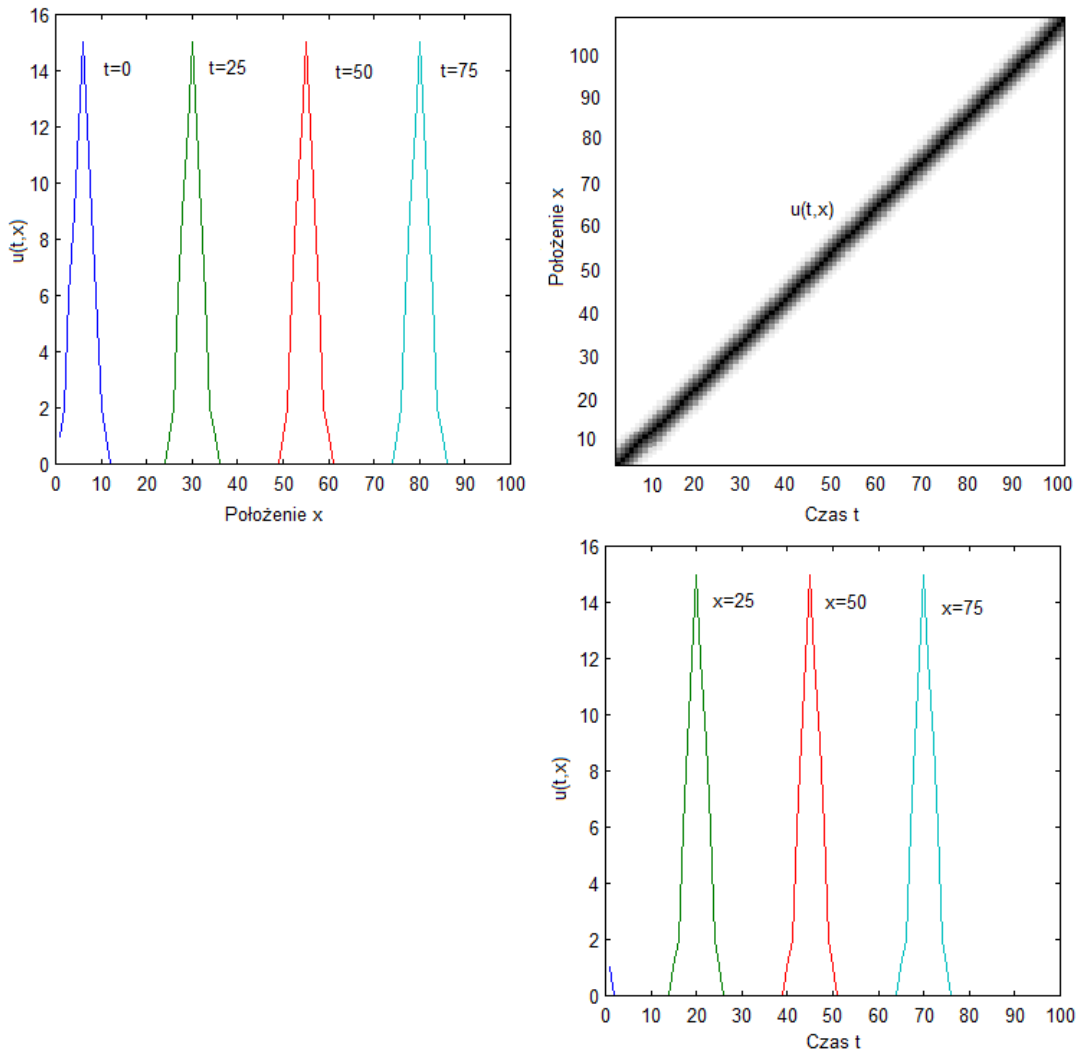
4.3.2. Model z równaniami różniczkowymi zwykłymi

W stałych warunkach realizacji procesu transportowego tj. przy niezmiennej długości drogi transportowej oraz niezmiennej prędkości ruchu, postać równań cząstkowych może być w prosty sposób zastąpiona równaniami różniczkowymi zwykłymi. Ostatecznie przekształcenie równania 4.6 pozwala sformułować rozwiązanie wyrażone funkcją o zmiennej skupionej zamiast zmiennych rozporoszonych (równanie 4.9).

$$u(t, x) = F(x - ct) \quad 4.9$$

W ten sposób odwzorowanie ruchu masy zasadniczo upraszcza realizację obliczeń (rysunek 4.6). Tak jak wcześniej nadmieniono, pewnym sposobem na podgląd przebiegu procesu w przestrzeni w przypadku obiektów wprowadzających opóźnienie czasowe, pozostaje możliwość umownej deklaracji większej ilości obiektów, przykładowo poprzez podzielenie przenośnika taśmowego na wyodrębnione

odcinki trasy. W sytuacji, gdy odcinki te są zróżnicowane z uwagi na kąt pochylenia lub stanowią punkty węzłowe w strukturze obiektów, jest to zarówno uzasadnione, jak i wymagane.



Rysunek 4.6. Ilustracja ruchu masy urobku w przestrzeni i czasie (opracowanie własne).

Zastosowane uproszczenie niesie ze sobą jednak pewne ograniczenia. Mianowicie, o ile w przypadku równań rozproszonych znany jest stan poszczególnych ośrodków (lokalizacji) w dowolnym okresie czasu, a obliczenie stanu w kolejnym kroku bazuje wyłącznie na stanie obecnym, o tyle w przypadku istnienia opóźnień transportowych i uzgodnionego pominięcia położenia masy jako zmiennej stanu, konieczne jest wprowadzenie równań z opóźnieniem. Oznacza to w konsekwencji realizację algorytmu symulacyjnego w drodze zaimplementowania pamięci obiektu w postaci przesuwanej lub indeksowanej listy pełniącej rolę bufora.

Do zalet tej metody zaliczyć należy przede wszystkim obecność prostych przekształceń matematycznych, co znacząco zwiększa wydajność symulacji i zmniejsza jej zapotrzebowanie na pamięć. Do jej podstawowych wad można zaliczyć:

- brak odwzorowania pozycji urobku w funkcji czasu,
- skomplikowanie przeliczeń realizowanych w trakcie zmian prędkości ruchu skutkujące powrotem do modelu z zmiennymi cząstkowymi i rekonfiguracją w celu utrzymania dokładności obliczeniowej,

- problem z zachowaniem bilansu masy,
- problem dokładności wynikający z skończonego kroku czasowego i wartości opóźnienia stanowiącego jej krotność,
- problemy z odwzorowaniem ruchu obiektów transportowych samojezdnych,
- problem odwzorowania obiektów cyklicznych, których działalnie opisują głównie warunki logiczne.

Stosunkowo proste przekształcenia realizowane w pętli modelu symulacyjnego uwzględniającego model o zmiennych skupionych w przypadku częstych zmian prędkości ruchu obiektów i długich odcinków tras (długich opóźnień czasowych) wymagają przekształceń, których czasochłonność ogranicza znacząco efektywność tego rodzaju symulacji. Tymczasem wprowadzenie zbytnich uproszczeń w tym zakresie skutkować może przekłamaniem chwilowego przepływu urobku lub bilansu masy.

4.3.3. Numeryczne sposoby rozwiązywania równań różniczkowych

Ogólny podział metod numerycznych rozwiązań równań różniczkowych zwyczajnych obejmuje m.in. (Marcinkowski 2011):

- metody jednokrokowe, w tym metodę Eulera,
- metody wielokrokowe,
- metody ekstrapolacyjne,
- metody predyktora i korektora.

W przypadku równań różniczkowych cząstkowych szerokie zastosowanie znajduje m.in. metoda linii charakterystycznych, która poprzez dyskretyzację przestrzeni, pozwala zredukować równanie do układu równań o zmiennych skupionych. Z perspektywy dalszej realizacji pracy największe znaczenie posiada metoda Eulera i jej udoskonalone odmiany. Metoda ta jest jedną z najprostszych metod numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych. Przybliżając pochodną poprzez iloraz różnicowy dla parametru $h > 0$, otrzymujemy równanie 4.10.

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t+h) - x(t)}{h} \quad 4.10$$

Równanie 4.10 po przekształceniu można zapisać w formie równania 4.11, otrzymując tym samym otwarty schemat Eulera.

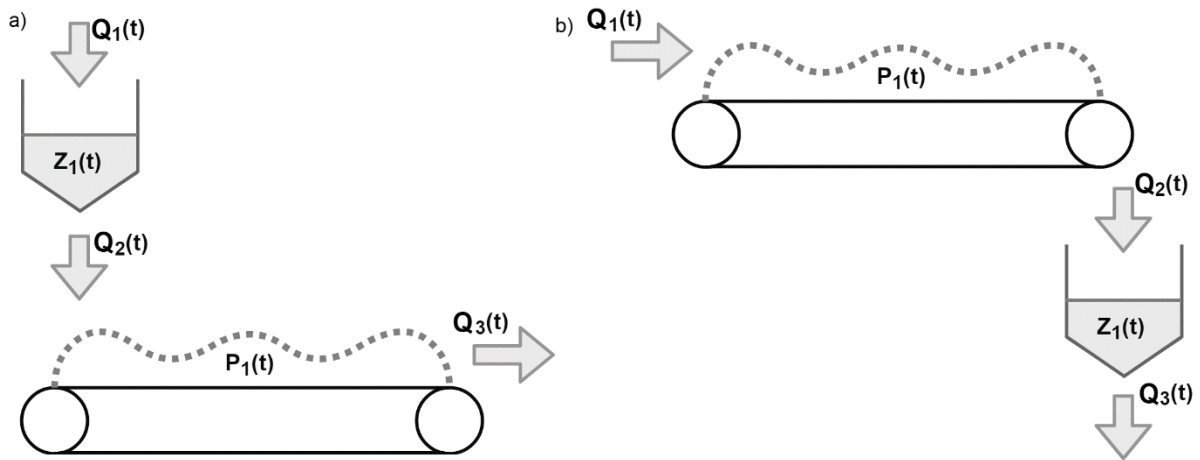
$$x(t+h) \approx x(t) + h \frac{dx(t)}{dt} \quad 4.11$$

Zgodnie z założeniem metody wartość funkcji w kolejnym punkcie czasu oszacować można zgodnie ze równaniami 4.12 i 4.13.

$$x(t+h) \approx x(t) + hf(t, x(t)) \quad 4.12$$

$$x_{n+1} = x_n + hf(t_n, x_n) \quad 4.13$$

W dalszej części rozdziału zamieszczono przykład rozwiązania prostego układu transportowego zilustrowanego na rysunku 4.7b. Układ ten składa się z przenośnika P1 transportującego materiał do zbiornika Z.



Rysunek 4.7. Przykłady prostego układu transportowego (opracowanie własne)

Funkcja $P(t)$ opisuje masę urobku zgromadzoną na taśmie przenośnika P1, funkcja $Z(t)$ masę urobku zgromadzoną w obrębie zbiornika Z_1 . Przepływy w poszczególnych punktach opisane zostały funkcjami $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$. W dalszej kolejności zamieszczono kod skryptu napisanego w środowisku Matlab pozwalający na rozwiązanie układu przy znanej wydajności załadunkowej $Q_1(t)$. W obliczeniach przyjęto krok czasowy wynoszący 1 s.

```
% Definicja przestrzeni czasu i kroku          % Zmienne stanu - Przenośnik P1
obl.                                           pwe=linspace(0,0,len);
dt=1;                                         pwy=linspace(0,0,len);
ts=100;                                       pc=linspace(0,0,len);
tk=1000;                                       ptau=10;
t=1:dt:tk;
len=tk/dt;
% Definicja wydajności wejściowej Q1         % Zmienne stanu - Zbiornik Z1
we=linspace(0,0,len);                         zwe=linspace(0,0,len);
we(1:500)=(randn(1,500)+5)*100;                zwy=linspace(0,0,len);
                                                zc=linspace(0,0,len);
```

Nieodzowną część obliczeń stanowi inicjacja przestrzeni zmiennych opisujących czas lub wyznaczających przestrzeń stanów obiektów w funkcji stałego kroku obliczeniowego. Dla uproszczenia przyjęto, że czas transportu urobku na przenośniku wynosi zaledwie 10 s. Przepływ na wyjściu ze zbiornika, opisano natomiast funkcją odwzorowującą (w znacznym uproszczeniu) skok jednostkowy.

$$s(x) = \frac{|x-1|}{x-1} \quad 4.14$$

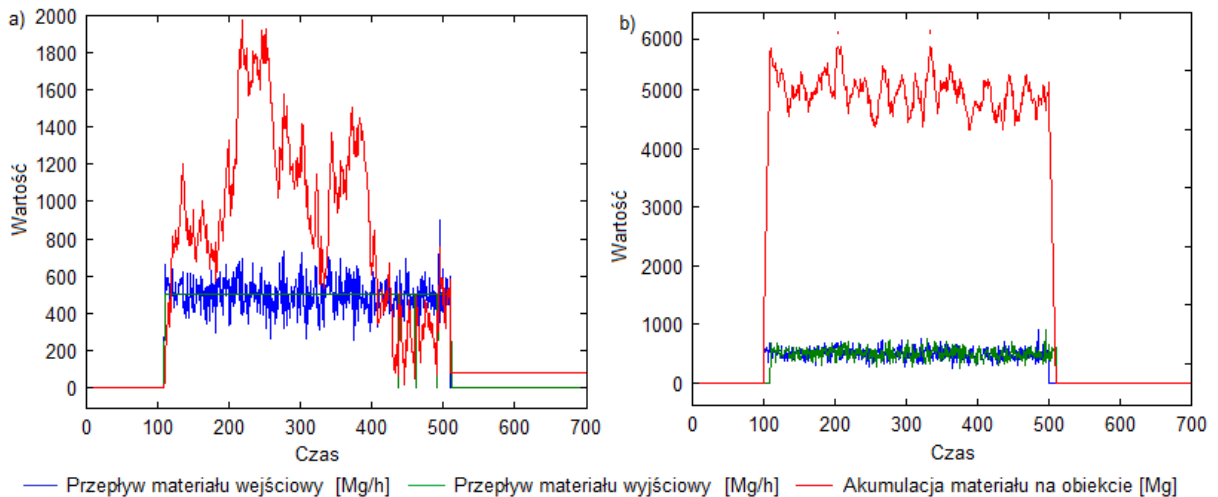
Wprowadzenie równania 4.14, wynika z faktu, że wydajność wyjściowa zbiornika winna uwzględniać zarówno stan napełnienia zbiornika, jak i maksymalny poziom wypływu strumienia masy. Zatem poza spełnieniem warunku logicznego obecności wystarczającej ilości materiału w zbiorniku, wydajność ta przyjmować powinna poziom względnie stały. Relacja ta może zostać określona dyskretnie za pomocą warunku logicznego lub analitycznie w postaci równania 4.4 lub bardziej skomplikowanych równań uwzględniających siły działające na spiętrzony urobek.

```

% Pętla obliczeń
for i=ts:len
% Przenośnik P1
pwe(i)=we(i);
pwy(i)=pwe(i-(ptau/dt));
pc(i)=pc(i-1)+pwe(i)*dt-pwy(i)*dt;
% Zbiornik Z1
zwe(i)=pwy(i);
zc(i)=zc(i-1)+pwy(i)*dt;
% Funkcja dyskretna przepływu na wyjściu ze
zbiornika
zwy(i)=(abs(zc(i)-500)/(zc(i)-
500+0.00001)+1)/2*5*100;
zc(i)=zc(i)-zwy(i)*dt;
end
%Wizualizacja
figure(1)
plot(pwe)
hold on
plot(pwy)
hold on
plot(pc)
figure(2)
plot(zwe)
hold on
plot(zwy)
hold on
plot(zc)

```

Wyniki obliczeń zilustrowano na wykresie 4.8a przedstawiającym zapis wartości dla zbiornika urobku oraz 4.8b, przedstawiającym zapis wartości dla przenośnika.



Rysunek 4.8. Masa zgromadzona na obiekcie oraz przepływ chwilowy. a) Zbiornik urobku Z1. b) Przenośnik P1 (opracowanie własne).

Podobnie jak w przedstawionym przykładzie, realizacja obliczeń może zostać przeprowadzona również w drodze wykorzystania dedykowanych narzędzi tzw. solverów przeznaczonych do numerycznego rozwiązania modeli dynamicznych o zmiennych skupionych lub rozproszonych, takich jak między innymi pakiet deSolve dostępny w środowisku R. Aby zweryfikować taką możliwość, w środowisku R zamodelowany został układ o odwrotnej kolejności elementów względem poprzedniego przykładu (rys. 4.8a). Przeprowadzenie obliczeń, podobnie jak we wcześniejszym przykładzie, wymaga inicjacji przestrzeni zmiennych stanu.

```
# Funkcja skoku jednostkowego
x=seq(from = -5, to = 5, by = 0.01)
Skok=(abs(x-1)/((x-1)+1)/2
plot(Skok~x,type="l")

# Konfiguracja danych wejściowych
c_output=data.frame(t=seq(from = 0, to = 50, by = 1),flow_out=0)
c_output[c(10:40),"flow_out"]=abs(rnorm(31, 0.5, .05))
c_output[c(41:51),"flow_out"]=abs(rnorm(11, 1, 0.05))
output <- approxfun(c_output)
c_input=data.frame(t=seq(from = 0, to = 50, by = 1),flow_in=0)
c_input[c(30:51),"flow_in"]=abs(rnorm(22, 1.5, 0.2))
input <- approxfun(c_input)
Z1_ini=5
P1_ini=0
P1_lag=7
```

Przeprowadzenie obliczeń w tym przypadku następuje poprzez zdefiniowanie funkcji opisujących zachowanie poszczególnych obiektów – zbiornika i przenośnika. Następnie rozwiązanie przeprowadzono kolejno dla zbiornika oraz przenośnika. Po rozwiązaniu przeprowadzonym dla obiektu znajdującego pierwsze miejsce w ciągu transportowym, następuje przekierowanie transportowanego materiału i realizacja obliczeń dla w obrębie drugiego obiektu. Ten rodzaj podejścia do obliczeń znalazł szerokie zastosowanie w pracy w tzw. rekurencyjnym modelu symulacyjnym oddzielającym zasadniczo poziom makrosymulacji od mikrosymulacji.

```
#Rozwiązanie - zbiornik
bunker <- function(t, y, parms) {
  u=(abs(y-1)/((y-1)+1)/2
  flow_out=u*output(t)
  flow_in=input(t)
  y=(flow_in-flow_out)
  list(y,flow_out,flow_in) }

times <- seq(from = 0, to = 50, by =
0.01)
out <- ode(func = bunker, parms = NULL,
y = Z1_ini,times = times,method="euler")

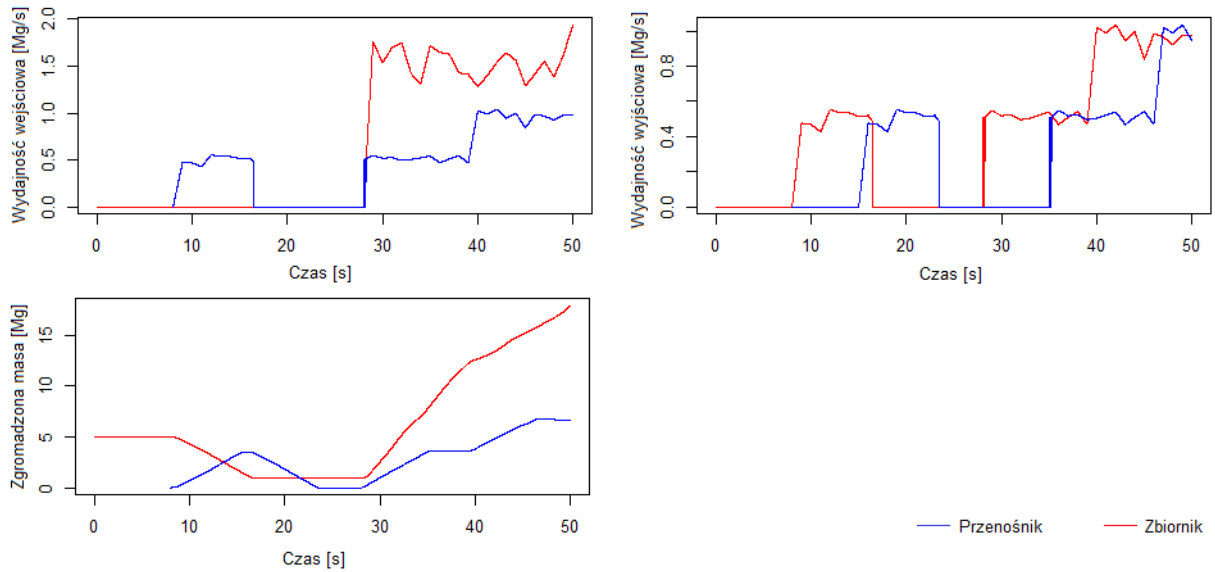
#Przekierowanie materiału ze zbiornika
na przenośnik
q2=data.frame(day=out[,1],irrad=out[,3])
input <- approxfun(q2)

#Rozwiązanie - przenośnik
conv <- function(t, y, parms) {
  flow_in=input(t)
  flow_out=input(t-P1_lag)
  y=(flow_in-flow_out)
  list(y,flow_out,flow_in)
}

times <- seq(from = 8, to = 50, by =
0.01)
out2 <- ode(y = P1_ini, times = times,
func = conv, parms = NULL)

#Wizualizacja wyników
plot(out,out2, type = "l",main=c("Masa
[Mg]", "Wyjście [Mg/s]", "Wejście
[Mg/s]"),col=c("red","blue"),lty=1)
```

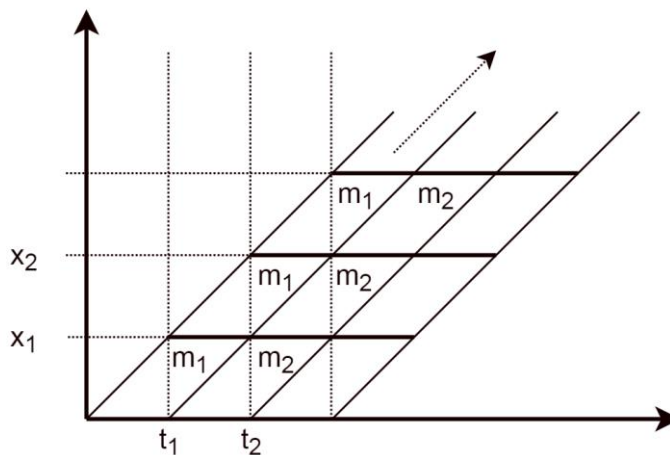
Wyniki działania skryptu zostały zilustrowane na rysunku 4.9. W celu zróżnicowania przebiegu wydajności w przykładzie wprowadzono zróżnicowaną funkcję wydajności wyjściowej ze zbiornika. W początkowej części symulacji następowało stopniowe opróżnianie zawartości zbiornika, następnie od 28 s symulacji na wejście zbiornika podano materiał, w trakcie przyrostu masy w 40 s symulacji skokowo zwiększono wydajność wyjściową ze zbiornika. Eksperyment pozwolił stwierdzić, że dla elementu wprowadzającego wyłącznie przesunięcie czasowe, uzasadniona wydaje się algorytmizacja obliczeń w z wykorzystaniem indeksowanej listy wartości.



Rysunek 4.9. Wyniki symulacji z zastosowaniem pakietu *deSolve* (opracowanie własne).

4.3.4. Praktyczna implementacja rozwiązań – podstawowe kwestie problematyczne

Wcześniejsze przykłady pozwalają zauważyć, że, dobierając na podstawie krokowego przyrostu czasu przedziały położenia w przestrzeni, realizacja symulacji opisanej uproszczonym równaniem ruchu, przy stałej prędkości, sprowadza się do przesuwania listy wartości opisujących jednostkowej gęstości nasypową urobku zgromadzonego na poszczególnych odcinkach drogi (rys. 4.10). Tego rodzaju opis może być właściwy przede wszystkim względem przenośników taśmowych lub w pewnym uproszczeniu względem kolei kopalnianej, zakładając skończoną pojemność torów kolejowych, mijanek i stacji przeładunkowych. Zastosowanie języków programistycznych pozwala na szeroką implementację tego algorytmu poprzez dynamiczny zakres indeksowania lub operacje na macierzach, tabelach lub listach.



Rysunek 4.10. Ilustracja odwzorowania ruchu na podstawie równań ciągłych stanu w modelu z stałym krokiem czasowym (opracowanie własne).

Implementując obliczenia z zastosowaniem przyjętego uproszczenia, dla dyskretnych przestrzeni opóźnienia czasowego w każdym kroku obliczeń całkowane być mogą chwilowe wartości przepływu

na wejściu obiektu. Droga transportowa obiektu podzielona zaś zostaje na skończoną ilość odcinków, wynikającą z długości kroku czasowego. Realizacja tych działań, obejmuje więc umowną dyskretyzację przestrzeni w funkcji kroku czasowego (rysunek 4.4). Zabieg ten pozwala na zmniejszenie ilości obliczeń oraz zwiększenie ich dokładności poprzez uproszczenie przekształceń. Aby zminimalizować obliczenia, ilość przedziałów odległości musi jednak zostać zaokrąglona zgodnie ze równaniem 4.15, co ma bezpośredni wpływ na błąd obliczeniowy wynikający z zawyżenia lub zaniżenia czasu transportu urobku w zależności od sposobu zaokrąglenia wartości.

$$x_m = \left\lfloor \frac{L}{V \cdot t_s} \right\rfloor \quad 4.15$$

gdzie:

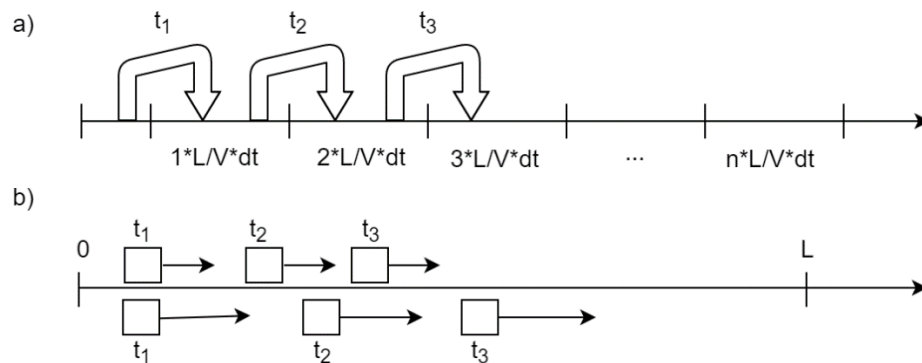
- L* – długość trasy transportowej,
- V* – prędkość ruchu masy,
- t_s* – krok czasowy symulacji.

Jak już wcześniej zauważono, tego typu rozwiązanie powoduje jednak problemy w warunkach znaczących zmian prędkości ruchu zgromadzonych mas lub w konieczności zastosowania względnie długiego kroku czasowego. Zastosowania takiego kroku czasowego, w sytuacji wyodrębnienia skończonej liczby komórek pamięci odwzorowujących przedziały opóźnienia w czasie, prowadzi w konsekwencji do zastąpienia rzeczywistego czasu transportu wartością wynikającą ze skończonej liczebności zdefiniowanych przedziałów. W przypadku zmiany prędkości ruchu liniowego zgromadzonych mas zachodzi natomiast konieczność określenia nowego, właściwego opóźnienia czasowego, sposobu podziału przestrzeni i redystrybucji opisanej starym sposobem masy jednostkowej. Zwiększenie prędkości liniowej taśmy przenośnika wiąże się zarówno z zmniejszeniem opóźnienia czasowego obiektu, jak i zwiększeniem chwilowej wydajności wyjściowej w stosunku do wartości podczas załadunku na nieckę taśmy. W praktyce oznacza to potrzebę translacji na model ze zmiennymi cząstkowymi, co znacząco komplikuje obliczenia. Przekształcenia długości listy przechowującej wartości masowe oraz ich redystrybucja, wykonywana częstokroć w pętli obliczeniowej, może prowadzić w efekcie do utraty szczegółowości i dodatkowych czasochłonnych przeliczeń. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie opóźnienia, jako podstawowego kryterium podziałowego mas zgromadzonych w funkcji przestrzeni, oznacza że dla kroku symulacji wynoszącego 1 s, masa zgromadzona na 3,15-metrowym odcinku taśmy przenośnika poruszającego się z prędkością 3,15 m/s zostanie przypisana 5-metrowemu odcinkowi taśmy przenośnika o prędkości ruchu równej 5 m/s, co dodatkowo komplikuje jednolitą interpretację i wizualizację wyników w przestrzeni.

Pewną niedogodność w implementacji opisanych metod stanowi odwzorowanie obiektów o pracy nieciągłej, cyklicznej, takich jak skip, kolej kopalniana, wóz odstawczy. Model obiektu w tym przypadku może zostać sformułowany jako splot dwóch funkcji, w rezultacie wykonania których następuje przerwa w pracy obiektu. Iloczyn wydajności załadunkowej i czasu trwania cyklu załadunkowego może stanowić główny determinant ilości masy możliwej do przetransportowania w pojedynczym cyklu. Rozpatrując kwestie sterowalności procesem transportowym, można zauważyć, że opisane odwzorowanie pracy maszyn cyklicznych może jednak nie być wystarczające. Tym niemniej podobny mechanizm można wykorzystać do uruchamiania i wyłączania maszyn zgodnie z harmonogramem ich pracy. Należy jednak pamiętać o tym, że aby bilans masy został zachowany, obiekty te muszą pełnić rolę akumulacyjną, a funkcja załadunku z miejsc nadawy powinna uwzględniać harmonogram pracy systemu transportowego, nie podając urobku w okresie przerw w pracy. W warunkach rzeczywistych modelowany proces transportowy nie stanowi następstwa wyłącznie

warunków początkowych. W poszczególnych okresach czasu decydującą rolę odgrywają również zmienne zewnętrzne. Określają one wydajność nadawy urobku bądź też działanie układów podlegających regulacji m.in. kłap zbiornika lub prędkości poruszania się pojazdu (czas wykonania kursu z urobkiem). Co więcej, co najmniej część tych zmiennych może być częściowo lub całkowicie zależna od stanu procesu w innej lokalizacji funkcjonalnej układu. Dotyczy to przykładowo wymijania się maszyn samojezdnych obejmującego oczekiwanie wozu jadącego w kierunku przodka. Powyższe argumenty przemawiają za realizacją obliczeń dla całego systemu składającego się ze zbioru wyodrębnionych obiektów funkcjonalnych a nie rozwiązania układu równań dla kolejnych, wybranych segmentów dróg transportowych.

Oprócz kwestii związanych ze zmianami prędkości ruchu opisane metody symulacji posiadają również inne, negatywne właściwości. Zastosowany sposób opisu nie pozwala między innymi na równoczesną symulację w przestrzeni mas urobku znajdujących się na tożsamym obiekcie lub lokalizacji a różniących się względem siebie prędkościami ruchu. Zamodelowanie tego zjawiska wymaga zastosowania odmiennego podejścia obejmującego linearyzację przestrzeni na poziomie obiektu jednowymiarową przestrzenią x i realizacją symulacji na bazie systemu mas dyskretnych, których ruch może być traktowany indywidualnie (rys. 4.11). Częściowe rozwiązanie tego problemu wydaje się zduplikowanie obiektów funkcjonalnych celem zdefiniowania równoległych ścieżek ruchu o różnych prędkościach. Przykład taki był opisywany wcześniej, jako propozycja przestrzennego odwzorowania procesu przemieszczania urobku w zbiorniku retencyjnym.



Rysunek 4.11. Porównanie działania algorytmu z masą ciągłą oraz masami dyskretnymi (opracowanie własne).

Należy zauważyć, że w przypadku długiego kroku czasowego lub obiektów wprowadzające znikome opóźnienie czasowe (jak przykładowo pusty zbiornik lub krótki przenośnik taśmowy), istotną kwestię stanowi zachowanie kolejności wykonywania obliczeń na obiektach. Urobek może w jednym kroku obliczeniowym przemieścić się dalej niż wynikałoby z położenia kolejnego obiektu w strukturze funkcjonalnej. Celowe w takim przypadku jest zachowanie kolejności obliczeń na obiektach zgodnie ze zwrotem grafu skierowanego, jak również właściwy dobór kroku czasowego. W takiej sytuacji blokowanie ruchu lub zawracanie urobku jest także problematyczne i wymaga wykonania dodatkowych obliczeń iteracyjnych.

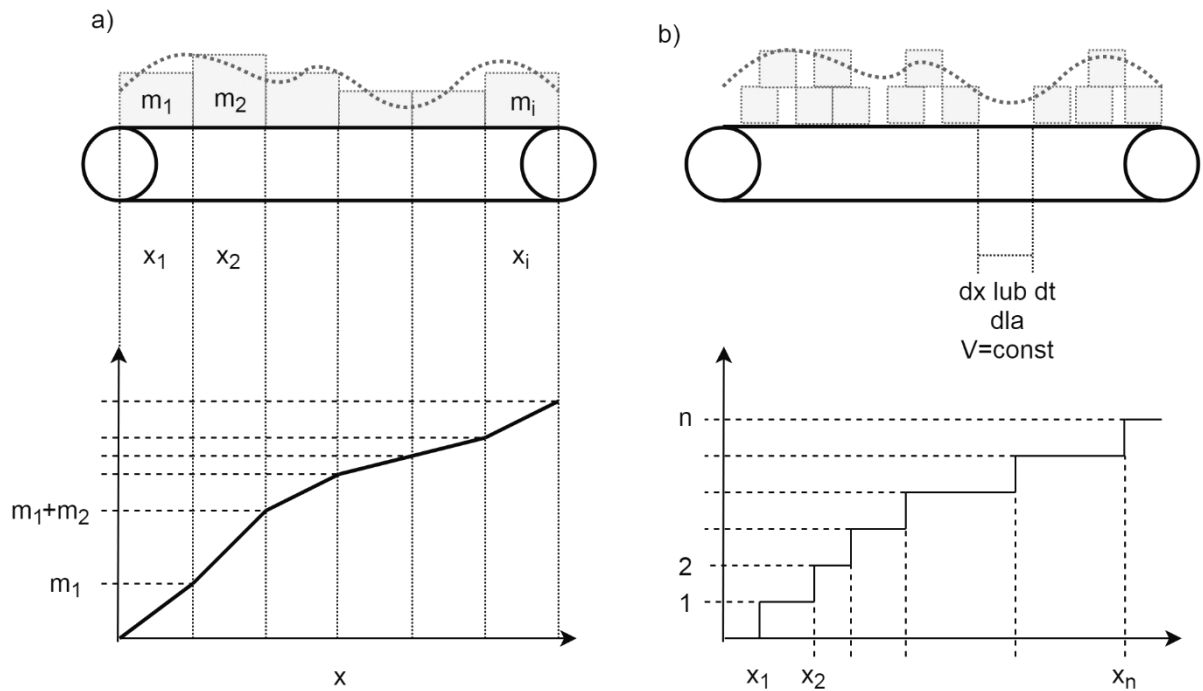
Uwzględnienie parametrów geologicznych obejmujących głównie parametry jakościowe urobku stanowi kolejną komplikację opisanego modelu. Wymaga ono programowego odseparowania dwóch lub większej ilości strug urobku lub też wprowadzenia parametrów jakościowych, jako dodatkowej przestrzeni uwzględnionej w zmiennych modelu, co wpływa negatywnie na efektywność przeliczeń.

W celach optymalizacyjnych przy eksperymentowaniu na modelach z masą ciągłą spostrzeżono, że zapis przepływu powinien być niekoniernie prowadzony dla każdego obiektu osobno. Z uwagi na powtarzające się wartości w obrębie gałęzi dróg transportowych można alternatywnie określić położenia punktowe wejść i wyjść z obiektu, jako indeksy naniesione na skumulowaną w czasie funkcję przepływu masy (nadawy). W przypadku łączenia się strug urobku zabieg ten można prowadzić równolegle. Takie rozwiązanie koncentruje uwagę na masie urobku i znacząco ułatwia utrzymanie bilansu masy. Jak stwierdzono w trakcie rozbudowy tego rodzaju modelu, podejście takie prowadzi w rezultacie do symulacji z użyciem skumulowanych wykresów przepływu, które w dalszej kolejności uzasadniają użycie tzw. mas skupionych, co pozwala w praktyce ograniczyć znacząco liczbę obliczeń. Szczególnie dotyczy to sytuacji z dużym udziałem czasu o znikomo małych ilościach transportowanego urobku. Podejście to zostało szerzej opisane w następnym rozdziale.

4.4. Modele z masą dyskretną

Zastosowanie modeli z masą dyskretną (skupioną) w wielu aspektach upraszcza realizację obliczeń, umożliwiając tym samym uzyskanie wyników o zdecydowanie większej precyzji i pewności w krótszym czasie. Wyszczególnienie mas dyskretnych dostarcza dodatkowo możliwość śledzenia poszczególnych porcji, traktowanych jako obiekt o określonych swoistych cechach. Ruchowi porcji urobku w przestrzeni towarzyszyć mogą zdarzenia związane z opuszczeniem określonych lokalizacji funkcjonalnych, w tym instrukcje warunkowe, co ma zasadnicze znaczenie w aspekcie użyteczności symulacji. Wyszczególnienie mas dyskretnych pozwala również w prosty sposób zachować bilans masowy, zawężając procedurę do kontroli położenia początkowego i końcowego elementów masowych. Użycie tych mas wymaga jednak zupełnej zmiany podejścia chociażby w zakresie analizy danych. Rozkłady wartości poddawanych analizie m.in. wydajności chwilowych są na ogół mniej zróżnicowane. Pojawia się też ryzyko nadinterpretowania wyników symulacji – przykładowo bliskie sąsiedztwo mas skupionych na wyjściu z przenośnika powodować może w zależności od przyjętej metody przetwarzania danych wyjściowych nagłe zwiększenie, a później zmniejszenie obliczonej wydajności przepływu masy. Zastosowanie skończonej ilości elementów, choć potencjalnie korzystne, wiąże się więc z pewnymi niedogodnościami natury obliczeniowej.

Szczególnie niekorzystną sytuacją jest rozdzielanie strugi urobku. Wydzielenie mas jednostkowych zasadniczo nie uniemożliwia tego działania, ale znacznie utrudnia podział urobku na większą ilość elementów. Wiąże się to z wprowadzeniem dodatkowej cechy ilościowej, która musi być uwzględniana przy obliczeniach w celu zachowania bilansu masy, co komplikuje działanie modelu symulacyjnego. Stosując uproszczone podejście, w warunkach gdy jednostkowa masa jest dostatecznie mała, możliwe jest utrzymanie zadanej proporcji podziału poprzez ilość dyskretnych mas przekazanych w różne kierunki.

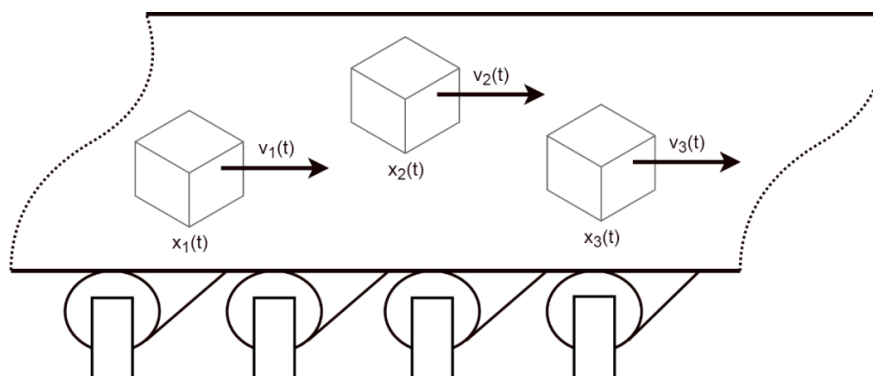


Rysunek 4.12. Ilustracja modelu a) z masą ciągłą, b) masami dyskretnymi (opracowanie własne).

Na rysunku 4.12 zilustrowano interpretację zamiennych podejść w kwestii zapisu i symulacji strugi urobku, za pośrednictwem dyskretyzacji przestrzeni lub z zastosowaniem mas jednostkowych. Należy zauważyć, że zdefiniowanie obiektów dynamicznych (ang. entities), tj. mas jednostkowych, które przemieszczają się przez modelowany system stanowi warunek konieczny zastosowania dyskretnych modeli symulacyjnych. Podstawowe różnice dotyczą natomiast odwzorowania upływu czasu w formie stałego kroku czasowego lub dziennika zdarzeń.

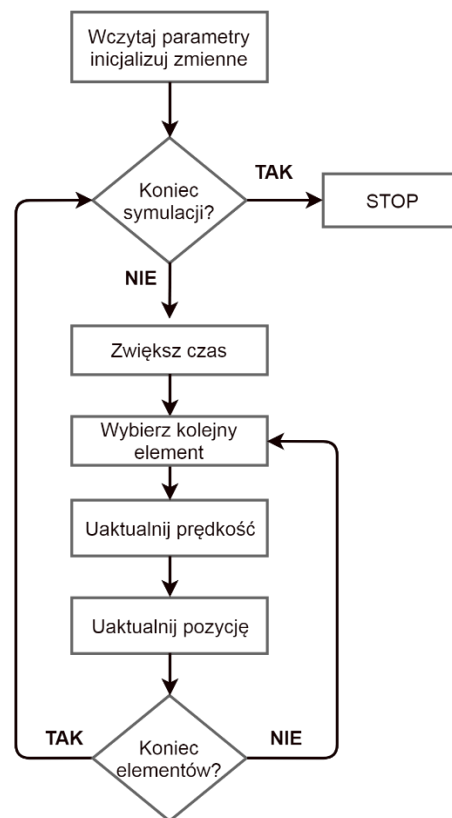
4.4.1. Model z czasem ciągłym

Rozpatrując ruch jednostkowej masy w układzie transportowym kopalni na poziomie wyodrębnionej lokalizacji funkcjonalnej, takiej jak m.in.: przenośnik, górniczy wyciąg szybowy, przestrzenne zmiany jego trajektorii w czasie, można opisać go funkcją ciągłą (rys. 4.13).



Rysunek 4.13. Ilustracja założeń modelu z masami dyskretnymi i ruchem ciągłym (opracowanie własne).

Zastosowanie opisanego podejścia umożliwia dodatkowo odzwierciedlenie sił i interakcji zachodzących pomiędzy wyodrębnionymi jednostkami, co szczególnie zastosowanie znajduje przy uwzględnieniu sił grawitacyjnych w ruchu pionowym m.in. w zbiornikach lub na przesypach. Prowadzi to w konsekwencji to podstawowych założeń metody symulacyjnej DEM, która w górnictwie szczególnie zastosowanie znajduje w obszarze symulacji ruchu materiałów w obrębie maszyn wydobywczych i transportowych oraz w zakresie mechaniki górotworu. Najbardziej ogólny algorytm symulacji metodą elementów dyskretnych ze stałym krokiem czasowym, umożliwiający odwzorowanie ruchu masy urobku, został zilustrowany na rysunku 4.14.



Rysunek 4.14. Uproszczony algorytm symulacji z ruchem ciągłym mas dyskretnych (opracowanie własne).

W ramach wstępnych prac nad modelem symulacyjnym opracowano algorytm operujący na tablicy z zapisem wszystkich mas dyskretnych obecnych w systemie. Cykl obliczeniowy realizowany w poszczególnych krokach czasowych obejmował dodanie do kolumny przechowującej aktualną pozycję osobnej kolumny z przechowywaną wartością wynikającą z prędkości liniowej obiektu macierzystego. Dla uproszczenia obliczeń wartość ta była zdefiniowana w postaci zunifikowanej w zakresie 0–1, gdzie „0” oznacza początek, a „1” koniec przestrzeni przypisanej umownie do obiektu macierzystego. Tym samym realizacja obliczeń w poszczególnych krokach w rachunku macierzowym potrzebowała wyłącznie dodania dwóch wektorów. Obiekty, których wartość pozycji była większa niż 1 wymagały zmiany położenia na obiekcie macierzystym w obrębie danego cyklu obliczeniowego, zgodnie ze strukturą relacyjną obiektów i ewentualnymi instrukcjami warunkowymi. Opisany, uproszczony algorytm dodatkowo umożliwiał realizację funkcji pozwalających w prosty sposób zmienić prędkość ruchu indywidualnych mas dyskretnych lub uwzględnić ich wzajemne oddziaływanie na podstawie pozycji i prędkości. W przypadku braku różnic w prędkości mas urobku na poziomie obiektu macierzystego optymalizację prędkości wykonywania kodu można było uzyskać poprzez wstępne sortowanie obiektów, co pozwalało łatwo zidentyfikować zbiór mas wymagających zmiany obiektu macierzystego. Dodatkowo proces aktualizacji pozycji mógł obejmować wyłącznie najstarszy element,

adresując pozycje kolejno według opóźnienia względem poprzedzającej masy. Tego rodzaju zabiegi optymalizacyjne zbliżyły końcowo formułę realizacji symulacji i postać kodu wynikowego do metody inicjowanej zdarzeniami, która została opisana w kolejnym rozdziale. W rezultacie dalsze zastosowanie metody z ustalonym krokiem czasowym powiązane zostało ze szczególnymi potrzebami odwzorowania obiektów funkcjonalnych.

4.4.2. Model inicjowany zdarzeniami

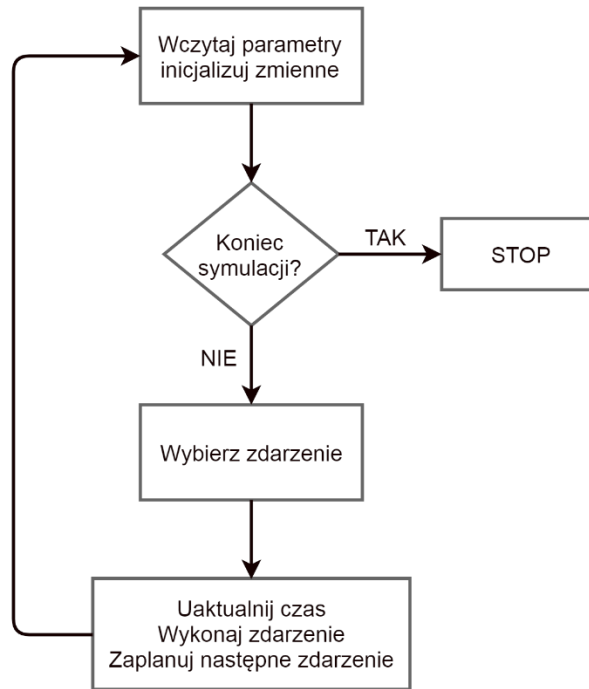
Podstawowe założenia i przykłady zastosowań metody symulacji inicjowanej zdarzeniami dyskretnymi DES zostały szczegółowo opisane w literaturze (Banks 2014; Semini, Fauske, i Strandhagen 2006; Robinson 2011; Chung 2004). Dyskretny model symulacyjny inicjowany zdarzeniami w najogólniejszym ujęciu bazuje na wyszczególnieniu trzech podstawowych komponentów:

- elementów dynamicznych (ang. *entities*),
- zasobów tworzących układ lokalizacji funkcjonalnych,
- procesów wzajemnych interakcji zasobów i elementów dynamicznych.

Analogicznie jak w innych podejściach, realizacja symulacji procesów dynamicznych wymaga odwzorowania upływu czasu. W tym celu wykorzystuje się zegar symulacji, którego uaktualnienie jest ściśle powiązane ze zdarzeniami. W przypadku symulacji dyskretniej od zdarzenia do zdarzenia krok czasowy stanowi odległość pomiędzy kolejnymi aktywnościami (tzw. metoda kolejnych zdarzeń), a zegar wymusza ich chronologiczne porządkowanie. Metoda kolejnych zdarzeń pozwala na nieuwzględnianie okresów braku aktywności systemu, co jest cechą niezmiernie ważną w aspekcie czasu realizacji badań symulacyjnych. Zdarzenia wyszczególnione w modelach opracowanych w pracy można podzielić na (Mielczarek 2009):

- bezwarunkowe (realizacja nie zależy od stanu systemu),
- warunkowe (realizacja zależy od stanu systemu – zawieszona),
- równoczesne (realizacja losowa lub sterowana priorytetem).

Informacje o wszystkich planowanych zdarzeniach przechowywane są w kalendarzu (dzienniku) zdarzeń. Stanowi on obiekt dynamiczny, który steruje upływem czasu w trakcie symulacji i przechowuje uaktualniane informacje o planowanych zdarzeniach.



Rysunek 4.15. Schemat logiczny procesu symulacji dyskretniej (Mielczarek 2009).

Istnieją również zróżnicowane techniki obsługi zdarzeń dyskretnych, tj.:

- metoda planowania zdarzeń,
- metoda przeglądu i wyboru działań,
- metoda interakcji procesów.

W niniejszej pracy szczególną uwagę poświęcono metodzie przeglądu i wyboru działań, którą można opisać następująco (Mielczarek 2009):

```

Dopóki nie nastąpi koniec symulacji wykonuj
Faza A: Pobierz kolejne zdarzenie z kalendarza. Uaktualnij czas
Faza B: Wykonaj wszystkie zdarzenia bezwarunkowe zaplanowane na ten moment
Faza C: Przeglądaj kolejno wszystkie zdarzenia warunkowe. Jeżeli spełnione są
warunki pozwalające na wykonanie jakiegoś, wykonaj to zdarzenie i powtórz fazę C
Koniec symulacji
  
```

Metoda symulacji zdarzeń dyskretnych jest szeroko stosowana oraz często wskazywana w literaturze jako odpowiednia do symulacji potoków ruchu charakterystycznych chociażby dla zakładów produkcyjnych, instytucji finansowych, przedsiębiorstw transportowych. Skutkiem tego znalazła ona szerokie zastosowanie w niniejszej pracy, stanowiąc podstawę sformułowania dwóch opracowanych modeli symulacyjnych, docelowo przeznaczonych do dalszej weryfikacji, które zostały opisane w kolejnym rozdziale.

5. Charakterystyka opracowanych modeli symulacyjnych

Modele symulacyjne opisane w dalszej części stanowią bezpośredni rezultat prac podjętych w poprzedzającym rozdziale. Wstępne testy różnych technik symulacyjnych uzasadniły rozwój dwóch zasadniczo różnych koncepcji rozwiązań modeli dyskretnych. Ich conceptualna budowa oraz implementacja techniczna wraz z właściwymi interfejsami wymiany danych oraz uogólnionym modelem punktów załadunkowych stanowią koncepcję rozwiązania docelowego i podstawowy wynik niniejszej pracy. Tym samym zostały one przewidziane wprost do realizacji wielokryterialnych analiz procesu transportu urobku. Ich opracowanie ma początek w zdefiniowaniu ogólnych wymagań, korespondujących ze scenariuszami użytkowymi przedstawionymi w dalszej części pracy, celem zapalenia luki funkcjonalnej, którą zidentyfikowano uprzednio w przeglądzie materiałów źródłowych (rozdział 2.3).

5.1. Ogólne wymagania

Kluczowe z uwagi na tematykę pracy wymagania dotyczące modeli symulacyjnych wynikają bezpośrednio z potrzeby porównywalności rozpatrywanych rozwiązań techniczno-organizacyjnych, jak i nieodzownego wsparcia poszukiwania właściwego rozwiązania z uwzględnieniem indywidualnego procesu projektowania lub grupowych technik heurystycznych. Modele symulacyjne powinny zatem odpowiadać za wsparcie całokształtu działań przetwarzania informacji prowadzących do opracowania i zaplanowania sposobu realizacji procesu transportu urobku w określonym horyzoncie czasowym, uwzględniając warunki niepewności. Podsumować to można w postaci listy nieodzownych wymagań względem opracowanych w pracy modeli symulacyjnych wykorzystywanych do wspomaganie procesu wyboru wariantu rozwiązania, z których należy uznać za wiodące:

- analizę porównawczą wariantów umożliwiającą wielokryterialne porównanie rozpatrywanych rozwiązań, w szczególności oszacowania skutków zmian w założeniach, warunkach i sposobie realizacji procesu transportu urobku,
- wsparcie twórczego procesu opracowywania i doskonalenia projektowanych rozwiązań.

Metody organizacji procesu projektowania, chociaż wybiegają znacząco poza tematykę niniejszej pracy, odgrywają zasadniczą rolę w procesie poszukiwania najlepszego rozwiązania. Jednocześnie zważając na istotne ograniczenia właściwe dla podziemnej działalności górniczej, warto mieć na uwadze, że zastosowanie modeli symulacyjnych w praktyce będzie cechował brak gwarancji uzyskania najlepszego rozwiązania lub też niemożność jego praktycznej implementacji. W niniejszym przypadku oznacza to potrzebę ciągłej oceny dobroci cząstkowych rozwiązań oraz całości rozwiązania w procesie ciągłego doskonalenia procesu transportowego. Istotnego znaczenia nabiera wobec tego dostosowanie modeli do roli wsparcia procesów conceptualnych i heurystycznych, umożliwiających wykorzystanie doświadczeń w procesie zdobywania nowej wiedzy. Opracowane w przeszłości modele symulacyjne, mogą stanowić instrument możliwy do szerokiego wykorzystania na etapie opracowywania nowych rozwiązań.

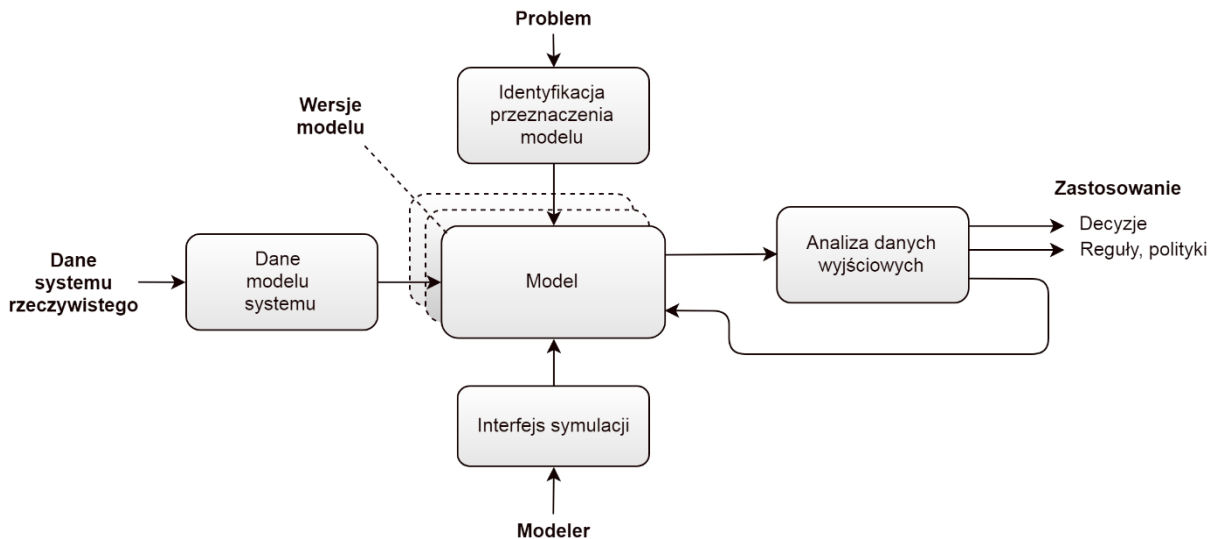
Wspieranie procesu twórczego wymaga istnienia wysokiej mocy eksplanacyjnej (wyjaśniającej) opracowanych modeli, a zatem koncentracji nie tylko na odwzorowaniu samego przebiegu procesu transportowego, lecz również umożliwieniu diagnostyki, rozumianej stricte jako ustalenie związków przyczynowo-skutkowych nieodzownych w dalszej optymalizacji rozwiązania. W pewnym sensie

przemawia to za zastosowaniem elementów mas dyskretnych, których indywidualne śledzenie pozwala poszerzyć dostępne zdolności diagnostyczne. Techniki te, jak wskazano we wcześniejszych rozdziałach, mogą wykorzystywać zapis przepływu mas jednostkowych (dyskretnych), co pozostaje nie bez znaczenia, chociażby z uwagi na ich wydajność obliczeniową, a zatem i użyteczność całego modelu. W aspekcie eksplanacyjnym modele symulacyjne powinny umożliwiać rozłożenia badanych struktur i procesów na tyle elementów składowych, na ile jest to dopuszczalne i konieczne w celu poznania związków przyczynowo-skutkowych oraz wpływu na poddane wielokryterialnej analizie właściwości całego rozwiązania. Wykorzystując system mas dyskretnych, cel ten staje się bardziej osiągalny oraz udostępnia to również dodatkowe możliwości w zakresie odwzorowania maszyn samojezdnych.

Wykorzystanie analizy wielokryterialnej z oczywistych względów dotyczy stanu procesu i warunków, które są rozpatrywane w bliższej lub dalszej przyszłości bądź też trwają obecnie i będą trwać przez pewien czas. Ponieważ rozpatrywane rozwiązania opisane są w prognozach obejmujących diagnozy określające możliwy stan procesu w przyszłości i warunki jego efektywnej realizacji, bardzo istotną cechą jest tzw. moc prognostyczna użytych modeli, w rozumieniu właściwego odwzorowania stanów przyszłych na podstawie przyjętych założeń. Tym samym do podstawowych wymagań technicznych pomijając kwestie związane z samą wydajnością obliczeniową i czasem realizacji badań, można zaliczyć:

- zdolność identyfikacji stanu procesu transportowego w przestrzeni,
- zdolność identyfikacji stanu procesu transportowego w czasie,
- utrzymanie wysokiej precyzji czasowej i masowej (wysoki stopień ścisłości i dokładności),
- pewność i czytelność logiczna,
- skalowalność umożliwiającą zastosowanie różnych poziomów abstrakcji i poziomów implementacji modelu symulacyjnego,
- elastyczność umożliwiającą dopasowanie do zróżnicowanych wymagań funkcjonalnych,
- zorientowane obiektowo odwzorowanie rzeczywistych struktur i ruchomych środków transportowych,
- wysoką informacyjną wartość wyników, zachowanie relacyjności danych wyjściowych,
- wykorzystanie formalnego modelu badanych struktur i procesów transportowych,
- wykorzystanie dostępnych danych empirycznych,
- implementację zmiennych decyzyjnych,
- zdolność samooceny i samokontroli procesu,
- możliwość dekompozycji i modyfikacji struktur logicznych oraz przestrzennych,
- odwzorowanie procesów losowych o różnym charakterze,
- weryfikację, dostrojenia i potwierdzenie pewności epistemologicznej.

Poza przeznaczeniem modeli i rodzajem danych wyjściowych sformułowane wobec nich wymagania powinny obejmować również względy techniczne takie jak sposób wymiany danych z otoczeniem (rys. 5.1).



Rysunek 5.1. Elementy modelu symulacyjnego (Banks 2014).

Sprawną realizacją badań symulacyjnych, poza uprzednim wyborem środowiska programistycznego lub symulacyjnego, określeniem przeznaczenia i zakresu stosowalności poszczególnych modeli lub ich wersji rozwojowych wymaga m.in.:

- określenia dostępności oraz zapewnienia właściwego przygotowania danych wejściowych dla modelu symulacyjnego,
- opracowania odpowiedniego interfejsu pomiędzy użytkownikiem a środowiskiem symulacyjnym,
- opracowania właściwych metod przetwarzania, oceny, analizy i interpretacji danych wyjściowych.

Wytyczne odnośnie aspektów technicznych być może nie są najważniejsze, lecz warunkują praktyczne wykorzystanie efektów niniejszej pracy. Tym niemniej kluczowe wymagania względem modeli symulacyjnych opracowanych i wykorzystanych w pracy zależą m.in. od konkretnych zastosowań. Najogólniej, obejmują one:

- konieczność odwzorowania cech jakościowych urobku, w tym jego kwantyfikacja wraz z identyfikacją w systemie (m.in. śledzenie pochodzenia),
- jak największą szybkość realizacji symulacji (długi horyzont czasowy oraz wpływ zmiennych losowych),
- wysoką precyzję czasową i dokładność masową,
- możliwość zastosowania różnych poziomów szczegółowości i skali odwzorowania procesu transportowego,
- uwzględnienie zdarzeń dyskretnych m.in. przyjazdy, odjazdu, zatrzymania, awarie,
- potrzebę nadrzędnego sterowania procesem transportowym – dostępność informacji o przebiegu procesu i możliwość zdefiniowania reguł decyzyjnych,
- uwzględnienie niezawodności i dostępności obiektów (harmonogramy pracy),
- uwzględnienie procesów stochastycznych chronicznych i incydentalnych.

Kluczowe wymagania wobec modeli to również możliwość oszacowania konkretnych miar wyjściowych dla poszczególnych wariantów – odwzorowujących koszty inwestycyjne i operacyjne, ciągłość działania, efektywność energetyczną, możliwości technologiczne w zakresie sterowania i

dopasowania procesu transportowego do rzeczywistych potrzeb. Wymienione wymagania traktować należy jako kluczowe z perspektywy dalszych działań, mających na celu realizację zastosowań opisanych wraz z kryteriami analitycznymi w rozdziale 2.2. Warto podkreślić, że budowa modeli musi z natury rzeczy zostać dopasowana do charakteru procesu, który jest realizowany w kopalni podziemnej (rozdział 3.4). Na podstawie opisów przedstawionych w rozdziale 3 do zasadniczych cech tego środowiska, nader istotnych z perspektywy koncipowania i implementacji modeli symulacyjnych, zaliczyć można przede wszystkim:

- ograniczoną w przestrzeni i czasie strukturę wyrobisk (ograniczenia natury przestrzennej: wyrobiska istniejące, planowane i możliwe do wykonania),
- w większości liniowe trajektorie przemieszczania urobku,
- najczęściej występującą topologią grafu skierowanego – sieć wyrobisk transportowych stanowi przeważnie strukturę drzewiastą, a urobek nie jest zawracany,
- ograniczenia natury geologiczno-górnictwej, ekonomicznej, prawnej, technicznej, takie jak: potrzeby wentylacyjne, filary ochronne, optymalizacja rozcinki złoża, kolejność wykonania wyrobisk i ich dostępność w czasie, dostępność infrastruktury technicznej,
- wysoką zmienność procesu w czasie, ciągłą translokację układu transportowego,
- wymaganą ciągłość działania systemu,
- wysoką inercję wcześniejszych decyzji i działań skutkującą zawężeniem dalszych możliwości.

Uwzględnienie powyższych wymagań musi mieć odzwierciedlenie w funkcjonalności modeli symulacyjnych, toteż w pewnych przypadkach stanowi o możliwości optymalizacji techniki symulacyjnej, a w pewnych wymaga uwzględnienia w środowisku symulacyjnym dodatkowych czynników. W związku z powyższymi wymaganiami w dalszej części pracy wykorzystano wyłącznie dyskretne w czasie modele symulacyjne zakładające wyszczególnienie mas jednostkowych. Decyzja ta poprzedzona została sporą ilością prób przeprowadzonych z użyciem technik modelowania ruchu masy ciągłej. Otrzymane w ich wyniku rozwiązania obejmujące modele z masą odwzorowaną w sposób ciągły zyskały częściowe wykorzystanie w zakresie wizualizacji danych wyjściowych, jak również stanowiły alternatywną metodę obliczeniową dla wybranych urządzeń takich jak przenośniki taśmowe. Opracowane uprzednio modele ciągłe mogą być wykorzystane na etapie weryfikacji wyników lub użyte jako modele zastępcze względem systemu mas dyskretnych, w przypadku obiektów, których warunki pracy uzasadniają ich zastosowanie. Konwersja danych pomiędzy modelami o równaniach zwykłych lub cząstkowych a modelami z użyciem masy dyskretniej została przetestowana w pracy z użyciem tzw. liczników masy, które pozwoliły na konwersję zapisu pomiędzy symulacją ciągłą a dyskretną. Liczniki te stanowiły ciąg impulsów zapisanych w formie zdarzeń dyskretnych informujących o czasie przejścia kolejnej, jednostkowej masy urobku.

5.2. Elementy wspólne modeli

Opracowaniu docelowych modeli symulacyjnych towarzyszył szereg działań związanych bezpośrednio z ewidencją, przetwarzaniem i wizualizacją danych wejściowych i wyjściowych. Zagadnienia te tworzą osobny obszar powiązany bezpośrednio z środowiskiem symulacji, w niniejszej pracy stanowiący obszar wspólny dla obydwu opracowanych rozwiązań. W najprostszym ujęciu przyjęta zasada budowy modeli wykonanych w pracy obejmuje istnienie:

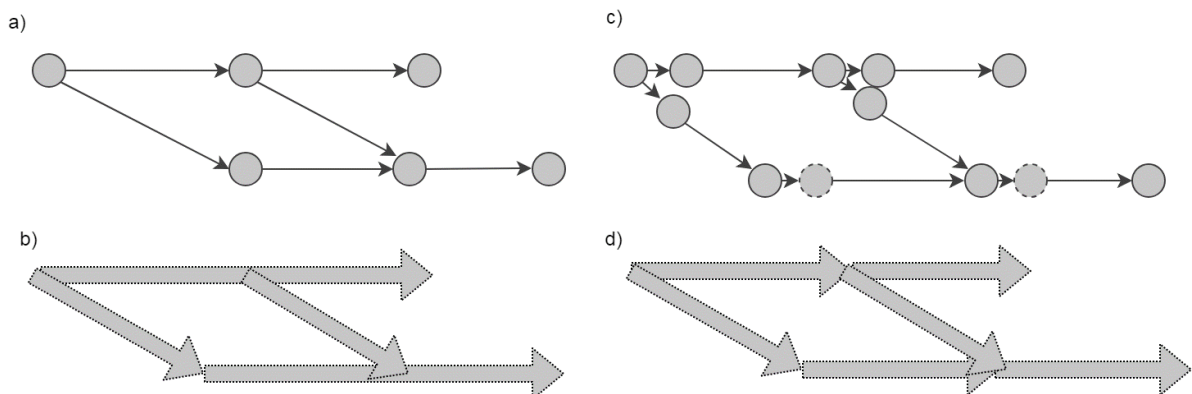
- lokalizacji funkcjonalnych,

- dyskretnych porcji urobku,
- połączeń pomiędzy lokalizacjami funkcjonalnymi,
- procesu transportowego realizowanego w obrębie i pomiędzy lokalizacjami.

Kwestie koncepcyjne i techniczne odwzorowania powyższych elementów, a także podejście do problematyki symulacji przestrzeni, prawdopodobieństwa oraz upływu czasu wyznaczają szereg problemów cząstkowych stanowiących wspólny obszar zastosowanych rozwiązań.

5.2.1. Struktura połączeń

Format odwzorowania wyodrębnionych obiektów i punktów przestrzennych, a w szczególności ich połączeń, tworzących nierzadko skomplikowane struktury tras transportowych, ma zasadniczy wpływ na własności modelu symulacyjnego. Jednym z przykładów podejścia do modelowania struktur podziemnych wyrobisk może być praca (Thomas i in. 2007). Uzasadnione do rozpatrzenia są tutaj co najmniej dwa podejścia, zakładające punktową lub liniową definicję obiektów. W przypadku, gdy obiekty zdefiniowane zostaną liniowo (rys. 5.2.d), przeniesienie dyskretnych mas urobku z obiektu na kolejne obiekty następuje na końcu, tj. po pokonaniu liniowej drogi. Obiekty liniowe posiadają określony punkt załadunku i rozładunku lub też punkty te mogą zostać zdefiniowane w sposób umowny na ich długości (rys. 5.2b). Doskonałym przykładem takiego rozwiązania jest odwzorowanie przenośnika taśmowego z więcej niż jednym punktem załadunkowym. Tego rodzaju opis wymaga specyficznej implementacji modelu symulacyjnego, należy jednak zauważyć, że przy odwzorowaniu ruchu urobku modelem ciągłym z użyciem równań różniczkowych cząstkowych lub zwyczajnych, rozwiązanie takie może być korzystne.



Rysunek 5.2. Sposoby odwzorowania struktur relacyjnych obiektów transportowych (opracowanie własne).

Należy przewidzieć, że każdy obiekt liniowy może składać się z fragmentów stanowiących umowne odcinki funkcjonalne wynikające z istnienia dodatkowego miejsca załadunku urobku, pochyłości trasy lub też innych wymagań, co do samej symulacji m.in. precyzyjnego obliczenia masy ładunku zgromadzonego na określonych odcinkach trasy transportowej. Sytuacja taka dotyczy również implementacji zmiennej prędkości ruchu urobku, przykładowo przy większej ilości wyodrębnionych odcinków sposób aktualizacji stanu obiektu może zostać znacząco uproszczony, jakkolwiek dotyczy to również innych zjawisk natury mechanicznej związanych m.in. ze stanami nieustalonymi.

W sytuacji, gdy obiekty zdefiniowane są punktowo (rys 5.2a orz 5.2c), przemieszczenie liniowe może nastąpić w wyniku zapisanej relacji – unikalnego połączenia zapisanego pomiędzy dwoma lub

więcej punktowymi obiektami. Ten rodzaj zapisu, zilustrowany na rysunku 5.2a, powoduje jednak pewne implikacje. Rozpatrując punktową reprezentację obiektów i podział strugi urobku, decyzja o kierunku ruchu powinna zostać podjęta na wcześniejszym etapie niż przypisanie do nowego obiektu. Konieczne jest uwzględnienie opóźnienia właściwego dla prędkości ruchu i odległości do punktu docelowego, po czym następuje dopiero osiągnięcie zadanego położenia i zmiana dekretacji w przestrzeni obiektów funkcjonalnych. Stosując tego rodzaju reprezentację struktury, fizyczny obiekt liniowy stanowi relację łączącą dwa punkty, co w przypadku obliczenia masy zgromadzonej na obiekcie funkcjonalnym może generować problemy związane z jednoczesną obsługą dwóch kierunków. Podczas transportu elementu masy w alternatywnych kierunkach jest on nadal przypisany do obiektu źródłowego, co też może rodzić oczywiste problemy na etapie przygotowania i analizy wyników. Sposobem na rozwiązanie tej kwestii jest zapis obiektów liniowych za pomocą punktów odwzorowujących początek i koniec liniowej odległości (rys. 5.2c), przy czym współrzędne końca obiektu poprzedzającego stanowiąc będzie współrzędna początku obiektu odbierającego. W ten sposób reprezentacja punktowa właściwa w przypadku odwzorowania obiektów samojezdnych w mikrosymulacji może zostać wykorzystana na poziomie makrosymulacji.

Należy również zauważyć, że w przypadku nierozdzielania strugi urobku, zabieg taki nie jest konieczny. Proces translacji zapisu liniowego na punktowy został w niniejszej pracy przeprowadzony wielokrotnie m.in. na etapie odczytywania tras transportowych z mapy i jej strukturalizacji. Był on realizowany również na etapie wymiany danych między dwoma modelami symulacyjnymi. Opisujący w dalszej części rekurencyjny model symulacyjny (RMS) korzystał z zapisu liniowego, a interakcyjny model symulacyjny (IMS) z zapisu punktowego. Zróznicowanie to wynikało bezpośrednio z cech funkcjonalnych obydwu modeli.

5.2.2. Konwersja zapisu ruchu mas dyskretnych

Jak wykazano w rozdziale 4.3.3, taśmowy transport urobku w najprostszym ujęciu może zostać zamodelowany za pomocą opóźnień wynikających z odległości i prędkości ruchu oraz procesu kolejkowego odwzorowującego zbiorniki oraz pozostałe obiekty z określoną funkcją przepływu wyjściowego. W takiej sytuacji obciążenie poszczególnych odcinków trasy nie musi być osobno rozpatrywane, lecz może być określone wtórnie poprzez iloczyn długości oraz średniej ruchomej stanowiącej splot sygnału chwilowego przepływu urobku i dyskretnego impulsu prostokątnego o szerokości L/V , którego suma amplitud wynosi jeden.

Przepływ przedstawiony w formie narastającej, skwantyfikowany w dziedzinie masy przybiera postać schodkową, stanowi iloczyn skumulowanego przepływu i ciągu jednostkowych impulsów zależnych od wyodrębnionej masy jednostkowej. Stąd też przepływy w modelu dyskretnym zastępczo wyrazić można jako ciąg impulsów następujących w określonym czasie, co z uwagi na efektywność przetwarzania i przechowywania danych jest w pewnym sensie wskazane i bardzo korzystne. Sytuację komplikuje jednak zastosowanie zmiennego czasu wystąpienia tychże zdarzeń. Zmienność ta, pomimo iż posiada swoistą właściwość diagnostyczną, utrudnia analizę dynamiki zmian w ciągłym kontinuum czasu i przestrzeni. Ponieważ sygnał ciągły opisany funkcją $x(t)$ można zaproksymować za pomocą sumy przesuniętych przeskalowanych impulsów, przetworzenie takiego zapisu zdarzeń dyskretnych na wartości chwilowe jest niezbędne m.in. w celach diagnostycznych. W przestrzeni funkcjonalnej czasu konwersję sygnału ciągłego opisać można funkcją dystrybucji określającą wartość czasową $y(t)$ zgodnie z równaniem 5.1.

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = x(t) * \delta(t) \quad 5.1$$

gdzie:

- $\delta(t)$ – odpowiedź impulsowa,
- $x(t)$ – sygnał wejściowy (ciągły),
- $y(t)$ – sygnał wyjściowy (odpowiedź czasowa).

W zakresie przetwarzania wyników oznacza to na ogół wyznaczenie przestrzeni czasowej z użyciem stałego czasu próbkowania oraz zliczanie dyskretnych impulsów będących reprezentacją mas przemieszczonych pomiędzy kolejnymi krokami czasowymi. Stosując szczegółowe próbkowanie i większe elementy mas jednostkowych, prowadzi to w rezultacie do zauważalnej kwantyzacji wskazań przepływów, co nie jest pożądane i wymagać może realizacji wygładzania (ang. *anti-aliasing*). Problem ten w opisanych modelach symulacyjnych rozwiązano na etapie przetwarzania wyników za pomocą uśrednienia odstępów czasowych pomiędzy masami dyskretnymi oraz właściwym doбором okresu próbkowania wyników do zastosowanej wielkości mas jednostkowych. Algorytmizacja takiego rozwiązania wymagała wyszukania mas jednostkowych poza obrębem przedziału czasu. Stanowi to rezultat tego, że pojawienie się ograniczonej ilości mas w niemalże tym samym momencie interpretowane na podstawie odległości między nimi powodowało fałszywie dodatni wzrost wydajności chwilowej. Sytuacja taka na ogół obserwowana była na etapie testowania modeli w lokalizacjach, gdzie łączone były dwie lub więcej strugi urobku.

5.2.3. Odwzorowanie przepływu za pomocą funkcji przeniesienia

Do podstawowych funkcji obiektów zdefiniowanych w modelach symulacyjnych procesu transportu urobku należy zaliczyć:

- generowanie urobku,
- przemieszczanie urobku z zadaną prędkością ruchu,
- gromadzenie urobku,
- regulowanie przepływu wyjściowego do jednego lub większej ilości punktów odbioru.

Wszystkie z powyższych działań można opisać tzw. funkcją przeniesienia, która realizuje wybór i pobranie masy dyskretnej, wskazanie miejsca docelowego i czasu wejścia na lokalizację docelową. Sposób generowania mas może być odwzorowany w tożsamy sposób, jako opróżnienie nieskończonego lub skończonego magazynu urobku odwzorowującego zasoby pokładu złoża.

Łączenie dwóch strug urobku z wyjątkiem opisanego we wcześniejszym rozdziale problemu z wyliczaniem przepływów chwilowych nie jest w tym przypadku istotnym problemem. Kwestię problematyczną w sytuacji wyodrębnienia dyskretnych mas urobku stanowi jednak podział strugi urobku w relacji 1 do N lub N do N. Z zagadnieniem tym wiąże się bezpośrednio problem wyboru kierunku ruchu zgodnie ze specyfiką przemieszczającego się obiektu, w interakcji do jego otoczenia – tras transportowych. Problem ten jest istotny w sytuacji gdy rozpatrujemy ruch samojedznych maszyn górniczych, jak i samego urobku przy uwzględnieniu jego dodatkowych właściwości, poddanych klasyfikacji jak m.in. granulacja lub gęstość, które decydują przykładowo o wyborze kierunku na przesiewaczu. Rozpatrując ruch mas dyskretnych, proces podziału urobku jest dodatkowo ograniczony z uwagi na niepodzielność użytych mas skupionych. Poza kwestiami ilościowej regulacji przepływu

wyjściowego zasadniczo zachodzi potrzeba redystrybucji masy napływającego urobku na podstawie określonych zasad relokacji, a kluczową kwestię stanowi wybór miejsca docelowego dla kolejnych, przekierowanych mas jednostkowych.

Podstawowy algorytm obliczeniowy możliwy do zastosowania w tym zakresie zakłada obliczenie nowego czasu i przeniesienie obiektu, nie uwzględniając stanu obiektu docelowego, co w wielu przypadkach np. przepełnienie zbiornika, zajęcie drogi transportowej przez inną maszynę samojezdną, jest zbyt dalekim uproszczeniem. W związku z tym, określając założenia tzw. interakcyjnego modelu – uwzględniono taką sytuację i celowość odwzorowania interakcji zwrotnych, a w konsekwencji ograniczenia lub zablokowaniu możliwości ruchu urobku.

Dyskretny sposób odwzorowania elementów ruchomych (masy urobku, pojazdów) dodatkowo pozwala ustalić kolejność ich podejmowania w celu przeniesienia, a proces ten klasycznie może zostać opisany jako kolejka typu FIFO lub LIFO. Dodatkowo należy zaznaczyć, że funkcja przeniesienia może zostać określona również w specyficzny sposób, uwzględniając chociażby różne prędkości przemieszczania obiektów, możliwe do zobrazowania jako wyprzedzanie na liniowej trasie lub wzajemne interakcje pomiędzy masami jednostkowymi w bardziej złożonej strukturze. Z uwagi na implementację modeli symulacyjnych zauważyć należy, że kolejka FIFO umożliwia osiągnięcie największej wydajności obliczeniowej z uwagi na kierunkowość przesunięć obiektów zgodną z upływem czasu. Tymczasem realizacja kolejki LIFO wymaga podglądu stanu systemu i zegara symulacji w celu identyfikacji elementu, który pojawił się jako ostatni. W pewnego rodzaju implementacjach – przykładowo modelu rekurencyjnym, tego rodzaju czynniki odgrywają istotną rolę.

5.2.4. Cechy obiektów funkcjonalnych

Podjmując temat opracowania modeli symulacyjnych, których konfiguracja podlegać będzie zmianom z uwagi na proces projektowania, rozbudowy, likwidacji systemu, szczególnej wagi nabiera kwestia opisu właściwości poszczególnych obiektów. Dotyczy to zarówno nomenklatury nazewnictwa, właściwości fizycznych, jak również ich zachowania, interakcji z innymi obiektami, a także metod przetwarzania danych wyjściowych. W pracy uwzględniono cztery zróżnicowane podejścia w tym zakresie:

- uniwersalny opis cech obiektu,
- typologiczny opis cech obiektu,
- opis dynamiczny,
- opis mieszany.

Opis uniwersalny zakłada, że wszystkie obiekty są odwzorowane za pomocą spójnego zbioru cech i zdefiniowanych zachowań. Parametryzacja cech modelu pozwala na ograniczenie lub wyłączenie danego zachowania. Opis typologiczny zakłada dodatkowe zróżnicowanie opisu uniwersalnego dla zdefiniowanych typów obiektów, w takim przypadku istnieje zasadność wykorzystania wszystkich atrybutów i właściwości zapisanych w konfiguracji obiektu. Opis dynamiczny zakłada istnienie pewnych niezmiennych, elementarnych zachowań oraz cech obiektów na bardzo podstawowym zakresie funkcjonalnym, na jakim jest to konieczne w celu realizacji dalszych, dowolnie sformułowanych formuł określających cechy i zachowania obiektu. Opis mieszany zakłada jednoczesne wykorzystanie typologicznego opisu wraz z opisem dynamicznym. Opisy takie mogą stanowić formę

szablonu określającego obiekty dynamiczne lub też właściwości dynamiczne. Mogą również rozbudowywać pewne cechy wspólne określone na typach obiektów symulacji.

5.3. Rekurencyjny model symulacyjny (RMS)

Opracowanie rekurencyjnego modelu symulacyjnego ma bezpośredni związek ze strukturą układu transportowego przyjmującą najczęściej postać grafu skierowanego. Przedstawione w dalszej części rozdziału rozwiązanie stanowi połączenie modelu ze stałym krokiem czasowym oraz modelu wyzwalanego zdarzeniami, operującego w obrębie struktur tras transportowych.

5.3.1. Założenia

Najważniejszym założeniem modelu rekurencyjnego jest ograniczenie mikrosymulacji wyłącznie do jednego obiektu, następnie sukcesywne wykonanie tożsamyh obliczeń dla szeregu kolejnych obiektów, znajdujących się dalej z uwagi na kierunek transportu urobku. W ten sposób, dla struktur rozbudowanych istnieje możliwość realizacji równoległych symulacji na poziomie wyodrębnionych eksperymentów symulacyjnych realizowanych w tych samych lub innych warunkach. Realizacja obliczeń w sposób rekurencyjny na poziomie obiektu znacząco zwiększa szybkość symulacji, pozwalając na optymalizację działań na dyskretnych porcjach urobku. Na poziomie pojedynczego eksperymentu możliwa jest także realizacja obliczeń począwszy od N punktów nadawy w sposób równoległy do punktu zbiorczego, domyślnie szybów wydobywczyh.

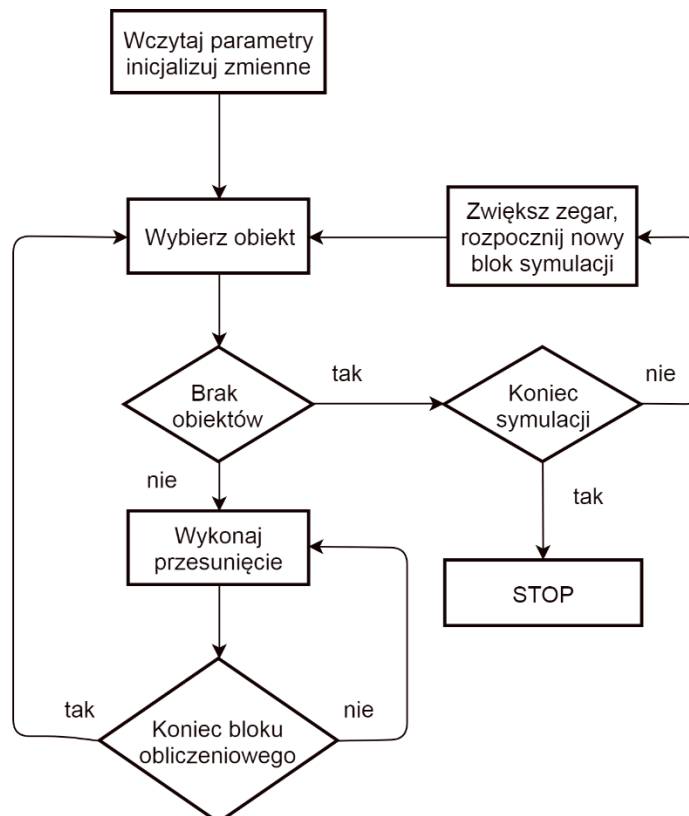
Kolejnym z istotnych założeń względem modelu rekurencyjnego opisanego w dalszej części pracy jest zastosowanie uproszczonego, uniwersalnego opisu obiektów i wprowadzenie skalowalnych w czasie bloków symulacyjnych, oddzielających makrosymulację od mikrosymulacji, która obejmuje wyłącznie wybrany obiekt. Na poziomie mikrosymulacji wybrana została symulacja dyskretna metodą kolejnych zdarzeń. Operuje ona na kolejnych porcjach urobku podawanych na obiekt. Jednak należy zaznaczyć, że jej zastosowanie nie jest obligatoryjne, a wprowadzenie podziału w postaci bloków symulacyjnych, przerywających wykonanie mikrosymulacji z założenia może dostarczyć dodatkowych możliwości w zakresie odejścia od metody symulacji inicjowanej zdarzeniami, gdy tylko jest to uzasadnione.

Potrzeba jak najszybszej realizacji wielu obliczeń w modelu rekurencyjnym wiąże się bezpośrednio z przeznaczeniem do tego celu środowiska bazy danych. Wybór ten dodatkowo umożliwia przechowywanie, sprawne przetwarzanie i zarządzanie zbiorami danych wyjściowych. W niniejszej pracy wykorzystano w tym celu bazę danych Oracle w wersji 12c wykorzystując język SQL oraz jego proceduralne rozszerzenie – język PL/SQL.

5.3.2. Opis działania

Działanie modelu rekurencyjnego rozpoczyna się od wyodrębnienia dyskretnych porcji urobku, następnie dla zdefiniowanej struktury połączeń obiektów realizowany jest załadunek z punktów

nadawy. W dalszej kolejności, do obliczeń wybierane są obiekty nie wskazane jako aktywny cel przekazania urobku lub których źródła zostały już zainicjowane i przeliczone. W pierwszej kolejności stanowią je więc obiekty, na których wykonano załadunek urobku z punktów załadunkowych. Rozwiązanie to korzysta z podstawowej cechy grafu skierowanego. Dla każdorazowo wybranego obiektu realizowany jest cykl przesunięć w zadanym przez kalendarz symulacji bloku czasowym. Blok czasowy symulacji stanowi podstawowy komponent funkcjonalny rekurencyjnego modelu symulacyjnego, w najprostszym ujęciu to na jego poziomie wykonywane są obliczenia w obrębie pojedynczego obiektu. Długość trwania bloku stanowi istotny parametr każdej symulacji. Po wykonaniu wszystkich przesunięć w obrębie bloków realizowane są działania wymagające dostępu do stanu całego systemu – m.in. nadrzędne algorytmy sterowania lub zmiany parametrów ruchowych. Przy czym zmiana parametrów ruchowych stanowiąca konsekwencję stanu obliczanego uprzednio obiektu lub obiektów poprzedzających jest możliwa bez przerywania cyklu obliczeniowego. Dane te są dostępne, gdyż stanowią wyniki obliczeniowe wcześniej wykonanego bloku symulacji. Bloki czasowe mogą charakteryzować się ustalonym, stałym przyrostem czasu lub mogą być oparte na przewidywanych zdarzeniach, takich jak między innymi awaria obiektu lub harmonogram jego pracy. Zauważyć należy więc, że sposób realizacji symulacji z podziałem na bloki obliczeniowe zasadniczo pozwala przejść z symulacji dyskretnej do symulacji semi-ciągłej w czasie z wyodrębnieniem mas dyskretnych. W zależności od preferencji bloki obliczeniowe mogą trwać tygodnie, dni, godziny, minuty lub sekundy. Realizacja obliczeń z zastosowaniem ekstremalnie krótkich bloków obliczeniowych jest jednak niewskazana, głównie z uwagi na fakt, iż eliminuje to główną zaletę modelu – dużą wydajność obliczeniową. Uproszczony przebieg symulacji zilustrowano za pomocą grafu na rysunku 5.3.



Rysunek 5.3. Uproszczony algorytm modelu blokowego (opracowanie własne).

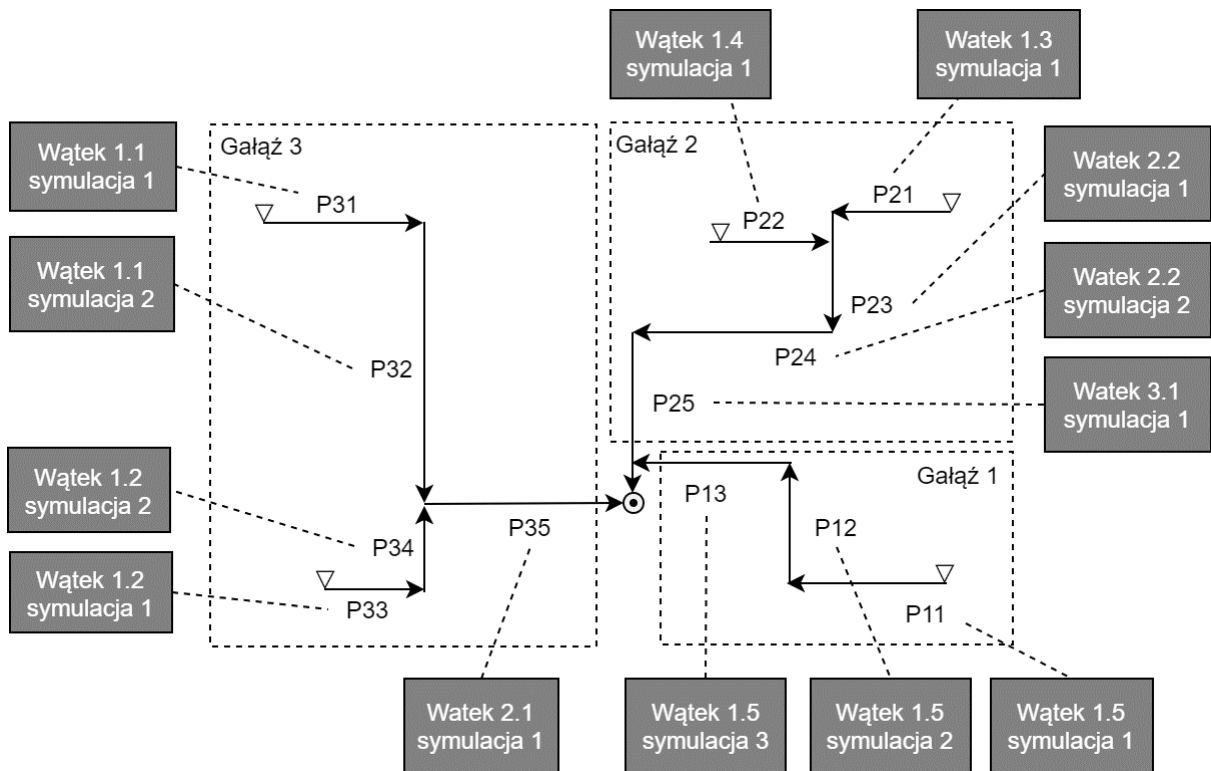
Model rekurencyjny zakłada uproszczony, swobodny przepływ urobku, zgodnie z założonymi mechanizmami regulacji i podziału operującymi na stochastycznym systemie nadawy urobku. Krótkotrwałe zatrzymanie przepływu urobku z uwagi na interakcje stanu obiektów biorących udział w

symulacji, lecz znajdujących się dalej w kolejności obliczeniowej, nie jest możliwe. Ograniczenie to wywiera istotne znaczenie w przypadku przekierowania urobku w sytuacji zapelnienia zbiornika znajdującego się w dalszej części trasy transportowej. Stąd też pełne decyzje sterujące wymagające podglądu stanu wszystkich obiektów mogą być podejmowane po zakończeniu czasowego bloku symulacji i bezpośrednio przed rozpoczęciem kolejnego bloku. Interakcje pomiędzy obiektami biorącymi udział w symulacji zostają tym samym ograniczone do ewentualnych korekt nastaw realizowanych w ustalonym czasie, po zakończeniu tzw. bloków obliczeniowych. Wobec tego można zdefiniować podstawowe cechy funkcjonalne, specyficzne dla modelu rekurencyjnego:

- obliczany pośrednio nieciągły zegar symulacji operujący na blokach symulacyjnych,
- ograniczenie interakcji obiektów na poziomie bloku symulacyjnego,
- ograniczone oddziaływanie na punkty załadunkowe – możliwości transportowe lub stan obiektu odbierającego nie może czasowo ograniczyć nadawy,
- bezpośrednia archiwizacja i przygotowanie wyników w bazie danych.

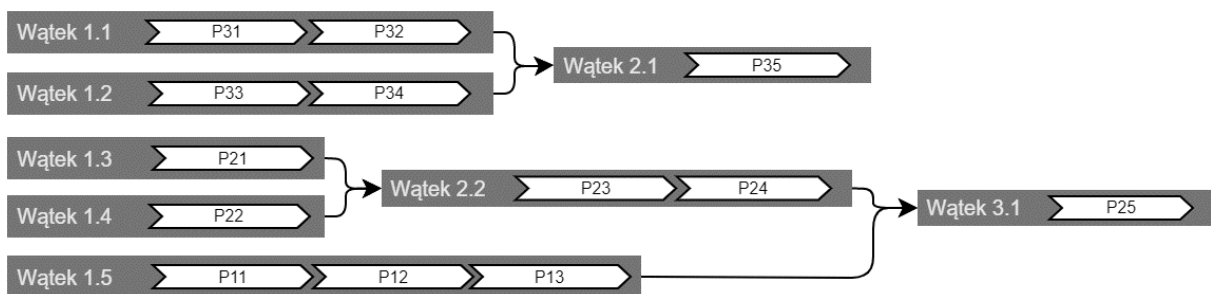
W trakcie testów modelu zauważono, że realizacja obliczeń na poziomie poszczególnych gałęzi w sposób równoległy umożliwia w sytuacji wprowadzenia przesunięcia priorytetu obliczeniowego, podgląd stanu innego obiektu, obliczanego w równoległym wątku i nadążne sterowanie w odpowiedzi na jego stan. Tego rodzaju właściwość modelu może uzasadniać zaawansowane planowanie sekwencji bloków obliczeniowych lub realizację obliczeń iteracyjnych w celu uwzględniania wzajemnej interakcji określonych obiektów. Wprowadzenie obliczeń iteracyjnych, w których pierwsze wykonanie symulacji stanowiłoby symulację bazową, a każde kolejne uwzględniałoby nowe parametry charakteryzujące zachowanie obiektów ma tu również zastosowanie. Co więcej, umożliwia to osadzenie w modelu symulacyjnym metod optymalizacji, które w sposób iteracyjny poszukiwać mogą najbardziej korzystnej kombinacji zmiennych sterujących w powtarzanym, deterministycznym eksperymencie symulacyjnym.

Rozpatrując działanie modelu rekurencyjnego należy podkreślić, że właściwe dostosowanie czasu trwania bloków obliczeniowych pozwala na realizację obliczeń również dla struktur niestanowiących grafu skierowanego. Ponadto istnienie niezależnych bloków obliczeniowych wykonywanych kolejno na obiektach, daje dodatkowe możliwości niedostępne w innych modelach. Dotyczy to w szczególności zdolności do podglądu przyszłego stanu obiektu, którego blok czasowy symulacji został już wykonany (rys. 5.4).



Rysunek 5.4. Realizacja obliczeń w modelu RMS – dekompozycja struktury połączeń (opracowanie własne).

Na rysunku 5.4 zilustrowano przykładowy przebieg symulacji w obrębie bardzo prostego układu transportowego złożonego wyłącznie z przenośnikami taśmowymi. Realizacja symulacji obejmuje wyszukanie obiektów, które nie oczekują na przyjęcie urobku a następnie równoległe wykonanie dla nich obliczeń. Zamknięcie bloku obliczeniowego w strukturze, sukcesywnie uwalnia kolejne objekty. Stan ten dla gałęzi obiektów pozwala zdefiniować tzw. wątki obliczeniowe, których wykonanie od początku do końca nie zależy od stanu innych gałęzi. Każdy wątek obliczeniowy rozpoczyna się załadowaniem urobku przypisanego do pierwszego obiektu, wykonanie przesunięcia i przypisanie urobku do nowych obiektów wraz z aktualizacją czasu. Sekwencja wykonanych wątków, składających się z jednego lub więcej bloków czasowych symulacji, przedstawiono na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Realizacja obliczeń w modelu RMS – sekwencja wykonania bloków obliczeniowych (opracowanie własne).

Aby uprościć i maksymalnie zoptymalizować, obiekty zdefiniowane w rekurencyjnym modelu symulacyjnym zostały opisane w sposób uniwersalny, poprzez parametryzację zestawu podstawowych cech funkcjonalnych. Konfiguracja każdego z obiektów realizujących przemieszczenie urobku opisuje ustandaryzowany zbiór parametrów wejściowych:

- minimalny czas transportu z punktu załadunkowego do rozładunkowego – T_t ,
- maksymalny czas transportu z punktu załadunkowego do rozładunkowego – T_p ,
- minimalny czas odstępu od ostatniego przekazanej masy dyskretnej – T_{min} ,
- maksymalny czas odstępu od ostatniej przekazanej masy dyskretnej – T_{max} ,
- maksymalna liczba mas przekazywanych jednocześnie – P_{max} ,
- minimalna liczba mas przekazywanych jednocześnie – P_{min} ,
- losowy składnik czasowy z zakresu wskazanego przez parametr T_r .

W aspekcie celowości wprowadzenia parametrów P_{max} oraz P_{min} wskazać należy, że są one wymagane w celu odwzorowania cyklicznych obiektów transportowych, takich jak kolej kopalniana lub górniczy wyciąg szybowy o zadanej pojemności naczyń skipowych. Warunki inicjacji przemieszczeń opisane poprzez P_{max} i P_{min} oraz T_{max} i T_{min} można opisać równaniem 5.2.

$$\begin{aligned} P &\geq P_{min} \wedge T \geq T_{max} \\ P &\geq P_{max} \wedge T \geq T_{min} \end{aligned} \quad 5.2$$

gdzie:

$$T_{max} > T_{min} \text{ oraz } P_{max} > P_{min}$$

Osiągnięcie przez jeden z parametrów wartości maksymalnej oraz spełnienie warunku wartości minimalnej oznacza wykonanie ruchu obiektu. Zatem, gdy $T_{min} = T_{max}$ oraz $P_{min} = 0$ obiekt przemieszcza masę z określonym, stałym krokiem czasowym o limicie ilościowym P_{max} . Gdy natomiast $P_{min} = P_{max}$ a $T_{min} = 0$ oznacza przemieszczanie każdych kolejnych pełnych porcji urobku wraz z osiągnięciem zadanej akumulacji. Tego rodzaju parametryzacja pozwoliła w fazie testów oraz weryfikacji na elastyczne konfigurowanie zbiorowych lub cyklicznych procesów transportowych oraz regulację wydajności wyjściowych.

Łączny czas przemieszczenia (opuszczenia obiektu) kolejnych mas dyskretnych w pętli repetycyjnej obliczany jest w modelu rekurencyjnym według wzoru 5.3.

$$T_{wy} = \min(\{ \max(\{ T_{P_{min}} + T_t, T_0 + T_{max} \}), \max(\{ T_{P_{max}} + T_t, T_0 + T_{min} \}) \}) \quad 5.3$$

gdzie:

- T_0 – czas ostatniego wyjścia,
- $T_{P_{min}}$ – czas zarejestrowany wejścia obiektu spełniającego warunek $L=L_{min}$ (obiektu o indeksie $i+L_{min}$ gdzie i to numer obiektu, który wyszedł jako ostatni w czasie T_0),
- $T_{P_{max}}$ – czas zarejestrowany wejścia obiektu spełniającego warunek $L=L_{max}$ (obiektu o indeksie $i+L_{max}$ gdzie i to numer obiektu, który wyszedł jako ostatni w czasie T_0).

Kolejnym krokiem następującym po obliczeniu czasu wyjścia elementu masy jest rozdysponowanie urobku i wybór kierunku jego przekazania. W przypadku istnienia więcej niż jednego punktu odbioru wybór docelowego obiektu może być realizowany z użyciem jednej z wielu zaimplementowanych w modelu metod:

- metody proporcjonalnej ze współczynnikiem zachowania proporcji A/B,
- metody losowej z określonym prawdopodobieństwem $P(A)$ oraz $P(B) = 1 - P(A)$,
- metody limitowanej dla punktu A, przekierowującym urobek o zbyt małym odstępie pomiędzy kolejnymi dyskretnymi elementami na obiekt B, przy czym wymagany odstęp określony jest parametrem T_L ,

- metody determinowanej cechą urobku (m.in. w celu odwzorowania przesiewacza),
- metody czasowej, z przełączeniem kierunku na podstawie licznika czasowego dla kierunku A i B przy podanych czasach T_A i T_B ,
- metody ilościowej, określony na wartości maksymalnej narastającego licznika przeniesień do punktu A i B, odpowiednio L_A i L_B ,
- metody czasowej z wyborem kierunku opisanym na czasie zegarowym.

Sposób realizacji obliczeń w modelu rekurencyjnym daje teoretyczną możliwość zmiany kolejności urobku lub realizacji bardzo złożonych funkcji związanych z jego akumulacją i rozdziałem. Wynika to z tego, że przekazanie urobku może zostać umownie opóźnione do czasu realizacji symulacji na innym węźle. Funkcja rozdziału obejmować może również cały zakres czasowy, uzyskując tym samym pełny dostęp do zapisu kolejnych czasów przekazania masy wewnątrz bloku symulacyjnego, co nie jest osiągalne w sytuacji zastosowania jednego, wspólnego zegara symulacji. Pomimo że opisana funkcjonalność nie była stosowana ani implementowana w modelu, jej istnienie stanowi jedną z cech charakterystycznych modelu rekurencyjnego.

Jedną z kluczowych kwestii związanych z modelowaniem procesów transportu urobku jest konieczność odwzorowania sposobu organizacji pracy maszyn i urządzeń transportowych. W tym celu model rekurencyjny umożliwia dodatkowo wprowadzenie do obliczeń:

- powtarzalnych przerw w pracy opisanych zegarem dobowym za pośrednictwem harmonogramu przerw (T_{POCZ} ; T_{KON}),
- maksymalnego czasu gotowości obiektu do pracy i przypadającego po zakończeniu czasu przerwy (T_{PMAX} i T_{PC}),
- maksymalnej ilości przetransportowanego urobku, po którym następuje przerwa o określonej długości (L_{MAX} i T_{PL}).

Całość parametrów opisanych w rozdziale zawarto w postaci rekordów w tabeli relacyjnej bazy danych, co pozwoliło na odwzorowanie bardzo zróżnicowanych obiektów biorących udział w procesie transportowym w czytelny i uporządkowany sposób. Dla wszystkich opisanych parametrów przewidziane zostało zdefiniowanie dodatkowego elementu losowego, którego istnienie pozwala przykładowo na uzyskanie losowo zmiennej długości przerw w pracy.

5.3.3. Cechy funkcjonalne i oczekiwana stosowalność

Opracowanie rekurencyjnego modelu symulacyjnego w aspekcie niniejszej pracy uzasadnia potrzeba posiadania modelu, cechującego się:

- wysoką prostotą i czytelnością logiczną,
- uniwersalną konfiguracją cech i parametrów ruchowych obiektów,
- bardzo dużą szybkością obliczeniową w tym możliwością realizacji obliczeń w sposób równoległy,
- dużą elastycznością i możliwościami szybkiej rekonfiguracji przebiegu symulacji długookresowej.

Głównym przeznaczeniem modelu rekurencyjnego jest więc pełnienie funkcji modelu bazowego w przypadku symulacji średnich i długich okresów czasu. Realizowane jest to w drodze dostarczenia wyników, umożliwiających ocenę procesu transportowego, w tym stanu obciążenia obiektów i

przepływów na poszczególnych punktach pomiarowych. Duża szybkość modelu jest konieczna również w celu uzyskania wymaganej pewności rozkładu wyników z uwagi na obecność czynnika stochastycznego, pozwalając na identyfikację lokalnych ekstremów wynikających z kombinacji zmiennych wejściowych. Model ten przewidziany jest do wykorzystania ze szczególną koncentracją na zadaniach wymagających długiego czasu obliczeniowego. Został on rozbudowany dodatkowo o funkcjonalność związaną z przygotowaniem wyników w formie identyfikacji źródeł urobku i określeniem wskaźników związanych z przepływem jego masy. Funkcjonalność została opracowana w celu przyspieszenia obliczeń, a następnie trwale zintegrowana z głównym algorytmem obliczeniowym. Docelowo model ten został przewidziany do oceny parametrów chwilowych, charakteryzujących przebieg procesu transportowego w obrębie złożonej struktury funkcjonalnej – dotyczy to w szczególności kwestii wydajnościowych oraz efektywnościowych.

Nieocenioną zaletą stosowania modelu rekurencyjnego jest możliwość zwielokrotnienia obliczeń w systemach komputerowych rozproszonych, wieloprocessorowych lub wielowątkowych na poziomie bloków obliczeniowych. Relatywna względność zegara obliczeniowego na poziomie mikrosymulacji pozwolić może na dalszą rozbudowę funkcjonalności modelu poprzez zawarcie w pętli obliczeniowej procedur optymalizacyjnych lub innych funkcji niedostępnych w modelach operujących na holistycznym stanie procesu transportowego.

5.4. Interakcyjny model symulacyjny (IMS)

Interakcyjny model symulacyjny stanowi uzupełnienie funkcjonalności modelu rekurencyjnego. Opisany w dalszej części model pozwala na elastyczne odwzorowanie rzeczywistego systemu o różnym stopniu abstrakcji oraz złożoności interakcji pomiędzy obiektami symulacji. Wysoka skalowalność, możliwość implementacji nietypowych mechanizmów oraz licznych interakcji pomiędzy obiektami stanowi w głównej mierze o istocie tego modelu.

5.4.1. Założenia

Model interakcyjny został opracowany z ogólnym założeniem optymalizacji sposobu aktualizacji procesów i obliczeń tzw. wyzwalaczy działających na wzór procedur wykonywanych automatycznie jako reakcja na pewne zdarzenia w tabeli bazy danych (ang. *trigger*). Takie wyzwalacze mają w założeniu warunkować działanie obiektów oraz ogólny przebieg symulacji w holistyczny sposób oddziałując na przebieg procesu transportu urobku. W odróżnieniu od modelu rekurencyjnego optymalizacja nie była więc ukierunkowana na dostarczenie w jak najkrótszym czasie jak największej ilości danych pomiarowych, lecz na możliwości osadzenia w modelu nawet najbardziej złożonych struktur funkcjonalnych obejmujących wzajemne złożone interakcje z innymi obiektami. Koncepcja i implementacja modelu ukierunkowana była na eliminację niepotrzebnych obliczeń mających związek ze zmianami właściwości obiektów, skutkujących na ogół kilkukrotnym powtarzaniem tych samych działań weryfikujących przestrzeń stanu symulacji.

Model interakcyjny został wstępnie przewidziany do realizacji najbardziej wymagających, szczegółowych symulacji przebiegu procesów transportowych zależnych od wielu zróżnicowanych czynników. Jako środowisko implementacji modelu wybrano zorientowany obiektowo język

programowania – Python w wersji 3.4.3. Opracowanie modelu w środowisku obiektowym umożliwić powinno rozwój i zmianę funkcjonalności obiektów w drodze definicji specyficznych klas opisujących procesy lub wzajemne interakcje obiektów. Klasy te, stanowiąc pochodne rozszerzenie funkcjonalności, dziedziczą cechy z klas bazowych. Tego rodzaju podejście zostało zdefiniowane po raz pierwszy w języku symulacyjnym Simula. Zastosowane rozwiązanie jest całkowitym przeciwieństwem statycznych i zunifikowanych procedur symulacji i przetwarzania danych zdefiniowanych w modelu rekurencyjnym w strukturach bazy danych oraz języku PL/SQL. Różnice te dotyczą przede wszystkim tego, że implementacje nowej funkcjonalności w rekurencyjnym modelu każdorazowo wymagały wprowadzenia istotnych zmian w głównym algorytmie programu, co jest procesem uciążliwym.

5.4.2. Opis działania

Przestrzeń symulacji modelu interakcyjnego opisana została w sposób w pełni obiektowy, z wyróżnieniem trzech podstawowych rodzajów elementów:

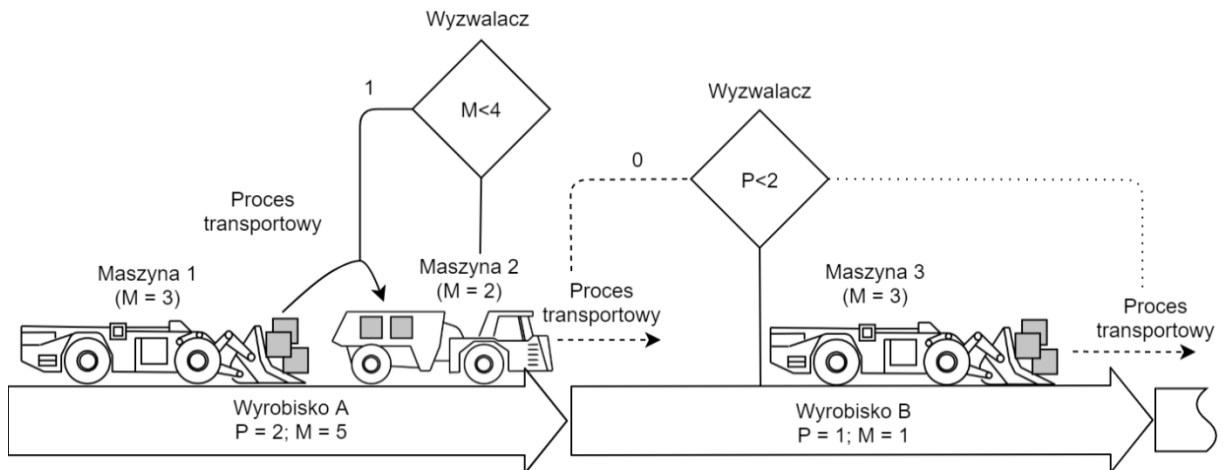
- obiektów stanowiących reprezentację fizycznych uczestników procesu, takich jak: maszyna samojezdna, przenośnik, porcja urobku, zgrzebło przenośnika,
- procesów stanowiących głównie połączenia pomiędzy powołanymi obiektami,
- wyzwalaczy odwołujących się do stanu symulacji (stan obiektów lub procesów).

Podstawowym zadaniem tzw. wyzwalaczy jest aktualizacja stanu procesów, w tym procesów transportowych poprzez weryfikację, czy spełnione zostały warunki ich wykonania. Wyzwalacze zdefiniowane są na obiektach, procesach lub też stanie innych wyzwalaczy, a precyzyjnie rzecz ujmując, ich bieżących cechach – przykładowo ilości urobku zgromadzonego w zbiorniku. Najogólniej ujęty algorytm działania modelu symulacyjnego został przedstawiony na rysunku 5.5.



Rysunek 5.5. Algorytm modelu inicjowanego zdarzeniami (opracowanie własne).

Etap opisany na rysunku 5.5 jako odświeżenie stanu obiektów obejmuje aktualizację zdefiniowanych w modelu wyzwalaczy. Przykładem działania jednego z nich jest warunek umożliwiający wjazd do wyrobiska B wyłącznie jednej maszynie górniczej (rys. 5.6). Ten warunek, opisany na jednej z cech obiektu B obejmującej ilość maszyn w wyrobisku, umożliwia aktywację lub dezaktywację procesu opisanego jako wjazd innej, oczekującej maszyny z lokalizacji A do B. Tym samym jako pierwszy na załączonym przykładzie wykonany jest proces transportowy obejmujący przeładunek urobku z maszyny nr 1 na maszynę nr 2.

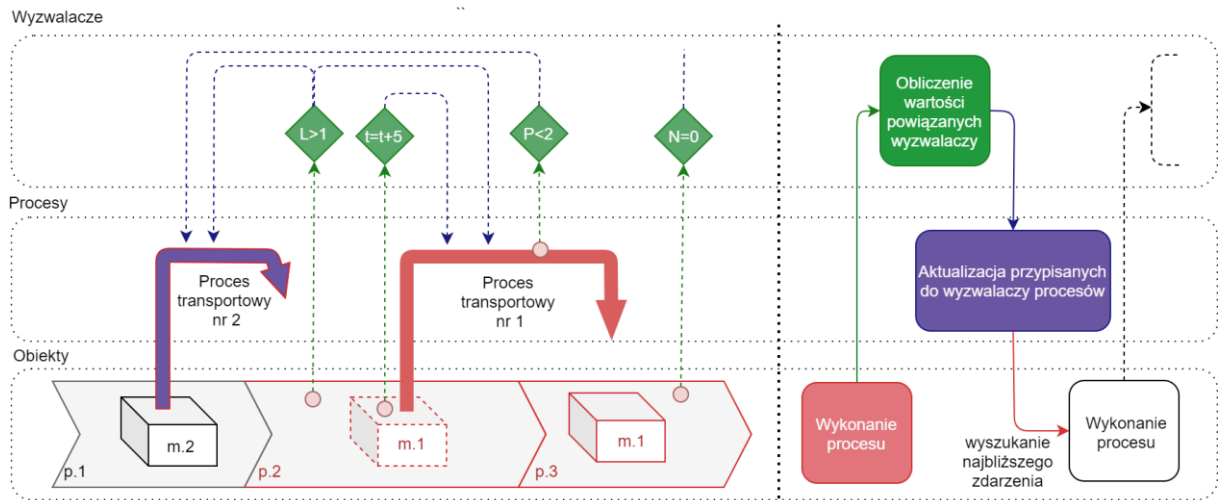


Rysunek 5.6. Ilustracja działania wyzwalaczy (opracowanie własne).

Przykład zamieszczony na rysunku 5.6 pokazuje, że wyzwalacze zdefiniowane w modelu symulacyjnym mogą dotyczyć różnych rodzajów obiektów, opisując przykładowo interakcje pomiędzy urobkiem, maszynami samojezdnymi lub odcinkami dróg transportowych. Podstawowym zadaniem wyzwalaczy jest przede wszystkim kontrolowanie procesów będących następstwem funkcjonalnego połączenia elementów systemu. W szczególności wyzwalacze realizują:

- aktywację, dezaktywację lub czasową blokadę tychże połączeń,
- określenie przewidywanego czasu wykonania procesu (T_p),
- oszacowanie opóźnienia dla połączenia (wartości dodanych do czasu T_p) – celem określenia priorytetu lub funkcji regulacji ruchu,
- określenie kolejności połączenia w przypadku stwierdzenia jednoczesnych czasów realizacji.

Przebieg symulacji obejmuje znalezienie i wykonanie instrukcji wykonawczych zawartych w najbliższym zegarowi symulacji procesie (rys 5.5). Instrukcje te mogą wprowadzać dowolne zmiany w środowisku symulacji, jednak w większości odwzorowują one połączenia pomiędzy fizycznymi elementami, realizując pryncypialne procesy przemieszczania mas urobku lub ruch maszyn. Po zakończeniu wykonania instrukcji wykonawczych zawartych w wybranym procesie, odświeżone zostają wartości wszystkich wyzwalaczy przypisanych do obiektów i procesów, których instrukcje wykonawcze bezpośrednio lub pośrednio dotyczyły. Tym samym przestrzeń interakcji zostaje zawężona w celu redukcji ilości działań związanych z przetwarzaniem danych. Następnie kolejny raz wybierany i wykonywany jest najbliższy zegarowi symulacji proces. Procedura ta została przedstawiona na rysunku 5.7.



Rysunek 5.7. Przebieg obliczeń w pętli interakcyjnej. (opracowanie własne).

Można zauważyć, że w systemie mogą też istnieć wyjątki obejmujące m.in.: samoistne procesy, wyzwalacze niepowiązane z żadnym z obiektów, jak i wyzwalacze niepowiązane z żadnym procesem. Opisane przypadki zostały zaimplementowane w przygotowanym modelu i służyć mogą do realizacji dodatkowych działań, niezwiązanych trwale z procesem transportowym.

W ogólnym ujęciu procesy transportowe odwzorowujące połączenia między fizycznymi elementami systemu w modelu interakcyjnym, można podzielić na:

- bezpośrednie (m.in. przejazd maszyny samojezdnej z wyrobiska A do B),
- rozładunkowe (m.in. rozładowanie łyżki ładowarki w punkcie przesypowym),
- załadunkowe (m.in. załadowanie łyżki ładowarki poprzez wybranie urobku w eksploatowanym przodku),
- przeładunkowe (m.in. przeładunek urobku z łyżki ładowarki na skrzynię wozu odstawczego).

Taki podział jest kluczowy, jeśli rozpatrujemy działanie całego modelu. Traktowanie na równi mas, urobku, elementów maszyn, pojazdów oraz odcinków dróg transportowych dostarcza dużej skalowalności rozwiązania w aspekcie przejścia od makro- do mikrosymulacji w skali szczegółowości umożliwiającej odwzorowanie elementów ruchomych maszyn. W związku z tym opisane uprzednio procesy mogą stanowić przekazanie podrzędnego obiektu pomiędzy elementami znajdującymi się na tym samym poziomie funkcjonalnym lub pomiędzy różnymi poziomami – przykład stanowi tu wybranie urobku przez maszynę samojezdną w wyrobisku lub rozładunek w punkcie przesypowym. W efekcie model interakcyjny może być użyty do budowy wielopoziomowych struktur funkcjonalnych, których maksymalne zagłębienie – decydujące o szczegółowości odwzorowania procesu transportowego, pozostaje wyłącznie w kwestii osoby realizującej badania symulacyjne.

W celu uporządkowania mechanizmów sterujących wzajemnymi interakcjami obiektów w modelu interakcyjnym dokonano umowy klasyfikacji wyzwalaczy zdefiniowanych na procesach transportowych. Podzielono je na trzy podstawowe grupy:

- wyzwalacze bazowe,
- wyzwalacze opóźniające,
- wyzwalacze warunkowe.

Wyzwalacze bazowe stanowią procedury określające bezpośredni czas wykonania procesu transportowego, co w przypadku zastosowania większej ilości wyzwalaczy opisujących dany proces wiąże się z wykorzystaniem funkcji agregującej zwracającej zwykle wartość minimalną lub maksymalną. Podstawowe metody określenia czasu wykonania ruchu poprzez wyzwalacze bazowe, opisane na stanie obiektu, to między innymi:

- stały krok czasowy,
- odstęp czasowy od wejścia elementu na obiekt (zwykle czas przejścia od punktu A do punktu B, gdzie A to początek drogi transportowej, a B to jej zakończenie),
- odstęp czasowy od ostatniego wejścia lub wyjścia elementu z obiektu,
- odstęp od ostatniego wejścia lub wyjścia elementu na podobiekt znajdujący się na obiekcie.

Wyzwalacze opóźniające służą do kolejowania i regulacji procesu transportowego. Stanowią one cząstkową macierz przesunięć czasowych dodawaną do czasu wykonania procesu transportowego. Zwracana przez nie wartość może posłużyć również do określenia priorytetu ruchu w sytuacji stwierdzenia jednoczesnych, lecz wykluczających się wzajemnie procesów transportowych – między innymi podczas wyboru jednego z dwóch kierunków ruchu obiektu. W pracy zdefiniowano następujące rodzaje wyzwalaczy opóźniających:

- losowe przesunięcie czasu wykonania w zadanym przedziale wartości i zgodnie z rozkładem,
- stałe przesunięcie czasowe z prawdopodobieństwem $P(A)$,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od czasu, który upłynął od ostatniego wejścia/wyjścia na wskazany obiekt,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od udziału wejść/wyjść na obiekt z wskazanego połączenia,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od liczby wejść/wyjść na obiekt,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od liczby podobiektów,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od liczby elementów 3 rzędu na podobieckie,
- przesunięcie czasu wykonania zależne od preferencji ruchomego podobiektu (używane m.in. do ustalania kierunków ruchu pojazdów),
- przesunięcie czasu wykonania opisane w funkcji cech ruchomego obiektu.

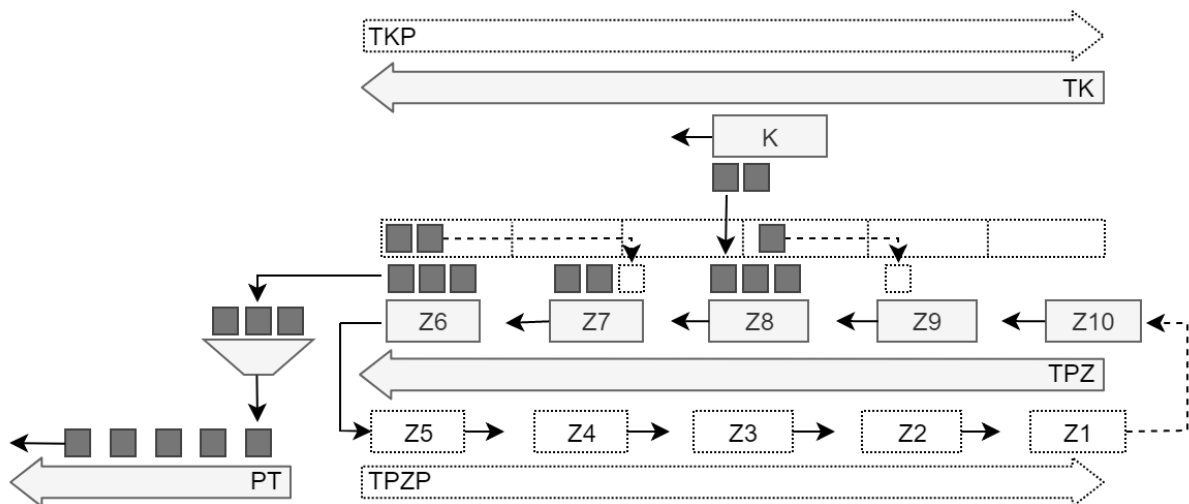
Ostatnia grupa, tj. wyzwalacze warunkowe, służą do wprowadzenia instrukcji warunkujących istnienie połączenia transportowego. W głównej mierze są one opisane operatorami logicznymi, a ich inicjacja występuje:

- po przekroczeniu określonego czasu od aktywacji lub dezaktywacji obiektu,
- po przekroczeniu wymaganego czasu od ostatniego wejścia lub wyjścia z obiektu,
- gdy ilość podobiektów na obiekcie znajdzie się poniżej pojemności minimalnej lub powyżej pojemności maksymalnej obiektu ruchomego,
- gdy ilość podobiektów na n-tym obiekcie ruchomym znajdzie się poniżej minimalnej lub powyżej maksymalnej,
- gdy ilość obiektów znajdzie się powyżej wartości maksymalnej lub poniżej wartości minimalnej,
- gdy ilość wejść jest powyżej wartości lub gdy ilość wyjść przekroczy wskazaną wartość.

Wyzwalacze warunkowe wykorzystano dodatkowo do zmiany sposobu pracy niektórych obiektów, w tym szczególnie względem pojazdów ruchomych, których ścieżki ruchu zależą od pełnionej w danej chwili funkcji. Wyzwalacze te wykonywać mogą:

- zmiany trasy, gdy osiągnięto pojemność minimalną, zapelniono obiekt lub uzyskano określone rozładowanie,
- zmiany trasy, gdy osiągnięto wartość załadunkową i rozładunkową wskazaną dla obiektu.

Opisany systemem wyzwalaczy zawarty w modelu symulacyjnym w swoim założeniu powinien pozwolić na realizację nawet najbardziej złożonych procedur regulacji, koordynacji i interakcji obiektów uczestniczących w procesach transportowych urobku. Jakkolwiek model rekurencyjny operował na uniwersalnych reprezentacjach obiektów uczestniczących w procesie transportowym, o tyle model interakcyjny charakteryzuje się znaczącymi możliwościami doprecyzowania zachowań obiektów. Model ten umożliwia odwzorowanie całego wachlarza zjawisk i dowolnych zachowań, tworząc swoisty ekosystem symulacji. Tego rodzaju holistyczne podejście nie było możliwe w realizacji za pomocą rekurencyjnego modelu, cechującego się zdecydowanie bardziej usystematyzowanym działaniem. Jest to wynikiem tego, że obiektem w myśl wielopoziomowej zasady budowy modelu może być zarówno trasa, poruszający się po niej pojazd lub element urządzenia, jak również skończona porcja urobku. Model ten wymaga więc świadomego doboru skali szczegółowości. Cechą niezwykle istotną w tym kontekście jest to, że skala może zostać dobrana lokalnie, tj. niektóre fragmenty ciągu transportowego mogą zostać odwzorowane w sposób bardzo szczegółowy, przy jednoczesnym uogólnionym odwzorowaniu innych fragmentów.



Rysunek 5.8. Współpraca kombajnu ścianowego z przenośnikiem ścianowym (opracowanie własne).

Posługując się przykładem przenośnika zgrzeblowego pracującego w zmechanizowanym kompleksie ścianowym (rys 5.8), model interakcyjny pozwala zdefiniować kilka warstw funkcjonalnych. Stanowią je mogą: odcinki trasy przenośnika zgrzeblowego, zgrzebla przenośnika, lokalizacja na długości ściany (np. z podziałem na sekcje obudowy), trasa kombajnu, kombajn ścianowy oraz dyskretne porcje urobku przemieszczające się pomiędzy wyszczególnionymi grupami obiektów. Należy zauważyć, że kombajn porusza się własną trajektorią ruchu, analogicznie jak zgrzebla przenośnika, natomiast urobek bezpośrednio z calizny węglowej przypisany być może do kombajnu, następnie do lokalizacji fizycznej, z której zostaje on załadowany w całości lub części na poruszające się zgrzebla, skąd zmierza w kierunku okna ścianowego. Na opisanym poziomie szczegółowości kombajn i zgrzebla przenośnika stanowią więc osobne obiekty ruchome, poruszające się po własnej trasie z pewną prędkością a wypadkowym wynikiem interakcji obu układów jest rozpatrywany ruch dyskretnej porcji urobku. Co istotne, ruch urobku zasadniczo nie pokrywa się z ruchem kombajnu ani też zgrzebel przenośnika, gdyż te obiekty poruszają się w dwóch różnych kierunkach. Dla przenośnika zgrzeblowego oznacza to wyszczególnienia trasy górnej i dolnej (powrotnej), przy czym tylko jedna z

nich pokrywa się częściowo z kierunkiem odstawy urobku. Zakończenie trasy górnej wymaga więc implementacji rozładunku, zatem wskazanie odcinka trasy na przenośniku, w którym urobek opuszcza zgrzebla przenośnika.

5.4.1. Cechy funkcjonalne i oczekiwana stosowalność

Opracowanie modelu interakcyjnego najogólniej rzecz ujmując wynikało z konieczności posiadania modelu pozwalającego na precyzyjne odwzorowanie interakcji pomiędzy obiektami uczestniczącymi w procesie transportowym, które to często mają charakter złożony.

Model interakcyjny został opracowany w sposób wykorzystujący w pełni możliwości obiektowego języka programistycznego. Umożliwia on precyzyjne odwzorowanie pracy ciągłych, jak i dyskretnych – samojezdnych maszyn i urządzeń transportowych z zastosowaniem skomplikowanych reguł, co do ich zachowania i wzajemnych interakcji, jak również interakcji z przestrzenią oraz lokalizacją funkcjonalną, w obrębie której się znajdują.

Model został również opracowany z myślą o weryfikacji i uzupełnieniu działania modelu rekurencyjnego, szczególnie w aspekcie jego ograniczonych możliwości odwzorowania wzajemnej interakcji obiektów. Z uwagi na to, że model umożliwia bardzo precyzyjne odwzorowanie reguł sterujących procesem transportowym, jego wykorzystanie jest wskazane przede wszystkim w zakresie oceny sterowalności samego procesu transportu urobku. Z uwagi na możliwość zablokowania ruchu i inne interakcje, m.in. w aspekcie stanu sprawności maszyny, model ten może stanowić podstawę do oceny niezawodności procesu odstawy w sytuacji nagłej awarii obiektów modelowanego systemu. Możliwość uzyskania wysokiej szczegółowości odwzorowania procesu w pełnym spektrum symulacji lub w sposób ograniczony do zadanej grupy obiektów lub fragmentów ciągu transportowego stanowi o skalowalności modelu.

5.5. Uogólniony model punktów załadunkowych

Jedną z podstawowych trudności wynikających z realizacji tematu pracy jest problematyka związana z zapewnieniem właściwego odwzorowania punktów załadunkowych urobku. W tym celu na potrzeby niniejszej pracy opracowano uogólniony model punktów załadunkowych, który w założeniu umożliwiać powinien precyzyjne odwzorowanie cech właściwych dla wielu rodzajów punktów załadunkowych urobku w kopalniach podziemnych, opisanych we wcześniejszej części pracy. Model opracowany został na podstawie przeprowadzonych badań grupy przodków ścianowych oraz pozostałych punktów nadawy zawartych w rozdziale 3.3.

Danymi wejściowymi dla modelu punktu załadunkowego są następujące grupy parametrów:

- miejsce załadunku;
- harmonogram pracy punktu załadunkowego:
 - liczba zmian,
 - godzina rozpoczęcia pierwszej zmiany,
 - czas przerw produkcyjnych,
 - współczynnik zmienności czasu przerw,

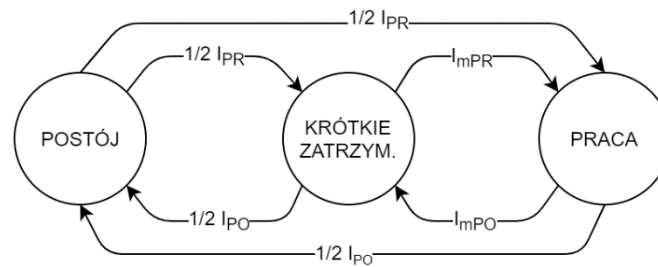
- prawdopodobieństwo zmiany konserwacyjnej,
- czas realizacji zmiany konserwacyjnej.
- czasowe cykle pracy punktu załadunkowego:
 - intensywność (prawdopodobieństwo) rozpoczęcia nadawy w określonym czasie t ,
 - intensywność (prawdopodobieństwo) zatrzymania nadawy w określonym czasie t ,
 - intensywność (prawdopodobieństwo) wstrzymania nadawy w określonym czasie t ,
 - intensywność (prawdopodobieństwo) zakończenia wstrzymania nadawy w określonym czasie t .
- zatrzymania związane z postępowaniem eksploatacji:
 - maksymalny postęp do zatrzymania,
 - czas zatrzymania,
 - zmienność czasu zatrzymania.
- cechy wydajnościowe:
 - wysokość, zbiór, prędkość ruchu (urabiania):
 - wartość średnia,
 - zakres zmian prostego błędzenia losowego,
 - skala pojedynczej zmiany w prostym błędzeniu losowym,
 - prawdopodobieństwo zmiany wartości w błędzeniu losowym,
 - zakres zmiany losowej (bez pamięci),
 - prawdopodobieństwo zmiany losowej (bez pamięci).
- cechy jakościowe:
 - uzysk netto objętościowy,
 - gęstość węgla,
 - gęstość kamienia,
 - współczynnik rozluźniania urobku.
- współczynnik korelacji czasu pracy i wydajności jednostkowej;
- rozkłady użyte do odwzorowania procesów stochastycznych;
- prędkość ruchu ciągnika przenośnika (m.in. w celu odwzorowania kumulacji urobku na przenośniku zgrzeblowym).

Współczynnik korelacji czasu pracy z wydajnością stanowi miarę zjawiska zidentyfikowanego w trakcie analizy danych empirycznych w rozdziale 3.3. Dłużej trwającym czasem wydobywania na zmianie zwykle towarzyszyły największe wydajności jednostkowe, pomimo że w założeniu parametry te należałoby rozpatrywać jako zmienne niezależne. Można to interpretować w ten sposób, że na ogół brak przerw produkcyjnych lub malejący udział przerw jednorazowych związanych z rozruchem kompleksu pozwala na osiągnięcie większej wydajności jednostkowej np. prędkości posuwu kombajnu, co dodatkowo może wynikać z charakteru oddziaływań uciążliwości warunków geologiczno-górnictwa, które ograniczają zarówno czas pracy, jak i jednostkową wydajność.

Odwzorowanie kalendarza produkcyjnego, w tym głównie tygodniowego rytmu pracy, odbywa się na poziomie parametryzacji modelu załadunkowego dla poszczególnych dni, dzięki czemu uniknięto dodatkowego skomplikowania samego modelu załadunkowego.

Uzyskane w ramach zrealizowanych badań przebiegi czasowe produkcji na ogół różnią się od ilustracji poglądowych dostępnych w literaturze, są jednak bardzo zbliżone do uzyskanych w rozdziale 3.3 danymi empirycznymi. Jak stwierdzono w warunkach rzeczywistych, proces wydobywania ma charakter bardzo nieciągły. Model wyszczególnia dwa rodzaje przerw, tzw. postoje długie oraz postoje krótkie. Wynika to z faktu, że analiza cykli pracy maszyn górniczych w wielu przypadkach ujawniała nietypowy rozkład czasu trwania cyklu pracy i postoju kompleksu ścianowego. Odwzorowanie stanu

pracy jedynie dwoma stanami, ujętymi w procesie Markowa, stanowiłoby zbyt dalekie uproszczenie z uwagi na dużą ilość krótkich zatrzymań oraz trwające zwykle kilkadziesiąt minut bloki wyższej intensywności czasowej nadawy – które zostałyby pominięte. Wyszczególnienie dwóch stanów pozwoliło w tym przypadku na bardziej precyzyjne odwzorowanie przebiegu produkcji, dając możliwość jednoczesnego zastosowania dwóch par intensywności, lecz nie obligując do tego bezpośrednio poprzez hipotetyczną możliwość wyłączenia jednej z nich. Osiągnięto to poprzez wprowadzenie tzw. stanów pośrednich, będących cechą i poddziedziną stanu obserwowanego i nie zmieniających zachowania podstawowego cyklu praca–postój (rys. 5.9).



I_{PR} - Intensywność przejść do stanu dłuższej pracy	I_{mPO} - Intensywność przejść do stanu krótkiego zatrzymania
I_{PO} - Intensywność przejść do stanu dłuższego postoju	I_{mPR} - Intensywność przejścia ze stanu krótkiego zatrzymania do stanu pracy

Rysunek 5.9. Odwzorowanie stanów pracy kompleksu ścianowego za pomocą łańcucha Markowa (opracowanie własne).

Niezbędną w celu kalibracji modelu wartość spodziewanego czasu załadunku oraz całkowitą nadawę urobku wyrażoną w jednostce objętości (rejestrwane podczas zmian produkcyjnych i bez uwzględnienia przerw w funkcji postępu), określić można za pośrednictwem wzorów 5.4, 5.5 oraz 5.6.

$$U_{zm} = \frac{T_{PR}}{T_{PR}+T_{PO}} \cdot \frac{T_{mPR}}{T_{mPR}+T_{mPO}} \quad 5.4$$

$$T_{dob} = 86400 \cdot U_{zm} \cdot i_z \cdot t_z \quad [s] \quad 5.5$$

$$Q_{dob} = T_{dob} \cdot h \cdot v \cdot z \quad [m^3] \quad 5.6$$

gdzie:

- T_{PR} , T_{PO} , T_{mPO} , T_{mPR} – średnie czasy pracy i postoju wynikające z intensywności zmian stanów pracy, wartości odczytywane z rozkładów empirycznych badanych przodków ścianowych,
- U_{zm} – udział czasu wydobywania podczas obłożonej zmiany produkcyjnej,
- t_{dob} - czasu wydobywania w ujęciu dobowym [s],
- i_z – liczba zmian produkcyjnych dobowo,
- t_z – czas trwania zmian produkcyjnych [s],
- Q_{dob} – Wydobywanie dobowe w jednostce objętości [m^3],
- h – wysokość ściany [m],
- v – prędkość urabiania [m/s],
- z – zabiór [m].

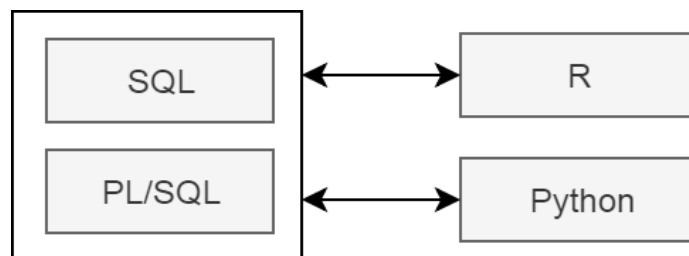
Odwzorowanie wolnych zmian parametrów wydajnościowych takich jak: wysokość, zabiór, prędkość przeprowadzono za pomocą algorytmu prostego błędzenia losowego spełniającego własność łańcucha Markowa. Przy czym założono, że zarówno skala zmiany, prawdopodobieństwo wystąpienia zmiany, jak i rozkład wartości (dystrybuanta) przypisane stanom dyskretnym mogą podlegać

szczegółowej parametryzacji. W modelu nie odwzorowano trendu deterministycznego, aczkolwiek byłoby to możliwe poprzez dodanie wartości stałej trendu. Model punktów ładunkowych uwzględnia osobno również tzw. przerwy chroniczne – wynikające z organizacji pracy w przodku, a w szczególności czasu wymaganego na transport i zmianę załogi.

5.6. Użyte oprogramowanie

Opisane w rozdziale modele zostały zaimplementowane w języku Python w wersji 3.4.3. oraz w języku SQL oraz PL/SQL środowiska bazy danych Oracle w wersji 12c. Skrypty pozwalające na wizualizację danych zostały opracowane w języku Python oraz środowisku R. Osobny model różnic skończonych, opracowany na wczesnym etapie badań i eksperymentów symulacyjnych, intensywnie rozwijany celem identyfikacji kluczowych założeń opisanych w rozdziale 4, został przygotowany w środowisku Matlab (model ten nie został szczegółowo opisany w pracy z uwagi na fakt, że nie spełniał w wymaganym stopniu potrzeb analizy wielokryterialnej procesu).

Pomiędzy poszczególnymi elementami środowiska symulacyjnego obejmującego model interakcyjny oraz rekurencyjny, stworzono dedykowane interfejsy. Z ich wykorzystaniem dane wejściowe symulacji, a nawet wyniki pochodzące z innego modelu, mogły zostać wczytane jednocześnie przez oba opisane modele symulacyjne bez konieczności zbędnych przekształceń. Ostatecznie całe środowisko symulacyjne odpowiadające za skomunikowanie modeli składało się z elementów napisanych języku SQL, PL/SQL oraz Python. W celu raportowania danych użyto częściowo środowiska Python (dotyczyło to wizualizacji na mapach) oraz wykresów przygotowanych w skryptach języka R, które pobierały dane z relacyjnej bazy. Strukturę tę przedstawiono na rysunku 5.10.



Rysunek 5.10. Środowiska użyte w celu realizacji modelu symulacyjnego (opracowanie własne).

Następnie, w celu wprowadzenia danych wejściowych, podglądu konfiguracji, jak i wyników otrzymywanych z modelu, oraz diagnostyki działania środowiska symulacyjnego, opracowano uproszczony interfejs użytkownika w postaci aplikacji bazodanowej, pozwalającej na:

- wprowadzenie i parametryzację obiektów transportowych,
- budowę i wizualizację struktury obiektów,
- wczytanie przestrzennych danych górniczych,
- wczytanie punktów przestrzennych określających położenie obiektów,
- określenie właściwości punktów ładunkowych na podstawie wprowadzonych harmonogramów eksploatacji i szablonów uzyskanych w trakcie badań empirycznych,
- sterowanie przebiegiem symulacji,
- dostęp do wyników symulacji i ich wizualizację na wykresach,

- weryfikację poprawności obliczeń.

Interfejs symulacji został opracowany w formie aplikacji webowej oraz widoków zdefiniowanych w strukturze relacyjnej bazy danych pozwalających na odczyt z poziomu środowiska R oraz Python. Wybór aplikacji webowej jako podstawowego interfejsu podyktowany był w głównej mierze łatwością implementacji w środowisku Oracle APEX, stanowiącym integralną część bazy danych. Opracowana aplikacja webowa posiadała trzy podstawowe grupy zakładek, obejmując:

- konfigurację modelu – definicja obiektów uczestniczących w symulacji, struktura połączeń, konfiguracja punktów załadunkowych,
- sterowanie symulacją – parametryzacja symulacji, wybór obiektów i harmonogramów załadunku urobku,
- wyniki symulacji – wyniki w formie tabelarycznej i wykresu sporządzone dla obiektów symulacji, wizualizacja na schemacie dróg odstawy, kalibracja punktów załadunkowych, zagregowane przebiegu czasowe, statystyka sporządzona dla źródeł urobku.

Wygląd interfejsu symulacji został zaprezentowany na rysunku 5.11.

ID segmentu	Numer symulacji	Typ	Prawd. >99%	Prawd. >95%	Wartość średnia (z pominięciem zer)	Wartość średnia (ogółem)	Współczynnik wystąpienia wartości niezerowych	Wartość maksymalna
56	2	Przepływ	176,40	118,80	70,59	28,43	0,4030	288,00
57	2	Przepływ	115,20	72,00	45,51	10,36	0,2280	226,80
58	2	Przepływ	115,20	72,00	45,60	10,40	0,2280	241,20
61	2	Przepływ	118,80	82,80	48,66	11,94	0,2450	226,80
62	2	Przepływ	118,80	82,80	48,92	11,90	0,2430	234,00
63	2	Przepływ	118,80	82,80	48,61	11,93	0,2450	226,80
65	2	Przepływ	403,20	309,60	162,44	91,46	0,5630	604,80
66	2	Przepływ	36,00	3,60	18,33	1,01	0,0550	72,00
67	2	Przepływ	10,80	0,00	14,36	0,34	0,0230	68,40
68	2	Przepływ	900,00	795,60	486,48	283,51	0,5830	900,00
71	2	Przepływ	910,80	727,20	384,16	284,84	0,7410	1 260,00

Rysunek 5.11. Ilustracja wyglądu interfejsu graficznego – widok na tabelę z parametrami statystycznymi opisanymi na danych wyjściowych z modelu (opracowanie własne).

System transportowy stosowany w zakresie odstawy urobku stanowi zespół współpracujących maszyn i urządzeń tworzących strukturę o ściśle określonych parametrach. Stąd też należy zaznaczyć, że realizacja badań symulacyjnych w opracowanym modelu rekurencyjnym z uwagi na jego charakter ograniczona została w głównej mierze do parametryzacji i diagnostyki modelu z poziomu interfejsu symulacyjnego. Zupełnie inaczej wyglądał proces budowy modelu interakcyjnego, który wykorzystywał dane pobrane z interfejsu symulacji, jednak w wielu kwestiach wymagał on precyzyjnej parametryzacji zachowania obiektów za pośrednictwem skryptów w języku Python. Stan ten wynikał z roli, jaką realizował model interakcyjny, gdzie eksperymenty symulacyjne realizowane były w specyficznych, narzuconych przez użytkownika warunkach. Dotyczy to między innymi scenariusza, który oceniał zachowanie ciągłości procesu transportowego w sytuacjach awaryjnych.

6. Metodyka badań i analiz wielokryterialnych

Kwestią zasadniczą dla osiągnięcia aplikacyjnego wymiaru pracy jest umiejscowienie analizy wielokryterialnej w obrębie istniejącej praktyki zarządzania procesem transportowym w kopalni podziemnej. W tym zakresie wśród podstawowych zadań realizowanych przez komórki organizacyjne realizujące nadzór nad przebiegiem procesu transportu urobku wymienić należy m.in. (Gołdys i in. 2014):

- formułowanie założeń techniczno-organizacyjnych w zakresie rozwoju szkieletu produkcyjnego, tworzenia strategii inwestycyjnej oraz remontowo-modernizacyjnej majątku produkcyjnego,
- wypracowywanie planów produkcyjnych, remontowych i inwestycyjnych oraz nadzór nad ich realizacją w kopalni,
- koordynacja w zakresie zapewnienia wymaganego wyposażenia technicznego,
- koordynacja procesów logistycznych w aspekcie zabezpieczenia ruchu kopalni,
- wdrażanie nowych rozwiązań technicznych i technologicznych w ramach prowadzonych robót górniczych i systemów transportu urobku,
- nadzór nad utrzymaniem urządzeń eksploatacyjnych w pełnej sprawności technicznej i gotowości ruchowej, prowadzenie prawidłowej gospodarki eksploatacyjno-konserwacyjnej urządzeń z uwzględnieniem maksymalizacji efektu ekonomicznego,
- doskonalenie kierunków rozwoju przedsiębiorstwa przez stosowanie w opracowywanych projektach i dokumentacjach nowych rozwiązań technicznych i technologicznych, mając na uwadze wzrost efektywności ekonomicznej,
- opracowywanie założeń do Planu Techniczno-Ekonomicznego w aspekcie ustalania kierunków postępu technicznego,
- utrzymywanie istniejących oraz budowa nowych dróg transportu,
- utrzymanie w prawidłowym stanie wyrobisk górniczych i dróg transportowych,
- prawidłowa zabudowa i eksploatacja maszyn i urządzeń w wyrobiskach dołowych,
- utrzymanie we właściwym stanie technicznym użytkowanych maszyn i urządzeń,

Można zauważyć, że wymienione zadania ukierunkowane są stricte na rzecz właściwego planowania, rozwoju i modernizacji funkcjonujących systemów transportu przemysłowego. Tym samym w domyśle w podobnej formule i zakresie zdefiniowane mogą być poza górnictwem podziemnym. Jednocześnie w wielu gałęziach przemysłu można odnotować analogiczny wzrost wymagań w zakresie oszczędności energii, minimalizacji wpływu na środowisko oraz dostosowania do sytuacji rynkowej zarówno w aspekcie kosztów, jak i asortymentu produkcji. Nie są to indywidualne cechy branży górniczej, której szczególnym wyznacznikiem jest konieczność pogodzenia zwłoczności charakterystycznej realizowanej działalności z elastycznością, wymaganą w wielu kluczowych aspektach m.in. w odpowiedzi na zdarzenia nieplanowane. Uwzględniając dodatkowo specyficzną, przestrzenną i czasową lokalizację procesów transportowych, opisana problematyka stawia specyficzne dla górnictwa podziemnego wyzwania przed planistami i inżynierami dążącymi do optymalizacji procesów transportu urobku w zakresie właściwego doboru i utrzymania rozwiązań technicznych, jak i w aspekcie reguł organizacji procesu oraz nadrzędnego sterowania jego przebiegiem.

6.1. Klasyfikacja kluczowych scenariuszy wsparcia decyzyjnego

Rozpatrywane w kontekście pracy problemy badawcze, ze względu na przedmiot, zakres, stan badań, rolę i inne czynniki na ogół stanowią bardziej problemy natury praktycznej aniżeli teoretycznej. Cele badań mogą być jednak formułowane w sposób bardziej ogólny lub też cząstkowy, co ma swoje bezpośrednie odzwierciedlenie w szczególności docelowych modeli symulacyjnych. Można w tym zakresie zastosować podział, który został zaproponowany przez S. Ziemskiego i S. Nowaka (Nowak 1985). Wyodrębniają oni typy badań:

- generalizujące,
- diagnostyczne, w tym:
 - heurystyczne,
 - weryfikacyjne.

Badania heurystyczne odkrywają właściwości badanego procesu lub jego genezę i inne istotne cechy (Apanowicz 2000). Natomiast w wyniku zastosowania badań weryfikacyjnych sprawdza się postawioną diagnozę (hipotezę). Badania weryfikacyjne dążą także do uchwycenia różnego rodzaju zależności pomiędzy przyczynami i skutkami. Weryfikacja zależności prostych między zmiennymi i ich wskaźnikami może przebiegać zasadniczo w postaci rozumowania indukcyjnego lub dedukcyjnego. Nie opisują one bezpośrednio zjawisk rzeczywistych obserwowanych zmysłami, lecz opisują ich uproszczone modele zwane niekiedy typami idealnymi. Najczęściej wymienianymi funkcjami hipotez w systemie wiedzy naukowej są funkcje: odkrywcza, wyjaśniająca, predykcyjna i praktyczna.

Wyniki symulacji mogą przyjąć formę ogólną dla danego rozwiązania lub poszczególne parametry m.in. dodatkowe wskaźniki mogą być zestawione dla fragmentów układu lub poszczególnych obiektów uwzględnionych w symulacji, celem znalezienia punktów „zapalnych” i/lub „wąskich gardeł” i dalszej ewaluacji rozwiązania. Interpretacja i dalsze wykorzystanie wyników symulacji stanowi jednak osobny problem z zakresu analizy strukturalnej i inżynierskiej oraz w ograniczonym zakresie optymalizacji inżynierskiej. Samo dotarcie do bardzo dobrego rozwiązania może być wysoko iteratywnym procesem. Zwracając uwagę na cel poznawczy (tj. eksplorację; opis; wyjaśnienie i przewidywanie; interpretację i zrozumienie), wyróżnić można badania eksploracyjne, opisowe, wyjaśniające i rozumiejące.

Identyfikacja kluczowych przypadków użycia wielokryterialnych analiz procesów transportowych jest wymagana w aspekcie wykonania adekwatnych założeń, co do użyteczności formułowanych modeli symulacyjnych, pozwalających na dostarczenie skutecznego wsparcia decyzyjnego w zidentyfikowanych scenariuszach przewidzianych zakresem pracy. Zatem opracowane modele symulacyjne powinny pozwalać przede wszystkim na analizę i ocenę alternatywnych rozwiązań w kontekście głównych kryteriów decyzyjnych wskazanych w rozdziale 2.2. W odniesieniu do zakładów górniczych oznacza to głównie wsparcie w zakresie:

- projektowania systemu odstawy urobku,
- organizacji i dostrajania (regulacji) procesów transportowych,
- operacyjnego sterowania procesem transportowym.

W związku z powyższym w pracy zaproponowano podział na trzy kluczowe grupy problemów wymagających wsparcia decyzyjnego w zakresie analizy i wielokryterialnej oceny procesu transportowego:

- wsparcie planowania w ujęciu strategicznym, obejmujące analizę procesu transportowego w długim, na ogół ruchomym horyzoncie czasowym,
- badania operacyjne ukierunkowane na wielokryterialną optymalizację powtarzalnych problemów w celu opracowania racjonalnych zasad, reguł i wytycznych realizacji procesu,
- wsparcie operacyjne (on-line) i testy funkcjonalne opracowanych rozwiązań, obejmujące m.in. projektowanie i weryfikację algorytmów nadrzędnego sterowania procesem transportowym (ang. *Advanced Proces Control*, APC) w zadanych warunkach oraz testy przebiegu procesu w warunkach skrajnych.

Wymienione zastosowania różnią się diametralnie wymaganiami co do efektów końcowych oraz sposobu i celu realizacji analizy wielokryterialnej. Jednakowoż we wszystkich przypadkach analiza wielokryterialna stanowi narzędzie wsparcia procesów decyzyjnych. Ponadto wymienione scenariusze wsparcia są ściśle ze sobą powiązane, pomimo że posiadają różne horyzonty czasowe. Utrzymanie spójnego modelu poprzez ich systemową integrację i wymianę wyników daje największe możliwości. Wszystkie trzy grupy stanowią zbiór zagadnień dziedzinowych, związanych z planowaniem procesu transportowego, we wszystkich trzech przypadkach wsparcie decyzji ma na celu ocenę alternatywnych rozwiązań techniczno-organizacyjnych, tym niemniej różnią się zasadniczo, między innymi horyzontem czasowym, w jakim należy rozpatrywać skutki decyzyjne.

Planowanie ciągów odstawy urobku ma wymiar długofalowy – strategiczny i obejmuje cały układ transportowy. Tymczasem kształtowanie zasad realizacji procesu transportowego w drodze badań operacyjnych – ma charakter bardziej użytkowy, racjonalizujący i uogólniający reguły dostępne pośrednio do wykorzystania w strategicznym planowaniu elementów (m.in. węzłów układu) lub zadań operacyjnych. Wsparcie operacyjne natomiast, jako ostatnie z wyodrębnionych zastosowań, obejmuje zwykle horyzont czasowy, na tyle krótki, że formułuje specyficzne warunki dotyczące szybkości z jaką zwracane być powinny wyniki, nie pozostawiając czasu na budowę lub manualną aktualizację lub weryfikację stanu modelu (tab. 6.1).

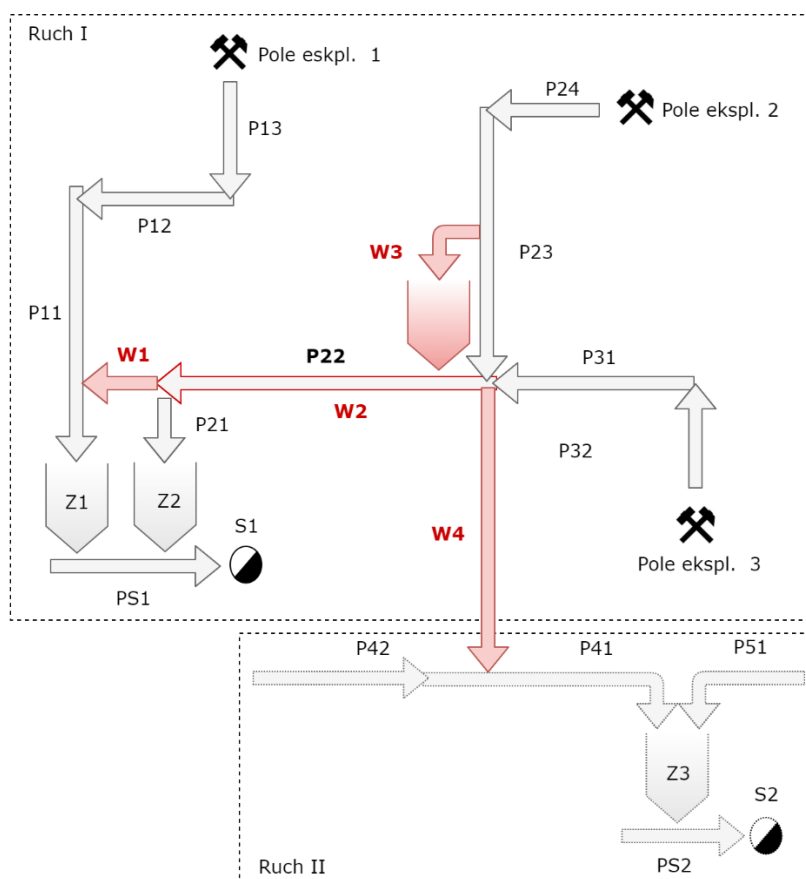
Tabela 6.1. Charakterystyka scenariuszy wsparcia decyzyjnego (opracowanie własne).

	Wsparcie planistyczne (WPL)	Uzupełniające zadania badawcze (UZB)	Wsparcie operacyjne i testy (WOiT)
Typ	Diagnostyczny	Generalizujący	Diagnostyczny
Czas	Bardzo długi	Właściwy z uwagi na losowość procesów	Krótki
Zasięg modelu	Holistyczny	Fragment lub uproszczenie całości	Holistyczny (może zostać ograniczony w przypadku testów)
Wymagana szczegółowość odwzorowania	Średnia	Zróżnicowana (właściwa z uwagi na rozpatrywany problem)	Bardzo duża
Ilość danych wejściowych i wyjściowych, stopień agregacji	Wysoka agregacja i ilość danych wejściowych / wyjściowych	Ograniczona agregacja	Minimalna agregacja
Niepewność założeń	Wysoka	Mała	Średnia
Złożoność modelu	Wysoka - model rzeczywisty rozszerzony o długofalowe plany rozwoju	Niska – model hipotetyczny, zastępczy, uniwersalny, nieokreślony, typ idealny	Średnia – model rzeczywisty rozszerzony o predykcję procesu
Rodzaj działań	Twórczy	Twórczy, bilansujący, alokacyjny, działania operacyjne	Bilansujący, działania operacyjne

Zagadnienia badawcze ujęte w analizie wielokryterialnej na ogół mają bezpośrednie lub pośrednie przełożenie na dane wejściowe i postać użytego modelu symulacyjnego, co wymaga rozróżnienia poszczególnych celów i warunków realizacji analizy. Przy czym jednym z najtrudniejszych aspektów niniejszej pracy jest odwzorowanie planów długookresowych, na ogół wieloletnich. Ich wykonanie następuje w dynamicznym i złożonym otoczeniu cechującym się szybkimi zmianami procesu, założeniami co do planu oraz ograniczeniami swobody działania. Temu zastosowaniu, jako najbardziej charakterystycznemu dla podziemnych kopalń postanowiono poświęcić najszerzej uwagę.

6.2. Uogólniony przykład wsparcia decyzyjnego

W celu przedstawienia opisywanej problematyki w niniejszym rozdziale posłużono się prostym, ale reprezentatywnym przykładem, przybliżającym rzeczywistą problematykę stosowania badań symulacyjnych procesów transportowych w obrębie istniejących systemów odstawy urobku w kopalniach węgla kamiennego.



Rysunek 6.1. Uproszczony – przykładowy układ odstawy urobku kopalni węgla kamiennego (opracowanie własne).

Począwszy od 2010 roku w Polsce można obserwować liczne działania zmierzające do łączenia kopalń węgla kamiennego w zakłady składające się z więcej niż jednego ruchu. Przykład stanowią mogą tu m.in. KWK Knurów–Szczygłowice, KWK Jastrzębie–Bzie, KWK Borynia–Zofiówka wchodzące w skład Jastrzębskiej Spółki Węglowej. Można zatem rozważyć teoretyczny model kopalni, której uproszczony schemat transportowy został przedstawiony na rysunku 6.1. Kopalnia ta posiada dwa szyby

wydobywcze S1 oraz S2 znajdujące się na odpowiednio na ruchu I oraz ruchu II kopalni. Kopalnia początkowo prowadzi wydobywanie w dwóch polach wydobywczych na ruchu I – polu eksploatacyjnym 1 oraz 2. Wraz z upływem czasu kopalnia uruchomiła dodatkowe pole wydobywcze na ruchu I – oznaczone na rysunku 6.1 jako pole 3. W związku z zakładanym harmonogramem wydobywania zachodzi konieczność przetransportowania urobku z dwóch pól wydobywczych – pola 2 oraz 3 trasą złożoną z przenośników P22 oraz P21, w niektórych okresach z równoczesnym wydobywaniem realizowanym w polu 1. Zaistniała sytuacja może doprowadzić do stanu, w którym przenośnik P22 lub P21 zostanie przeciążony lub zasypany urobkiem. Krytyczny jest też stan, w którym rejon szybu S1 nie będzie w stanie przyjąć wymaganej ilości urobku, co może skutkować zatrzymaniem wydobywania w co najmniej jednym z pól.

Do potencjalnych korzyści związanych z rozwojem zaistniałej sytuacji zaliczyć można wdrożenie rozwiązania, które zwiększyłoby bezpieczeństwo i poziom retencji urobku w systemie, zredukowało zużycie energii i materiałów eksploatacyjnych lub też dostarczyłoby możliwości selektywnego wydobywania na powierzchnię urobku o różniących się parametrach jakościowych, m.in. w drodze separacji urobku kamiennego z robót przygotowawczych.

Rozpatrywane scenariusze działania obejmować mogą wiele zmian techniczno-organizacyjnych rozpatrywanych dalej jako warianty składające się z określonych inicjatyw. Wśród podstawowych wymienić tu można między innymi:

- Działanie I – zabudowa krótkiego przenośnika umożliwiającego załadunek do zbiornika nr 1 przy szybie S1 z kierunku pola 2 oraz 3 (W1),
- Działanie II – modernizacja przenośnika taśmowego P22 do szybu S1 ukierunkowaną na zwiększenie zdolności transportowych z jednoczesnym dostosowaniem prędkości do wymaganej wydajności (W2),
- Działanie III – budowa nowego zbiornika i układu sterowania jego rozładunkiem (W3)
- Działanie IV – budowa nowej trasy przenośnikowej do rejonu szybu S2 (W4),
- Działanie V – zmiana organizacji zmian roboczych umożliwiająca bilansowanie maksymalnej wydajności w czasie,

Próba rozwiązania opisanego problemu decyzyjnego doprowadziła ostatecznie do następujących konkluzji:

- konieczny jest odpowiednio długi horyzont czasowy, aby ocenić w pełni koszty i korzyści, jakie daje zabudowa zbiornika lub budowa nowego ciągu transportowego, najkorzystniejsza w tym zakresie byłaby analiza w dostępnym cyklu życiowym kopalni (ang. *Life of Mine*, LOM) przy uwzględnieniu warunków niepewności,
- niezbędne jest uwzględnienie dostępnego harmonogramu eksploatacji wraz z uwzględnieniem niepewności dotyczącej założeń jego realizacji,
- konieczne jest uwzględnienie wpływu niespodziewanych jak i chronicznie występujących zdarzeń i rozkładów zmiennych losowych warunkujących parametry nadawy,
- nieodzowne jest uwzględnienie cech eksploatacyjnych i niezawodnościowych istniejących i planowanych obiektów – efektywność, wydajność, dostępność (serwisowalność), awaryjność (uszkodzalność i naprawialność obiektu) celem ustalenia przebiegu procesu w warunkach krytycznych,
- wymagany jest szczegółowy projekt rozczinki oraz aktualna mapa możliwych połączeń transportowych,

- analiza uwzględniać powinna czas wymagany na budowę nowych obiektów i dróg transportowych – analizę wielokryterialną należy przeprowadzić z wymaganym wyprzedzeniem w czasie,
- należy uwzględnić i zweryfikować sposób sterowania procesem transportu i retencji urobku,
- należy zweryfikować możliwość ciągłej pracy w okresach „przejściowych”,
- należy uwzględnić decyzje podejmowane na bieżąco przez dyspozytora kopalni,

Należy jednocześnie zaznaczyć, że realizacja symulacji długookresowej dla 25 lat eksploatacji pól wydobywczych z krokiem czasowym wynoszącym 1s szacunkowo dla modelu symulacyjnego o zmiennych rozproszonych (PDE) wyniesie w przybliżeniu 1 bilion 950 mld obliczeń (siatka 10m, krok czasowy 1s), dla modelu ze zmiennymi skojarzonymi (ODE) ok. 39 mld obliczeń, dla modelu z symulacją zdarzeń dyskretnych (DES) – 1 mld 800 tys. zdarzeń (dla elementu masy 1Mg).

Tabela 6.2. Horyzont czasowy wsparcia decyzyjnego (opracowanie własne).

Horyzont wsparcia	Wsparcie decyzyjne
Strategiczny	Ocena inwestycji i pozostałych rozwiązań w długim horyzoncie czasowym z uwzględnieniem: <ul style="list-style-type: none"> – zmian harmonogramu eksploatacji, – zmian systemu w czasie – oddziaływana zewnętrzne, – czasu niezbędnego na przebudowę systemu, – nieprzerwanej realizacji procesu transportowego.
Pośredni	<ul style="list-style-type: none"> – testy systemu z uwzględnieniem zmian planów produkcyjnych, – testy wpływu przesunięcia zmian, – testowanie optymalnej pojemności i stanu zbiornika gwarantującego określony stopień ciągłości pracy odstawy, – testy zasadności regulacji prędkości taśmy P22 i sterowna adaptacyjnego kłapą zbiornika,
Operacyjny	<ul style="list-style-type: none"> – określenie możliwości adaptacyjnego sterowanie kłapą, – sterowanie kłapą w czasie rzeczywistym, – nadążne sterowanie prędkością taśmy przenośnika P22, – ocena sytuacji kryzysowej (zmiana m.in. zmiana kierunku strugi), – operacyjne mieszanie lub separacja strug urobku z użyciem zbiorników i przesypów dwudrożnych.

Zamieszczony w rozdziale przykład pozwala stwierdzić, że rozwiązanie części problemów decyzyjnych umiejscowionych w obrębie kopalni podziemnej wymaga równoległego zastosowania zróżnicowanego układu lub też „federacji” współlistniejących modeli symulacyjnych (tab. 6.2) pokrywających zróżnicowane kryteria analityczne niż jednego uogólnionego modelu. Toteż szczególnego znaczenia nabiera właściwa komunikacja, rozumiana jako wymiana danych pomiędzy poszczególnymi adaptacjami modeli symulacyjnych. Kwestie te zostały zidentyfikowane jako istotne i zostały bardziej szczegółowo opisane w dalszych rozdziałach.

6.3. Wsparcie operacyjne i testy (Scenariusz WOT)

Zastosowanie modeli symulacyjnych na potrzeby wsparcia decyzyjnego i testów rozwiązań może obejmować bardzo krótki horyzont czasowy oraz konkretny, szczegółowy stan modelowanego procesu i realizującego go systemu transportowego. Takie zastosowanie jest bardzo specyficzne, wymaga bowiem precyzyjnego odwzorowania rzeczywistych warunków realizacji i szczegółowej symulacji w stosunkowo krótkim horyzoncie czasowym, uwzględniając zarówno dyskretne (pojazdy), jak i ciągle elementy systemu oraz zachowanie osób lub układów sterujących przebiegiem procesu.

Rozwiązania tego rodzaju obejmować mogą przede wszystkim:

1. Projektowanie oraz testy funkcjonalne szczegółowych rozwiązań funkcjonalnych o charakterze techniczno-organizacyjnym, wliczając w to metody nadrzędnego sterowania procesem transportowym.
2. Wsparcie decyzyjne w konkretnej, zaistniałej sytuacji:
 - kierowanie ruchem urobku i stanem wyjść ze zbiorników oraz bieżąca ocena sytuacji i wsparcie decyzyjne dla dyspozytora kopalni na bazie predykcji spodziewanych parametrów pracy systemu,
 - analiza sposobu alokacji i przydziału zadań dla poszczególnych maszyn samojezdnych na zmianie roboczej (częściowo wraz z programowaniem liniowym),
 - predykcja mieszania się strug urobku.

Cechą specyficzną operacyjnych zastosowań analiz wielokryterialnych jest to, że odnoszą się one do bliższej przyszłości lub też służą wyłącznie do określania szczegółowych mechanizmów organizowania, zarządzania i sterowania procesem transportowym w konkretnych warunkach. Dokonywana predykcja jest na ogół podyktowana przewidywanym rozwojem stanu obecnego, z niepewnością co do efektów zdarzeń losowych, które mogą wystąpić w najbliższej przyszłości. Tego rodzaju zastosowanie może również przyjąć formę:

- testów funkcjonalnych (testów w warunkach skrajnych, oceny warunków stabilności rozwiązań i zakresu parametrów bezpieczeństwa) obejmujących m.in.: projektowanie optymalnego układu sterowania procesem dla zadanych warunków i stanu w sytuacji, gdy praktyka eksploatacyjna nie może dostarczyć dostatecznej ilości wyników,
- wsparcia w zakresie nadrzędnego sterowania i koordynacji procesu transportowego, mającego na celu niedopuszczenie do powstania sytuacji krytycznej wraz z wielokryterialną analizą możliwych scenariuszy rozwoju rozpatrywanej sytuacji poprzez wdrożenie:
 - nowego planu działania,
 - planu przeciwdziałania lub reakcji na niekorzystne okoliczności.

Wykorzystanie modeli symulacyjnych w zakresie wsparcia decyzyjnego może służyć określeniu cech konkretnego rozwiązania, jak również dostarczyć wskazówek, co zrobić, aby nie doprowadzić do niekorzystnej sytuacji, co umożliwi opracowanie szczegółowych procedur zachowania w konkretnych warunkach przy niewielkim stopniu generalizacji pozyskanej w ten sposób wiedzy. Jest to możliwe wyłącznie po wygenerowaniu i przeliczeniu wielu wariantów rozwoju sytuacji bieżącej w warunkach odwzorowania wysokiej szczegółowości procesu transportowego, nie powodując tym samym wypaczenia wyników symulacji.

Jednym z najbardziej zaawansowanych możliwych zastosowań jest wykorzystanie modeli symulacyjnych w aspekcie wielokryterialnej oceny procesu transportowego w ujęciu ciągłym z

wykorzystaniem tzw. regulatora pracującego z ruchomym horyzontem (ang. *Model Predictive Control*, MPC). Tego rodzaju zastosowanie pozwala na określenie wartości zmiennych sterujących, będących przedmiotem ciągłej optymalizacji z wykorzystaniem programowania liniowego lub programowania ograniczeń. Jest to zastosowanie szczególne, gdyż może wymagać użycia symulacji działającej na danych udostępnianych on-line z układów AKPiA, zabudowanych na obiektach realizujących proces transportu lub pośrednio związanych z nimi urządzeniach zasilających.

Analiza stanu bieżącego procesu transportowego z uwagi na ograniczony horyzont czasowy, może przybierać bardziej cechy analizy przyczynowo-skutkowej aniżeli analizy wielokryterialnej. Jednak rozpatrując wsparcie decyzji operacyjnych i szczegółowe testy funkcjonalne, jest swoistym etapem zadań związanych ze wsparciem procesów planistycznych w szerszym horyzoncie czasowym. Stąd realizacja powyższych zadań badawczych może być podyktowana nadrzędnym celem i stanowić nieodzowny etap realizacji procesów planistycznych o szerszym zakresie.

6.4. Uzupełniające zadania badawcze (Scenariusz UZB)

Uzupełniające zadania badawcze realizowane w obrębie wielokryterialnej analizy procesów transportowych w najogólniejszym ujęciu mają na celu wyznaczenie warunków optymalnej realizacji procesów transportowych w aspekcie powtarzalnego problemu lub mocno uogólnionego zagadnienia, co za sprawą rozpatrywanej sytuacji decyzyjnej sprawia, że wyniki modelu mogą posiadać pewne uniwersalne zastosowanie. Realizacja uzupełniających zadań badawczych ma zatem na celu rozwiązanie problemów powtarzalnych, poprzez wyznaczanie uniwersalnych reguł, formuł, zasad projektowania, doboru wyposażenia, organizacji, obejmując zadania optymalizacji o względnie wysokim stopniu uniwersalności. Wyznaczenie warunków optymalnej realizacji procesu może zostać dokonane w postaci m.in. charakterystyk doboru parametrów ruchowych dla ściśle określonych (zastanych w rzeczywistości) kryteriów. Stosowane uogólnienie jest więc równocześnie jedną z metod ograniczenia wpływu niepewności.

Uzupełniające zadania badawcze stanowią analizy ukierunkowane na cel rozwiązania konkretnego problemu związanego z realizacją procesów transportowych w górnictwie, toteż analizy te nie muszą obejmować całego procesu jak też odwzorowywać proces w warunkach wysokiej szczegółowości jak ma to miejsce w przypadku scenariusza WOT. Uzupełniające zadania badawcze obejmować mogą wyłącznie część procesu lub uproszczony, uogólniony model umożliwiający wielokryterialną analizę problemu badawczego w wydzielonym fragmencie funkcjonalnym i przestrzennym. Realizacja uzupełniających prac badawczych w niektórych zastosowaniach, głównie ze względu na podobieństwa w zakresie technologii i środków realizacji procesu może nie odbiegać znacząco od analizy procesów transportowych lub produkcyjnych stosowanych w innych branżach związanych z produkcją lub transportem. Jako typowe dla branży górniczej przykłady prac badawczych wymienić można wielokryterialną analizę:

- łącznych kosztów procesów transportowych w aspekcie pojemności projektowanego zbiornika urobku tj. z uwzględnieniem poprawy niezawodności procesu, kosztu budowy zbiornika, możliwości stabilizacji pracy przenośników taśmowych, możliwości technologiczne,
- procesów transportowych w aspekcie stosowania samojezdnych i zabudowanych na stałe maszyn i urządzeń transportowych z uwzględnieniem typowego postępu frontu eksploatacyjnego,

- zasad współpracy i doboru pod względem zadań transportowych różnych typów maszyn samojezdnych w ściśle określonych warunkach realizacji procesu (m.in. współpraca ładowarek i wozów odstawczych),
- właściwości (testy) uproszczonego układu transportowego w kontekście wyboru tras, doboru parametrów ruchowych, konstrukcyjnych i algorytmów sterowania części lub uproszczonej całości układu transportowego ciągu odstawy taśmowej w zależności od spodziewanej średniej wartości i zmienności nadawy urobku w czasie oraz jego cechów jakościowych (moc silników, długość, prędkość, szerokość, profil trasy, rodzaj zastosowanego przesypu),
- współpracy cyklicznych i ciągłych systemów transportu urobku z zastosowaniem zbiornika urobku (odstawa kamienia),
- zmian w organizacji pracy przodków wydobywczych i górniczych wyciągów szybowych,
- sposobów sterowania konkretną strukturą funkcjonalną (m.in.: sterowaniem zespołem kilku zbiorników, sterowaniem nadążnym prędkością taśmy, minimalnym i maksymalnym stanem wypełnienia zbiorników).

Uzupełniające prace badawcze mogą stanowić podstawę opracowania reguł wykorzystywanych na etapie planowania odstawy urobku, jak również weryfikować prawidłowość uproszczeń zastosowanych podczas realizacji badań symulacyjnych z użyciem modelu długoplanowego. Mogą tym samym warunkować zarówno prawidłowe wykorzystanie i konfigurację parametrów zastosowanych modeli zastępczych, jak i wspierać szeroko pojęty proces tworzenia nowych rozwiązań. Uzupełniające zadania badawcze dzięki usystematyzowaniu problemu i ścisłości stanowią nieodzowny i potężny instrument wsparcia w zakresie koncipowania nowych rozwiązań techniczno-organizacyjnych. Cechą charakterystyczną uzasadniającą wprowadzenie w ciąg planowania uzupełniających zadań badawczych, jest zasadność uogólnienia zidentyfikowanych problemów, jak i wniosków będących skutkiem realizacji analiz. Wyniki realizacji wielokryterialnych analiz w drodze badań operacyjnych stanowią mogą trwale obowiązujący element ciągłych procesów planistycznych opracowywanych dla konkretnych działań o charakterze organizacyjnym, bądź konceptualnym. W tym zakresie uzupełniające zadania badawcze dostarczyć mogą:

- ogólne wytyczne polityki, określające nie tyle właściwą reakcję organizacji na pewien problem lub sytuację, co sposób umożliwiający osiągnięcie założonego uprzednio celu,
- szczegółowe procedury działania w zadanych warunkach i sytuacjach obejmujące instrukcje działań i sposób ich koordynacji jaki należy przedsięwziąć w określonych okolicznościach,
- operacyjne przepisy i reguły postępowania opisujące dokładnie sposób i przebieg wykonania określonych czynności technicznych w obrębie transportu urobku.

Opracowane w scenariuszu UZB modele symulacyjne powinny charakteryzować się uniwersalnością umożliwiającą ich parametryzację pod kątem problemów występujących w praktyce. Zatem przedmiotowe prace badawcze winny uwzględniać zmienność całego spektrum zmiennych, tak aby wyniki ich realizacji mogły zostać sprawnie wykorzystane w drodze odczytu charakterystyk, równań lub tabel wartości. W ten sposób analizy obejmujące wsparcie procesów planistycznych i operacyjnych wykorzystywać mogą informacje dziedzinowe uzyskane w drodze zastosowania badań uzupełniających bez konieczności przeprowadzania dużej ilości obliczeń na rzeczywistym, bardziej szczegółowym i kompletnym modelu symulacyjnym. W efekcie tych działań skróceniu powinien ulec sumaryczny czas realizacji analiz przy zachowaniu szczegółowości modelu właściwej i wymaganej dla danego poziomu wsparcia decyzyjnego. Wynikiem czego w dużym stopniu realizacja uzupełniających prac badawczych podyktowana jest ograniczeniami w zakresie szczegółowości odwzorowania modeli użytych na poziomie wsparcia decyzyjnego.

Opisywane zastosowanie wielokryterialnych analiz danych może wchodzić w zbiór zadań związanych z wsparciem procesów planistycznych, gdzie realizacja uzupełniających zadań badawczych może być podyktowana nadrzędnym celem i stanowić nieodzowny etap realizacji procesów planistycznych. Zastosowanie to w głównej mierze obejmuje opracowanie lub weryfikację cząstkowych zasad budowy, organizowania i sterowania procesem transportowym. Powstały w ten sposób zbiór docelowych zastosowań, wymaga na ogół bardziej szczegółowego odwzorowania procesów transportowych i interakcji uczestników procesu a niżeli precyzyjnych założeń dotyczących rozwoju rzeczywistego systemu w przyszłości. Przykładowo w pewnych przypadkach mogą nie być wymagane jakiegokolwiek precyzyjne założenia odnośnie do nadawy urobku, stanu obecnego bądź planowanej ekspansji systemu w czasie. Celem realizacji symulacji może być odwzorowanie uogólnionych bądź czysto hipotetycznych warunków realizacji procesu za pomocą modelu symulacyjnego. Badania i analiza przebiegu procesu może posłużyć w tym przypadku do wyznaczenia charakterystyk i związanych z nimi zasad organizacji procesu transportowego w zależności od konkretnych warunków i istotności poszczególnych kryteriów decyzyjnych, przy czym model uogólniony dostarczając wiedzy w formie charakterystyk nie musi de facto uwzględniać istotności poszczególnych kryteriów, co stanowi zasadniczą korzyść. Należy stwierdzić, że uzyskiwane w ten sposób wyniki symulacji mogą stanowić wsparcie decyzyjne zarówno w sytuacji bieżącej, jak też mogą być powszechnie lub cyklicznie używane do rozwiązywania powtarzalnych problemów decyzyjnych. Przykładem takich analiz mogą być m.in.: zasady doboru maszyn samojezdnych, sposób wyznaczenia tras i reguły organizacji pracy dla określonych warunków i systemu eksploatacji lub też testy współpracy ciągłych i dyskretnych układów transportowych

Opracowanie rozwiązań technicznych w zakresie planowania strategicznego, w pewnym stopniu może być również poprzedzone hipotetycznymi testami fragmentów układu bądź uproszczonej całości w ściśle nieznanymi warunkach (warunkach niepewności), co wydaje się szczególnie uzasadnione na bardzo wczesnym etapie planowania rozwiązania docelowego. Pozwala to na badania zachowania (cech) obiektu w zależności od poziomu i rodzaju wymuszeń m.in. w warunkach uznanych za normalne i skrajne, celem określenia miar jakościowych i bezpieczeństwa pracy systemu. Do tego rodzaju zastosowań, zaliczyć można m.in.:

- testy funkcyjne zbiornika urobku w zależności od jego pojemności i sposobu sterowania jego stanem w kontekście wpływu tych cech na ciągłość procesu transportowego,
- opracowanie nowych zasad i reguł sterowania i organizacji pracy elementów systemu transportowego,
- testy alternatywne rozwiązań fragmentów lub uproszczeń układów transportowych w ściśle nieokreślonych warunkach (w warunkach niepewności).

Przedłożone zastosowania stanowią przestrzeń wspólną z opisanymi w poprzednim rozdziale testami rozwiązań, podstawowe różnice dotyczyć mogą szczegółowości oraz poziomu odwzorowania konkretnej sytuacji, przy czym scenariusz UZE odpowiada bardziej za badania generalizujące a WOT za badania diagnostyczne konkretnego układu.

6.5. Wsparcie procesów planistycznych (Scenariusz WPP)

Zagadnienie analizy procesów transportu urobku w kopalni w długim horyzoncie czasowym zbliżone jest do analizy transportu miejską siecią dróg, uwzględniając przy tym jednoczesny proces rozrostu i przebudowy metropolii. Porównanie to nie jest jednak do końca miarodajne, głównie z uwagi na fakt, że w kopalni wybierane zasoby mają szcerpywalny charakter, zachodzi zatem częsta przebudowa dróg transportowych i ich likwidacja, dodatkowo drogi odstawy urobku mogą tworzyć wielowarstwowy, trójwymiarowy układ z uwagi na przestrzenne, położenie wybieranych pokładów – jak ma to miejsce w przypadku kopalń węgla kamiennego. Jeżeli należałoby więc przeprowadzić jakieś porównanie, bardziej trafiony przykład stanowić może parking wielokondygnacyjny w którym poszczególne obszary w danej porze dnia są zapełniane lub opróżniane z jednoczesną ciągłą przebudową dróg dojazdowych i wyjazdowych oraz stochastyczną niepewnością co do założonego przebiegu tego procesu w czasie. Przykład ten w dostatecznym stopniu obrazuje stan bieżący, w którym odwzorowanie w narzędziach symulacyjnych wybranych elementów systemu transportowego takich jak zbiornik lub przenośnik taśmowy nie nastęcza trudności, jednak odwzorowanie działania złożonego układu transportowego na przestrzeni wielu lat podziemnej eksploatacji kopalni jest działaniem skomplikowanym i wymaga zastosowania zupełnie odmiennego, kompleksowego podejścia.

Scenariusz WPP stanowi bezpośrednie odwzorowanie wymagań zidentyfikowanych w tym obszarze. Toteż tematyka wsparcia decyzji planistycznych w średnim i długim horyzoncie czasowym została potraktowana w niniejszej pracy jako wiodące i kompleksowe zastosowanie analizy wielokryterialnej procesu. Scenariusz WPP opisany został najbardziej szczegółowo, głównie z uwagi na specyficzne wymagania w tym zakresie w przypadku kopalń podziemnych, uzasadnioną komunikację z pozostałymi scenariuszami oraz kluczową rolę, jaką pełni w pracy. Zastosowanie planistyczne stanowi więc szczególnie przypadek analizy procesu transportowego, charakterystyczny dla warunków prowadzenia podziemnej eksploatacji złóż kopalni.

6.5.1. Ogólna charakterystyka scenariusza

Analiza planistyczna ujęta w scenariuszu WPP obejmuje wybór rozwiązań technologicznych w zakresie transportu urobku, konfiguracji i alokacji infrastruktury w przestrzeni, dobór technicznych środków realizacji procesu transportowego oraz sposobów jego organizacji i regulacji. Jest to grupa problematycznych zagadnień o charakterze syntetycznym, obejmująca w szczególności budowę, rozbudowę bądź potencjalną przebudowę istniejącego układu transportowego. Decyzje podejmowane w scenariuszu WPP mają charakter strategiczny a skutki decyzji obowiązują w długim horyzoncie czasowym. Zasadniczą treść tego rodzaju zastosowań ma na celu przeanalizowanie sposobu realizacji procesu w określonych lub ściśle nieokreślonych warunkach, co zależy od sytuacji. Analiza ta dotyczy planów na przyszłość i wymaga predykcji przebiegu procesu w przyszłości, zwykle w drodze przyrównania do stanu aktualnego. Analiza realizowana w scenariuszu WPP:

- obejmuje cały układ transportowy, wszystkie istotne kryteria warunkujące jego przyszłe działanie, jak również ich zmiany w odpowiednio długim z uwagi na rozpatrywany przypadek horyzoncie czasowym,
- tworzy szczegółowe podglądy sytuacji, stanu procesu i zachowań symulowanego środowiska, testuje elementy systemu transportowego (model współpracy maszyn samojezdnych, kolei z systemem ciągłym, optymalny dobór pojemności zbiorników),

- ma charakter zbiorczy – wykorzystuje opracowane w ramach badań operacyjnych reguły, charakterystyki i modele zastępcze obiektów, których precyzyjne odwzorowanie w długookresowej symulacji procesu transportowego w obrębie całej kopalni nie byłoby uzasadnione,
- operuje na stanie obecnym i cechującą się niepewnością predykcji stanu przyszłego, gdzie niepewność ta może być wyrażona za pomocą modeli Monte Carlo,

Elementem kluczowym z uwagi na rodzaj zastosowania scenariusza WPP jest szczegółowy harmonogram lub harmonogramy (w przypadku analizy wieloscenariuszowej) wydobywania i prawdopodobieństwo jego wykonania w czasie.

Zważywszy na zmieniające się warunki realizacji procesu oraz zmienne losowe, okres symulacji w scenariuszu WPP powinien być wydłużony celem kompleksowej analizy i oceny alternatywnych rozwiązań. Stan ten formułuje specyficzne wymagania dla użytych w scenariuszu modeli symulacyjnych. W przypadku tego rodzaju zagadnień wskazana jest analiza procesu w ruchomym horyzoncie czasowym lub w kilku wytypowanych, newralgicznych sytuacjach, w których podjęta decyzja będzie wywierała istotny wpływ na proces transportowy. Realizacja modeli symulacyjnych w tym scenariuszu wymaga na ogół określenia nadrzędnych wymagań ujętych w projekcie kopalni, harmonogramie wydobywania, projekcie rozcinki złoża, jak również możliwości zaistnienia zjawisk o charakterze losowym, tudzież niepewności co do przyjętych założeń. Przykładem decyzji wymagających wsparcia decyzyjnego w opisywanym zakresie, oprócz standardowych czynności związanych z przebudową i rozwojem zasięgu sieci transportowej, mogą być następujące zadania planistyczne:

- wybór podstawowych technicznych rozwiązań w zakresie transportu urobku na etapie projektowania bądź rozbudowy kopalni,
- wyznaczenie lub zmiana lokalizacji komór maszyn ciężkich w czasie planowanej eksploatacji,
- projekt odstawy urobku obejmujący wyznaczenie dróg transportowych i szczegółowy dobór rozwiązań funkcjonalnych, obejmujący opcjonalne zmiany części istniejącej (bazowego wariantu i jego szerszych alternatyw) i alternatywne sposoby realizacji nowej części układu zgodnie z założeniami w zakresie eksploatacji złoża w czasie.

Wymienione zastosowania analiz wielokryterialnych są specyficzne, nie można wiarygodnie dokonać oceny alternatywnych rozwiązań na bazie uproszczonych symulacji stanu procesu w warunkach uznanych za normalne (ang. *load test*) oraz krytyczne (ang. *stress test*). Upraszczając układ transportowy oraz nie odwzorowując dokładnych założeń dotyczących jego ekspansji i eksploatacji, trudno jest zbadać oczekiwaną rolę i zachowanie poszczególnych gałęzi i elementów układu transportowego w przyszłości. Dotyczy to również kwestii organizacyjnych. Cykl życiowy poszczególnych elementów stałego układu transportowego jest stosunkowo długi. Określa go w głównej mierze dynamiczna sekwencja wymuszeń ze strony produkcji, a w konsekwencji lista zadań transportowych, do realizacji których element może być konieczny lub przydatny. W tej sytuacji uzasadnione wydaje się zawężenie symulacji w czasie poprzez przyjęcie uproszczeń dotyczących wymuszeń bądź nieodwzorowanie holistycznego charakteru systemu, w tym interakcji z pozostałymi elementami, także dynamiki jego zmian wymuszonych przez plany produkcyjne, gdyż w konsekwencji może skutkować nieprawidłowymi wynikami modelu. Z drugiej strony precyzyjna ocena pociąga za sobą konieczność uwzględnienia naturalnych niepewności wynikających z długiego horyzontu czasowego analizy, w tym głównie zmian w harmonogramie, spowodowanych czynnikami wewnętrznymi lub zewnętrznymi.

Zważywszy na to, że rozwiązanie wskazane jako najkorzystniejsze obejmuje długi okres czasu cechujący się niepewnością, docelowa jego forma może być zarówno traktowana jako ostateczna i niezmienna w czasie lub też w sposób bardziej elastyczny. W tym przypadku ostateczny „kształt” określa sekwencja następujących po sobie decyzji, a rozpatrywane rozwiązanie może ulec modyfikacji, również takiej, która nie jest obecnie przewidziana z uwagi m.in. na ograniczenia natury technologicznej lub formalnej. W takiej sytuacji uzasadnione jest zawężenie wsparcia decyzyjnego wyłącznie do aktualnej decyzji w pewien sposób warunkującej dalsze możliwości rozwoju (dalsze decyzje). Zagadnienie to prowadzi w konsekwencji do problemów zdefiniowanych w obrębie matematyki dyskretnej, kombinatoryki. Problematykę właściwego planowania można sprowadzić również do oceny dwóch lub więcej alternatywnych kierunków rozwoju sytuacji w aspekcie najbliższej decyzji, zakładając oszacowane prawdopodobieństwo realizacji zróżnicowanych planów eksploatacyjnych oraz szerokie prawdopodobieństwo dalszych zmian rozwiązania, jako następstwo zmian w planach. Kompleksowe rozwiązanie tego problemu wymaga opracowania wszystkich potencjalnie uzasadnionych i technicznie wykonalnych wariantów rozwiązań stanowiących kombinację decyzji, a następnie przeprowadzenia symulacji alternatywnych wariantów. W dalszej kolejności wyniki można poddać interpretacji względem możliwych kombinacji, gdyż część ścieżek decyzyjnych z oczywistych powodów może być odrzucona. Następnie poszczególne kombinacje mogą być przeanalizowane z zastosowaniem różnorodnych kryteriów decyzyjnych w odniesieniu do rozpatrywanej – obecnej decyzji i przewidzianej ścieżki decyzyjnej, gdzie kolejne podejmowane wraz z czasem decyzje cechują się zwiększoną niepewnością. W tym celu zastosować można jedno z kryteriów stosowanych w warunkach niepewności, wśród których wymienić można następujące propozycje (Redziak 2013):

- kryteria pesymizmu Walda (maksymalizacja minimalnych wyników),
- kryteria optymizmu Hurwicza (maksymalizacji największej zdobyczy),
- zawodu Savage’a (minimalizacja największego żalu),
- ostrożnościowe Szaniawskiego (maksymalizacja sumy ważonej),
- równej szansy Laplace’a (maksymalizacja oczekiwanej użyteczności).

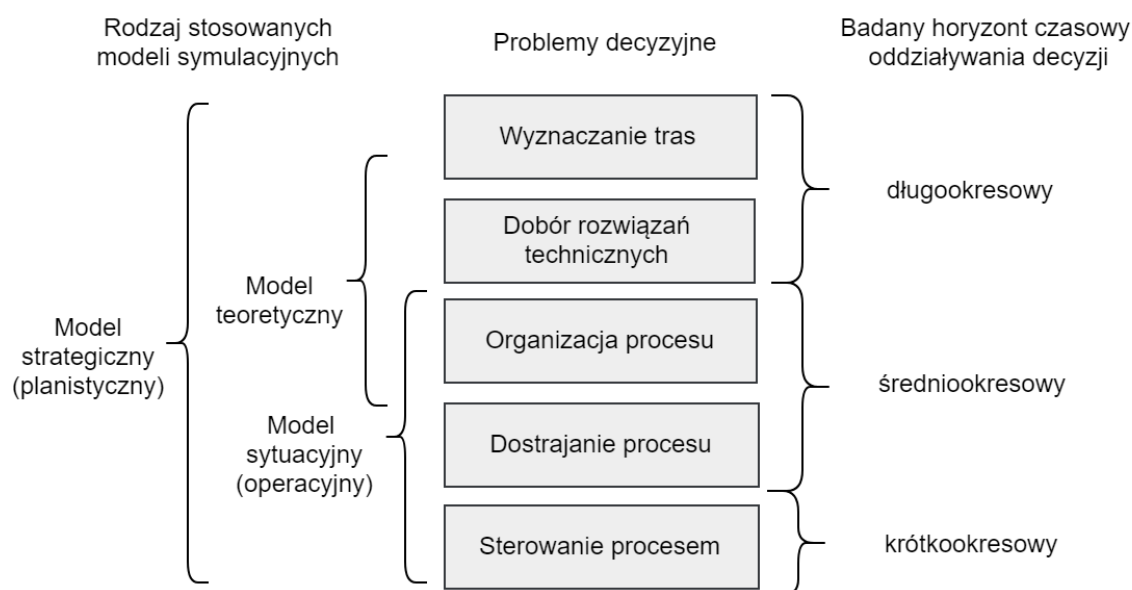
Aby dokonać oceny alternatywnych rozwiązań w scenariuszu WPP konieczna jest analiza planów na przyszłość i predykcja przebiegu procesu. W pewnych sytuacjach zasadne wydaje się odniesienie wyłącznie do stanu obecnego. Jednak analiza wyłącznie stanu bieżącego zasadniczo wyklucza jakiegokolwiek większe działania inne niż bieżące zmiany organizacyjne i wytyczne sterowania procesem transportowym. Zakres decyzji w takim zastosowaniu nie ma zwykle charakteru strategicznych decyzji, chociaż działania te mogą być dostosowane do różnych sytuacji występujących w długim horyzoncie czasowym.

6.5.2. Wymagania funkcjonalne

Szacować można, że ilość pomiarów parametrów takich jak przepływ urobku na 10 metrowych odcinkach dróg transportowych z okresem 1 s realizowanych na przestrzeni symulacji obejmującej 25 lat dla przeciętnej wielkości kopalni podziemnej prowadzącej eksploatację w Polsce wynosić może ok. 6,3 biliona. Dla 1-sekundowego okresu próbkowania przy założeniu, że obiekty funkcjonalne nie są podzielone na fragmenty to analogicznie ok. 40 mld pomiarów. W opisanych warunkach zapis sporządzony dla każdej tony urobku w obrębie 50 obiektów funkcjonalnych w modelu dyskretnym zajmie ok. 15 mld obserwacji związanych z czasem zmiany jej położenia w systemie. Przetwarzanie tak

dużych zbiorów danych jest problematyczne, co ma bezpośrednie odzwierciedlenie w strukturze funkcjonalnej przyjętych dalej rozwiązań.

Model symulacyjny realizujący wsparcie w tym scenariuszu powinien w pierwszej kolejności dostarczyć wskaźników podlegających ocenie wielokryterialnej związanych głównie z szeroko ujętą efektywnością i zabezpieczeniem ciągłości realizacji procesu w poszczególnych wariantach poddanych analizie. Należy mieć na uwadze, że ten rodzaj analizy ze względu na długi, a nawet bardzo długi okres oddziaływania skutków podjętej decyzji wymaga uwzględnienia odpowiednio długiego horyzontu czasowego. Dodatkowo model planowania strategicznego obejmować może wszystkie rodzaje podstawowych problemów badawczych ujętych w pracy (rys. 6.2) z wykorzystaniem innych scenariuszy niż WPP.



Rysunek 6.2. Problemy decyzyjne w planowaniu procesów transportowych (opracowanie własne).

Mimo że zgodnie z rysunkiem 6.2 niektóre decyzje operują w horyzoncie średnio- i krótkookresowym, należy mieć na uwadze fakt, że stanowią one o warunkach realizacji procesu, a zatem mogą one mieć decydujący wpływ na wynik rozpatrywanych problemów decyzyjnych o znaczeniu długookresowym.

6.5.3. Użyte komponenty i ich współpraca

Rolę modelu wiodącego w scenariuszu WPP ze względu na długi zasięg czasowy pełnić może Rekurencyjny Model Symulacyjny (RMS), jego kalibrowanie i uzupełnienie w zakresie kryteriów analitycznych wymagających osobnych eksperymentów, co realizowane być może przez Interakcyjny Model Symulacyjny (IMS).

RMS może zatem przekazywać do IMS zadania obejmujące:

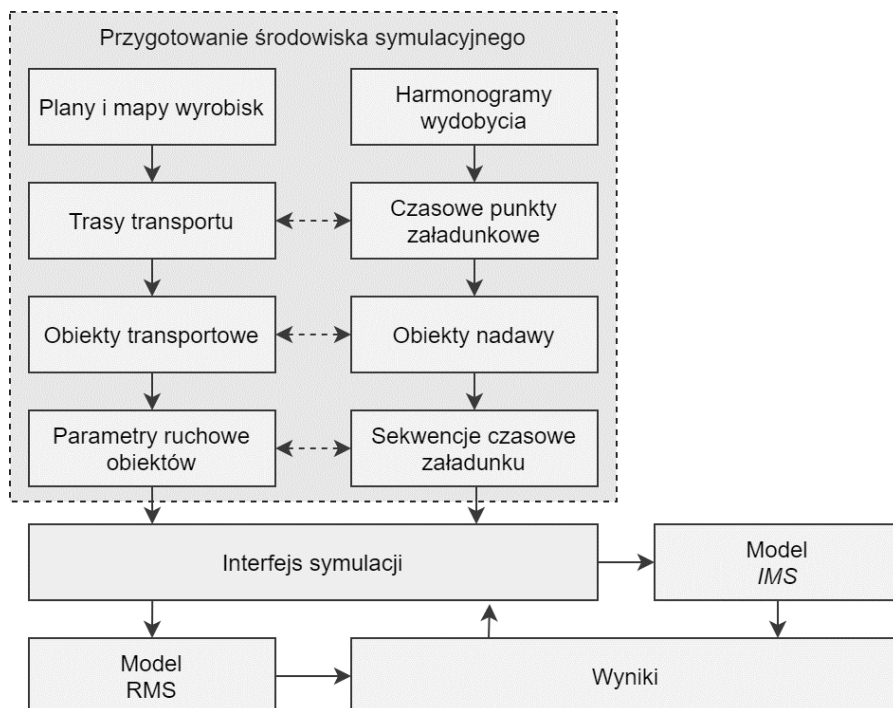
- weryfikację wyników,

- metodę uproszczenia układów transportowych,
- metody zastępcze mechanizmów nadrzędnego sterowania,
- test algorytmów sterujących i wyniki (skuteczność) zastępczego układu,
- testu ciągłości (niezawodności) wraz z uśrednionym stanem procesu.

IMS może przekazywać do RMS zadania obejmujące:

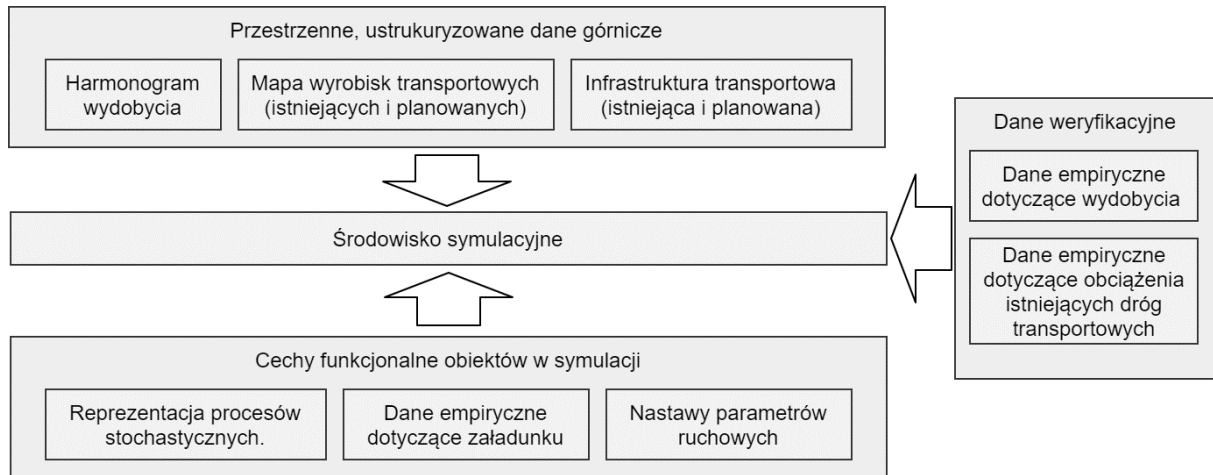
- warunki początkowe (stany stabilne modelu długookresowego),
- grupowanie stanu procesu w czasie (umożliwiające odejście od analizy dzień po dniu na rzecz, uogólnionych, podobnych stanów właściwych dla różnych okresów czasu).

Koncepcja tzw. modeli współpracujących poprzez interfejs symulacyjny stanowi zaproponowane w pracy rozwiązanie podstawowego problemu związanego z wymaganą precyzją, a jednocześnie sporym zasięgiem czasowym symulacji. Szczegółowo komponenty użyte w tym celu zostały opisane na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3. Budowa środowiska symulacyjnego z uwzględnieniem interfejsu symulacyjnego wykorzystanego w celu współpracy modeli (opracowanie własne).

Jak można stwierdzić analizując interfejs wymiany danych pomiędzy poszczególnymi komponentami przedstawionymi na rysunku 6.3, jednym z kluczowych zadań środowiska symulacyjnego jest uporządkowane przechowywanie obszernej ilości informacji na temat rzeczywistego procesu, przeszłych i spodziewanych w przyszłości warunków jego realizacji. Dane te mają na celu opracowanie i parametryzację obiektów symulacji, w szczególności obejmując budowę, przebudowę i utrzymanie obiektów bezpośrednio związanych z realizacją procesu transportowego.



Rysunek 6.4. Zbiory danych przekazane do środowiska symulacyjnego (opracowanie własne).

Istnienie wydzielonych obszarów informacyjnych wymaga również implementacji mechanizmów odpowiadających za wczytanie danych zewnętrznych do modelu. W przypadku scenariusza WPP minimalny zakres danych przedstawiony został na rysunku 6.4. Obejmuje on przede wszystkim przestrzenne, ustrukturyzowane dane górnicze, cechy funkcjonalne odwzorowywanych w symulacji obiektów oraz dane weryfikacyjne.

6.5.4. Przebieg badań symulacyjnych

Przebieg badań symulacyjnych realizowanych w ramach scenariusza WPP ma pierwszoplanowe znaczenie z uwagi na cel niniejszej pracy, toteż w dalszej części rozdziału opisano go w szczegółowy sposób, definiując jednocześnie warstwy funkcjonalne środowiska oraz modelu symulacyjnego, które są wykorzystywane na danym etapie.

6.5.4.1. Przygotowanie danych wejściowych

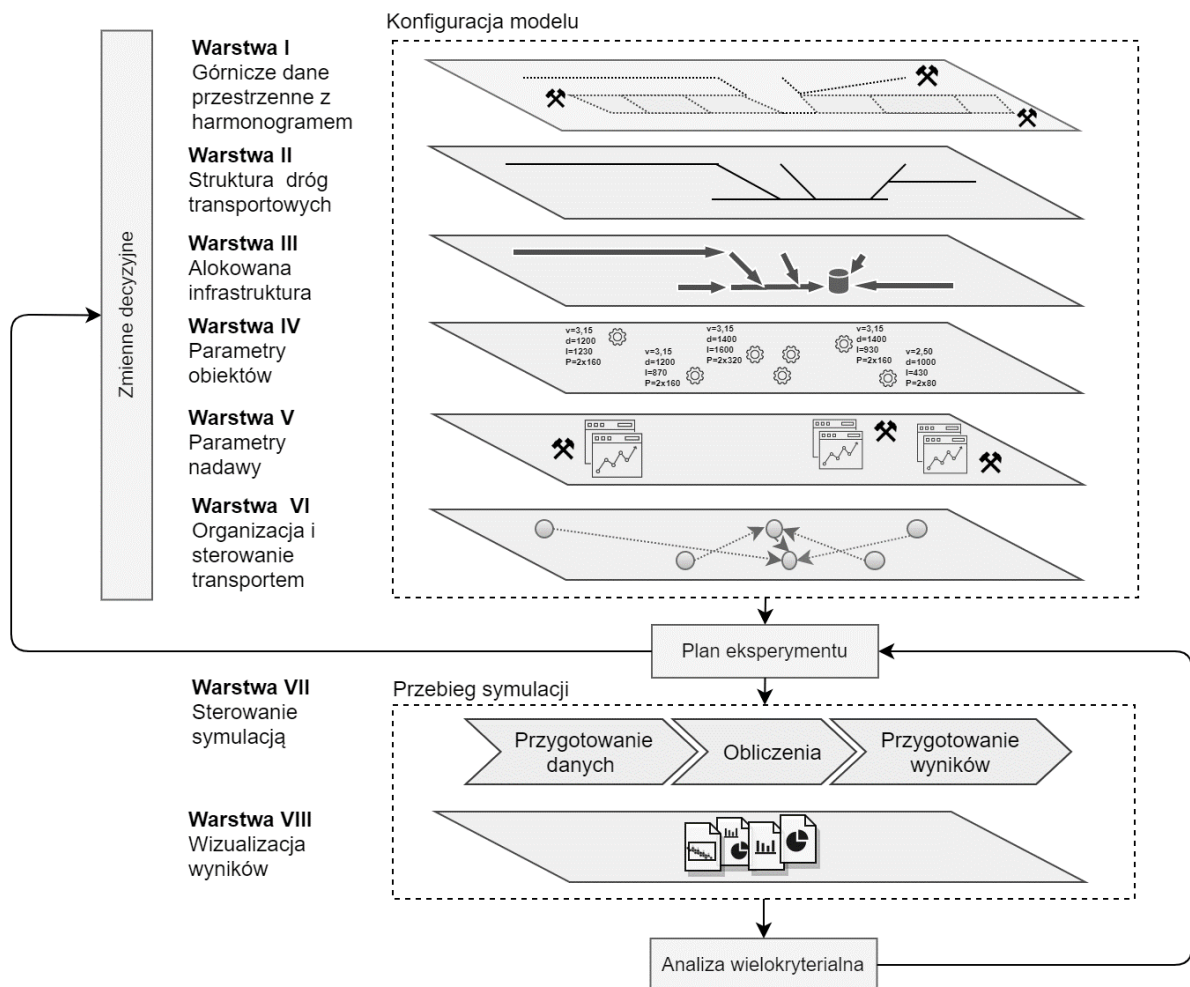
Przygotowanie danych wejściowych obejmuje zasadniczo proces pozyskania i przetworzenia danych wymaganych do konstrukcji modelu. Proces ten może być realizowany każdorazowo lub poprzez systematyczną aktualizację danych importowanych w formie cyfrowej z wykorzystaniem oprogramowania inżynierskiego klasy CAD, systemów planowania i harmonogramowania produkcji, środowiska GIS, systemów technicznych klasy SCADA, DCS lub pokrewnych środowisk baz danych. Zakres pozyskanych w tym celu danych obejmować może w szczególności:

- harmonogramy zadań produkcyjnych,
- projekt rozcinki złoża z wykazem robót i wyrobisk,
- górnicze dane przestrzenne wraz z mapą aktualnych wyrobisk,
- strukturę funkcjonalną i lokalizację środków realizacji procesu transportowego,
- empiryczne dane charakteryzujących pracę punktów załadunkowych,
- empiryczne dane charakteryzujących pracę środków realizacji procesu transportowego,
- przypisanie (mapowanie) zadań wydobywczych dla punktów załadunku.

Pozyskane zbiory danych można opisać z punktu widzenia środowiska symulacyjnego, jako przestrzeń obejmującą obszary powiązane wzajemnymi relacjami czasowymi lub funkcjonalnymi. Pozwala to dalej wyszczególnić następujące struktury danych wejściowych:

- górnicze dane przestrzenne (umiejscowione w przestrzeni i czasie zadania o założonych parametrach wyjściowych nadawy),
- strukturę dróg transportowych (istniejącą, planowaną),
- alokowaną infrastrukturę (przypisanie obiektów funkcjonalnych do odcinków trasy),
- parametry ruchowe obiektów,
- parametry nadawy w punkcie załadunkowym (korzystające z szablonów przepisy dot. załadunku),
- metody organizacji i sterowania procesem transportowym.

Wymienione obszary wraz mechanizmami umożliwiającymi przeprowadzenie symulacji tworzą kolejne warstwy funkcjonalne modelu symulacyjnego (rys 6.5).

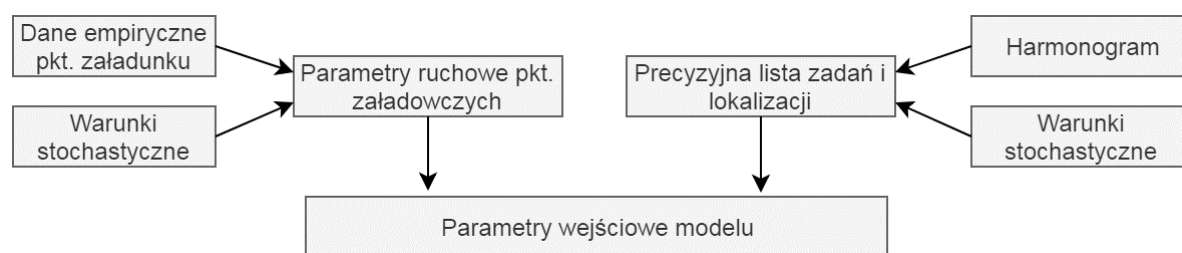


Rysunek 6.5. Ilustracja warstw funkcjonalnych modelu symulacyjnego (opracowanie własne).

Jedną z podstawowych cech procesu transportu urobku w górnictwie jest ciągła migracja punktów załadunkowych związana ze szcerpaniem zasobów w polu wydobywczym lub rejonie kopalni. Toteż analizując pierwszą z warstw modelu integrującą górnicze dane przestrzenne oraz harmonogramy robót, można zauważyć, że położenie punktów załadunkowych zmienia się wraz z kolejnymi cyklami urabiania lub wybierania drążonego przodka. W aspekcie wsparcia planistycznego zakładającego

długoterminową symulację w warunkach kopali podziemnej umożliwia to zastosowanie różnych podejść do odwzorowania miejsc załadunku:

- a) Odległość poszczególnych pól eksploatacyjnych (m.in. pól ścianowych) bez reprezentacji w postaci przebiegu trasy, na poziomie pola wyznaczany jest punkt zastępczy:
 - a. znajdujący się w środku pola wydobywczego,
 - b. znajdujący się na początku chodnika transportowego, a dla dalszych połączeń wyliczana jest odległość euklidesowa lub miejska przy znanym kątowym położeniu wyrobisk i lokalizacji punktu załadunkowego (odległość ta jest dodatkowo uwzględniana w wynikach obliczeń lub wpasowane w nią zostają dwie liniowe trasy odwzorowujące chodnika przyścianowy i transportowy).
- b) Każdy przodek ma wyznaczony i przypisany punkt załadunkowy na długości najbliższego chodnika transportowego będący przykładowo dla przodka ścianowego miejscem połączenia z chodnikiem podścianowym, pomiędzy rzeczywistym punktem załadunku a punktem na chodniku transportowym ulokowana zostaje trasa o dynamicznie zmiennej długości lub też odległość ta jest dodatkowo uwzględniana w wynikach obliczeń.
- c) Każdy przodek ma ściśle odwzorowany przebieg dróg transportowych (dla przodka ścianowego i chodników przyścianowych), trasa ta podzielona zostaje na skończoną ilość fragmentów (punktów odbioru). Każdorazowo podczas symulacji punkt załadunkowy przypisany zostaje do najbliższego punktu odbioru.



Rysunek 6.6. Przygotowanie stochastycznych danych wejściowych modelu (opracowanie własne).

Idąc dalej, należy zauważyć, że odwzorowanie miejsc załadunku w warstwie I (rys 6.5), obejmuje również kwestie bardziej precyzyjne, związane stricte z czasowym przebiegiem procesu urabiania (rysunek 6.6). Wobec tego w pracy postanowiono uwzględnić dwa rodzaje procesów stochastycznych – niepewności związane z zmianami planów wydobywania oraz warunki stochastyczne skumulowane stricte w obszarze wykonania (realizacji) planu. Przy czym można zauważyć, że oba obszary są w pewnym stopniu ze sobą powiązane, tj. stopień wykonania planu wymusza niejako dynamiczne dopasowanie dalszych planów eksploatacyjnych. W tym przypadku warstwa I modelu dostarczająca harmonogram zadań jest zwrotnie połączona z warstwą V – parametrami nadawy, a parametry nadawy ulegać mogą dalszym zmianom w rezultacie przebiegu badań m.in. w związku z oceną niezawodnościową. Uwzględniając powyższe, przy analizie planów wydobywania w niniejszej pracy w pierwszej kolejności będzie mowa o czynnikach natury ekonomicznej lub zdarzeniach górniczych warunkujących długotrwałe, istotne zmiany w harmonogramie eksploatacji. Zdefiniować można tym samym co najmniej trzy podejścia w zakresie wzajemnego oddziaływania wymienionych obszarów:

- sztywne ramy harmonogramu i losowa zmienność szczegółowego przebiegu procesu nadawy,
- losową zmienność harmonogramu i losową zmienność szczegółowego przebiegu procesu nadawy,

- losową zmienność szczegółowego przebiegu procesu nadawy wraz z dynamiczną korektą harmonogramu.

Dwa pierwsze warianty to wersje bez bilansowania – w ich przypadku należy więc w sposób manualny zadbać o brak odchyień w okresie analizy planu od normy lub wielokrotne powtarzanie eksperymentu z jednoczesną obserwacją rozkładu uzyskanych residuów. Istnienie sprzężenia zwrotnego w postaci korekt harmonogramu jest o tyle istotne, iż jego brak z definicji doprowadza do sytuacji, gdy ilość wydobytej kopaliny we względnie krótkich okresach czasu i zakresie przestrzeni może nie bilansować się z założeniami planistycznymi. W dłuższym okresie badań symulacyjnych, przyjmując rozkład normalny procesów stochastycznych zjawisko to nie prowadzi do istotnych przekłamań, a zakładając zmienny, na ogół nieznany opad stropu oraz przybierkę, zasadniczo można stwierdzić, że w pewnym stopniu ma to miejsce w rzeczywistości. Traktowanie harmonogramu w ujęciu a priori daje dodatkowo możliwość wybiórczego zastąpienia bloków symulacyjnych, co ma ogromne znaczenie w aspekcie wielokryterialnej oceny, planowania badań i kalibracji modelu.

Grupa informacji stricte przestrzennych obejmująca przebieg tras transportowych (warstwa II), jest podobnie powiązana z alokacją obiektów realizujących funkcje transportowe (warstwa III). Z wielu względów uzasadniony jest bowiem podział istniejącej sieci dróg transportowych współbieżnie z alokowaną infrastrukturą. Przy czym, warstwa opisująca infrastrukturę, może być zasadniczo przypisywana do struktury tras transportowych w sposób dynamiczny, na etapie planowania przebiegu nowych tras może to następować w sposób automatyczny poprzez algorytmizację tej czynności, która dodatkowo obejmować może optymalizację.

Kolejną warstwę modelu stanowią parametry techniczno-ruchowe obiektów zdefiniowanych w warstwie III, które mogą być modyfikowane bez zmian położenia lub rodzaju alokowanego środka transportu. Parametry ruchowe obiektów ujętych w symulacji mogą obejmować szereg ich właściwości w tym w szczególności:

- maksymalną pojemność,
- prędkość ruchu,
- moc i liczbę napędów,
- powierzchniową wytrzymałość na obciążenie urobkiem,
- średni czas wykonania cyklu transportowego,
- sposób inicjacji procesu transportowego.

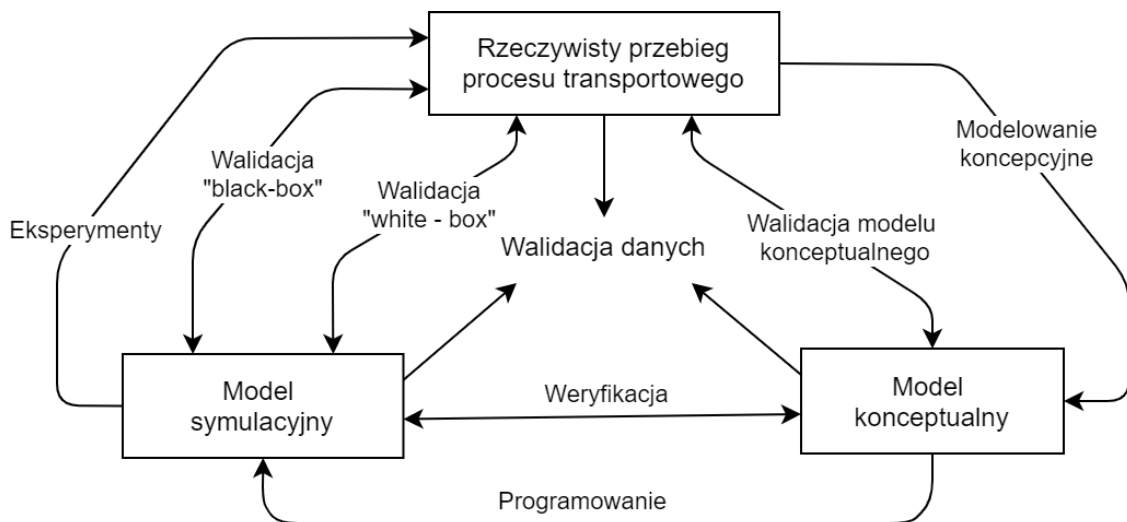
Dalsza ewaluacja parametrów ruchowych prowadzi stricte w kierunku parametrów związanych bezpośrednio z organizacją i sterowaniem procesem transportowym (warstwa IV), często operujących na poziomie holistycznym i odwołujących się do stanu innych obiektów symulacji. Definicje przyjęte w warstwie IV mogą oddziaływać na parametry ruchowe warstwy III przykładowo zwiększając lub zmniejszając nadążnie prędkość liniową taśmy przENOŚnika, w zależności od stanu procesu transportowego, a precyzyjniej spodziewanej wydajności. Reguły organizacji i sterowania procesem transportowym stanowią najbardziej zawiłą warstwę, która może tworzyć złożone schematy decyzyjne.

Nadrzędnym celem realizacji procesu transportu urobku jest obsługa punktów załadunku w zadanym czasie z wykorzystaniem istniejącej w danym momencie infrastruktury transportowej. Należy dodatkowo mieć na względzie niezbędne powiązanie dostępności (istnienia) rozpatrywanej drogi transportowej z realizacją zadania transportowego. Dotyczy to w szczególności planowanych wyrobisk transportowych, które muszą być wykonane w okresie objętym symulacją. Warstwa IV dodatkowo musi uwzględniać dostępność wymaganej infrastruktury, gdyż powołanie i likwidacja obiektów symulacji

mogą być realizowane na poziomie modelu z wykorzystaniem logicznego wyłączenia pewnych fragmentów odstawy urobku z ruchu i obliczeń.

6.5.4.2. Weryfikacja modelu symulacyjnego i przeprowadzenie wstępnej symulacji

Celem wykonania wstępnej symulacji jest ogólne potwierdzenie możliwości wykonania badań oraz weryfikacja i walidacja działania modelu. Wstępna symulacja na potrzeby scenariusza WPP wykonywana jest w modelu RMS. Realizując ten etap badań, należy przede wszystkim skupić uwagę na potrzebie weryfikacji i walidacji opracowanego modelu symulacyjnego. Precyzując interpretacje przedstawione w rozdziale 4.1.3, walidacja na tym etapie oznacza potwierdzenie, że działanie modelu w założonej dziedzinie zastosowań jest zasadne i zgodne z celami modelowania (Balci 2003). Weryfikacja natomiast oznacza stwierdzenie wystarczającej trafności transformacji jego konceptualnej formy (rys. 6.7).



Rysunek 6.7. Weryfikacja i walidacja modelu symulacyjnego (Robinson 1997).

W niniejszym przypadku walidacja modelu może być wykonywana przede wszystkim na podstawie analizy danych historycznych (*ang. historical data validation*), w tym w szczególności:

- zapisu przepływów masy w poszczególnych punktach nadawy i ich zgodności z uogólnionym modelem przepływu w gałęzi transportowej,
- bilansu mas wejściowych i wyjściowych,
- analizy współczynnika zmienności poziomu nadawy w ujęciu zmianowym, dobowym, tygodniowym dla poszczególnych, kalibrowanych źródeł nadawy w ujęciu plan-wykonanie.

Uzupełniające metody walidacji modelu obejmować mogą:

- analizę wrażliwości (*ang. parameter variability-sensitivity analysis*) i wariancji (*ang. variance analysis*) w drodze wielokrotnego powtarzanie symulacji stochastycznej w celu oszacowania rozkładów otrzymywanych wyników,
- walidację zdarzeniową (*ang. event validity*) w formie diagnostyki ruchu wyodrębnionych mas w dyskretnym systemie zdarzeniowym,

- konfrontację wyników otrzymanych z użyciem różnych modeli (RMS i IMS).

Poza wymienionymi sposobami weryfikacji i walidacji potencjalnie duże zastosowanie znaleźć mogą również (Karkula 2012):

- testy warunków ekstremalnych (*ang. extreme condition tests*),
- walidacja ekspertowa (*ang. face vaildity*),
- metody grafiki operacyjnej (*ang. operational graphics*),
- testy zgodności (*ang. goodness of fit tests*),
- animacja komputerowa.

Na szczególną uwagę zasługuje również metoda określenia przedziałów ufności (*ang. confidence intervals*), która w rezultacie repróbkowania danych wyjściowych z wielu eksperymentów, powinna pozwolić na określenie wymaganej liczby prób (symulacji) dla osiągnięcia zadanego poziomu błędu.

W dalszej kolejności po przeprowadzeniu wstępnej symulacji może być wykonane grupowanie wyników lub też założeń odnośnie do planów załadunkowych i wrywkowa kontrola wyników z zastosowaniem modelu IMS. Na podstawie doświadczeń symulacyjnych uzasadnione wydaje się, aby pierwsza z wykonanych symulacji zakładała proporcjonalny podział urobku w miejscach decyzyjnych, co ma za zadanie ustalenie tzw. warunków „pośrednich” i może zostać wykorzystane bezpośrednio do dalszego dostrajania procesu transportowego w aspekcie czasowego lub stałego wyboru alternatywnych dróg odstawy. Jest to szczególnie uzasadnione w odniesieniu do przyszłych warunków realizacji procesu, które w znacznej mierze pozostają nieznane. Realizacja symulacji długookresowej zakładającej podział urobku w stosunku 1:1 w miejscach podziału pozwala dodatkowo wykazać pełną sekwencję czasową punktów decyzyjnych umożliwiającą sterowanie kierunkiem odstawy urobku.

W trakcie wykonanych symulacji wstępnych zauważono wiele prawidłowości, wśród nich wymienić można zauważalnie mniejszy współczynnik zmienności wydobywania dobowego niż uzyskiwany w drodze eksperymentu uwzględniającego wypadkowe wydobywanie z niezależnych przodków ścianowych. Prawidłowość prawdopodobnie wynika z koordynacji przodków ścianowych prowadzonej w celu stabilizacji wydobywania dobowego kopalni.

6.5.4.3. Opracowanie planu eksperymentów oraz definicja scenariuszy podlegających analizie

Należy mieć na względzie, że symulacja w scenariuszu wsparcia procesów planistycznych funkcjonującej już kopalni zastaje stan aktualny i stara się przewidzieć konsekwencje związane z wyborem przyszłych rozwiązań techniczno-organizacyjnych ingerujących w istniejący proces transportowy. Przy czym zadanie to jest powtarzane przemieszczając się w ruchomym horyzoncie kolejnych momentów decyzyjnych. Rozpatrywany moment dotyczy więc szeregu kolejnych decyzji wraz z odpowiadającymi im sytuacjami i kontekstem. Realizacja symulacji w celu wsparcia decyzyjnego wymaga istnienia i odwzorowania w środowisku symulacyjnym tzw. zmiennych decyzyjnych, które opisywać mogą:

- sterowalne parametry punktów nadawy (organizacja wydobywania, dobór wyposażenia),
- zmianę głównych kierunku transportu (wybór dróg transportowych),
- alokację wyposażenia (ilościową i rodzajową),
- parametry ruchowe wyposażenia (nastawy zmienne) i automatyzację obiektową,
- organizację procesu i w przypadku środków samojezdnych wraz z kolejkowaniem zadań,

- operacyjne sterowanie i koordynację procesu.

Opisane zmienne powinny być uwzględnione w planie badań symulacyjnych, stanowiącym warstwę VII modelu zgodnie z rys 6.6. Od założeń przyjętych na tym etapie będzie zależeć, czy badaniom będzie podlegać jeden obszar decyzyjny, czy wszystkie jednocześnie, co ma bezpośredni wpływ na ilość rozpatrywanych scenariuszy i może w rezultacie generować potrzebę weryfikacji wielu różnorodnych kombinacji, co nie jest stanem pożądanym.

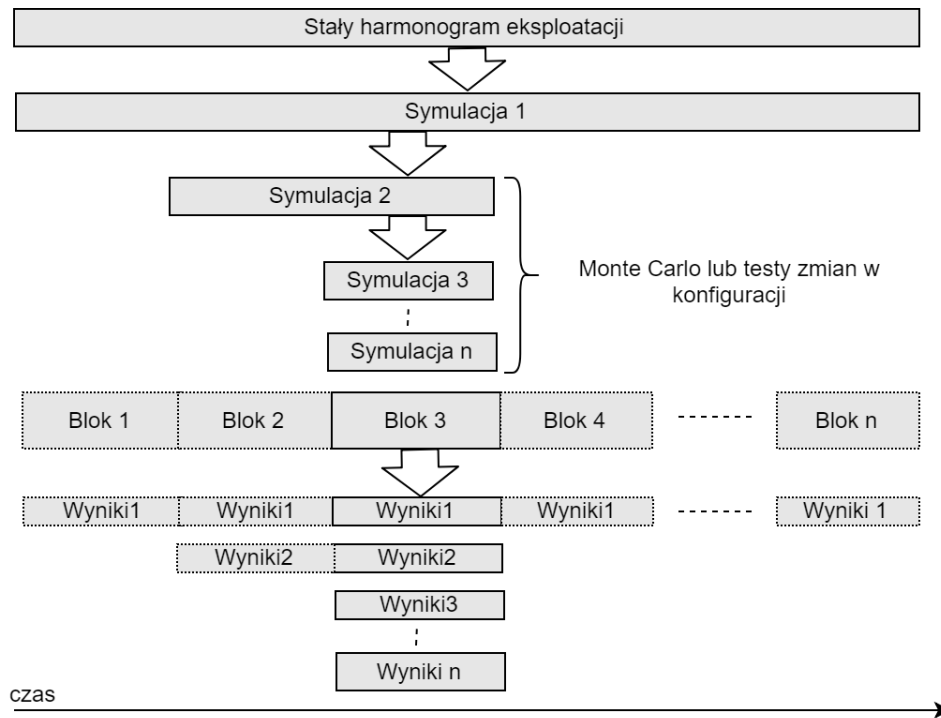
Uwzględniwszy fakt, że każda decyzja może wywierać wpływ na następne, ograniczenie możliwości decyzyjnych w odległej przyszłości może być bezpośrednią konsekwencją aktualnych działań. Z tego powodu uzasadnione wydaje się, aby analizować decyzje w czasookresie wynoszącym co najmniej cykl życiowy rozpatrywanego rozwiązania. W przypadku, gdy decyzja wiąże się z bezpośrednią realizacją prac górniczych m.in. budową zbiornika czy chodnika transportowego, okres oddziaływania decyzji może stanowić czas zakończenia eksploatacji w kopalni, co stanowi dosyć istotny problem. Projektowanie systemu odstawy urobku w drodze wielokrotnie powtarzanego cyklu budowy modelu i poszukiwania koncepcji rozwiązania problemów cząstkowych prowadzi w rezultacie do oceny sekwencyjnej (wieloetapowej), w której istotnego znaczenia nabiera ocena probabilistyczna drzewa decyzyjnego opisanego w funkcji czasu. Na końcowy przebieg realizacji procesu transportowego wpływa szereg dyspozycji podejmowanych kolejno w czasie, na ogół poprzedzających rozpoczęcie eksploatacji w nowym polu lub rejonie eksploatacyjnym. Nieodzowne jest zatem określenie głównych punktów decyzyjnych w funkcji czasu, a następnie cykliczne wykonanie kroczących badań wariantów zakładających różne rozwiązania w okresie oddziaływania kolejnych decyzji. Takie podejście sprzyja utrzymaniu aktualnego stanu modelu oraz umożliwia zastosowanie bardziej precyzyjnych danych wejściowych – aktualizowanych każdorazowo w punkcie decyzyjnym. Przy czym każdorazowo powinien zostać określony i wybrany tzw. optymalny scenariusz rozwoju systemu, obejmujący najbardziej korzystną sekwencję kolejnych w czasie decyzji i działań, jak również alternatywne scenariusze, określone jako akceptowalne. Rekomendowany wariant może zostać określony na podstawie optymalnej „ścieżki decyzyjnej” obejmującej następujące po sobie bloki symulacyjne i decyzyjne oraz cząstkowe cechy (miary) poddane analizie wielokryterialnej. W problemach o tak dużej złożoności kombinatorycznej należy się spodziewać, że stochastyczne metody poszukiwania pozwolą uzyskać najlepsze rezultaty. Tym samym w racjonalny sposób wybrany zostaje wariant, o w odniesieniu do którego, wartość oczekiwana kosztu jest najmniejsza lub użyteczności – największa (Tarnowski 1987).

Pewien problem stanowi jednak obszar nakładania się obszarów decyzyjnych związanych z różnymi aspektami realizacji procesu transportowego, co utrudnia opracowanie jednego zasadniczego drzewa decyzyjnego. Działania wynikające z procesu ciągłego doskonalenia, zagnieżdżone głównie w płaszczyźnie organizacyjnej, wymagać mogą ciągłego śledzenia lub predykcji różnych ich kombinacji, które mogą wzajemnie oddziaływać na uzyskane w ocenie wielokryterialnej wyniki. Nie wszystkie decyzje mają znamiona takie jak wybór dróg transportowych oraz alokowanie infrastruktury – które zakończone są podjęciem działań i których zmiana jest często niemożliwa do przeprowadzenia. Decyzje ujęte w obszarze organizacji i sterowania procesem transportowym, pomimo że są bardziej elastyczne, nie są jednak mniej ważne, mogą stanowić bowiem o warunkach efektywności konkretnego rozwiązania o strategicznym znaczeniu. Przykładowo wybór konkretnego scenariusza pod względem głównych kierunków transportowych może określać dalsze możliwości w zakresie m.in. alokacji wyposażenia i sterowania procesem. Założenia i szczegółowe rozwiązania przyjęte w zakresie sterowania procesem na etapie badań symulacyjnych, mogą zatem odgrywać zasadnicze znaczenie w kontekście oceny łącznej wariantu drogi transportowej, tak jak to wskazano w rozdziale 7.

Należy zaznaczyć, że szeroka typologia wspieranych decyzji wymaga elastycznego podejścia w aspekcie współlistnienia obszarów decyzyjnych, celu, czasu i zasięgu analizy oraz istnienia warunków niepewności. Najbardziej ogólny schemat realizacji badań symulacyjnych w scenariuszu WPP w aspekcie wyboru trasy transportowej, pozwala zdefiniować następujące etapy wielokryterialnej oceny:

1. Opracowanie koncepcji różnych wariantów rozwoju systemu transportowego.
2. Skonsolidowanie wariantów do postaci jednej nadmiarowej sieci transportowej ze wskazanymi punktami rozdziału urobku.
3. Wyznaczenie sekwencji punktów decyzyjnych odpowiadających m.in. za uruchomienie lub wyłączenie danej „gałęzi” transportowej zgodnie z harmonogramem procesu eksploatacji złoża.
4. Określenie powiązań decyzyjnych i oszacowanie niepewności związanej z realizacją założeń scenariusza w drodze oceny probabilistycznej.
5. Przeprowadzenie badań symulacyjnych dla różnych wariantów decyzyjnych (z pominięciem nieaktywnych dróg transportowych) wraz z niezbędnymi iteracjami wynikającymi z zastosowania modeli szczegółowych.
6. Analiza wielokryterialna wybranych wariantów uwzględniająca warunki niepewności.
7. Ocena i interpretacja wyników – identyfikacja najkorzystniejszych wariantów w aspekcie najbliższej z rozpatrywanych decyzji i jej skutków.

Przedstawiony schemat wymaga jednak przeprowadzenia szerszej dyskusji dotyczącej wyodrębnienia analizy wielokryterialnej jako osobnego etapu w scenariuszu WPP. Ponieważ spektrum zmiennych decyzyjnych obejmuje nie tylko decyzje związane z drogami odstawy urobku, trudno pominąć kwestie takie jak alokacja wyposażenia, dobór parametrów technicznych i ruchowych, sposób organizacji i sterowania procesem transportowym. Z tego powodu analiza wielokryterialna zostaje sprowadzona do etapu uszczegółowiania wariantów w drodze stosowania modeli pomocniczych prowadząc w rezultacie do racjonalizacji rozwiązania w aspekcie towarzyszących zmiennych decyzyjnych i ich wpływu na ostateczne kryteria oceny wariantu. Alternatywą dla tego stanu jest multiplikacja liczby wariantów decyzyjnych w drodze wprowadzenia dodatkowych kombinacji uwzględniających inne zmienne decyzyjne. Zagadnienie to jest o tyle istotne, że określone sposoby sterowania procesem mogą wykazywać wysoką efektywność w przypadku konkretnych wariantów dróg transportowych oraz skrajnie niską w innych przypadkach. Toteż kalibracja modelu i jego uszczegółowienie może przyjąć znamiona semioptrymalizacji wykonującej ocenę z uwzględnieniem docelowych kryteriów analitycznych i przypisanych im wag. Problem ten został zidentyfikowany na wstępnym etapie testowych badań przeprowadzonych w ramach scenariusza WPP, którego wyniki zamieszczono w rozdziale 7. Kompleksowa ocena decyzji związanych z przebiegiem dróg transportowych i doбором rozwiązań technicznych wymagała dodatkowego uzupełnienia o decyzje związane z organizacją i sterowaniem procesem, gdyż jej możliwości w tym zakresie ściśle zależały od konfiguracji układu. W związku z niniejszym na rysunku 6.8 przedstawiono iteracyjny przebieg badań symulacyjnych oparty na tzw. blokach symulacji. Realizacja podziału blokowego ma na celu uwzględnienie zmian w zakresie zmiennych decyzyjnych, które mają charakter dynamiczny – przykład stanowi wybór trasy odstawy urobku uwzględniający różną w czasie organizację procesu transportowego i dobór sterowalnych parametrów ruchowych urządzeń transportowych.



Rysunek 6.8. Iteracyjny przebieg badań symulacyjnych oparty na blokach symulacji (opracowanie własne).

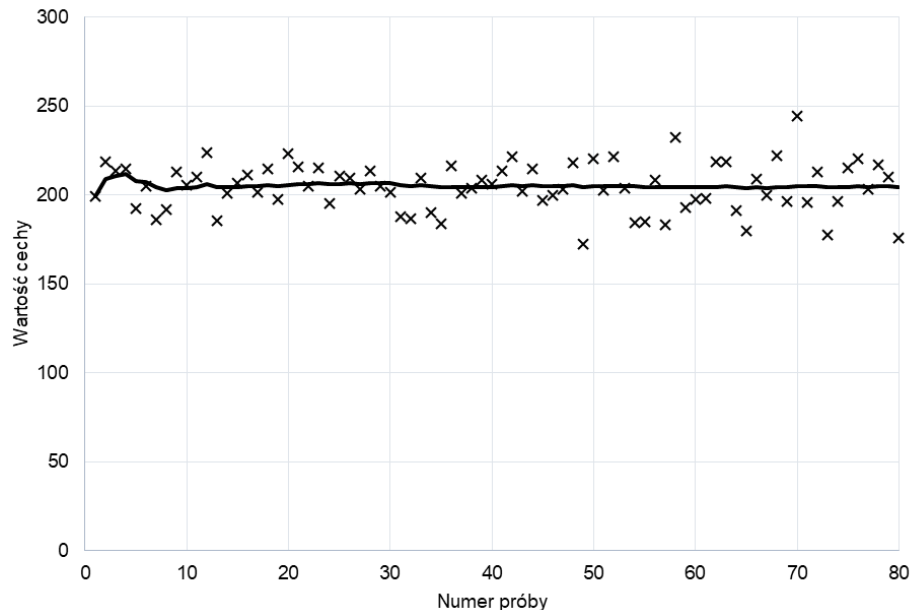
Decyzje związane z wyborem kierunku odstawy w przypadku możliwości podziału strugi urobku również mogą mieć charakter zmienny w czasie. W tym przypadku wyszukanie najkorzystniejszego wariantu może być przeprowadzone na podstawie sumy ocen częściowych obserwowanych w czasie dla kolejnych bloków i wyników symulacji opisujących różne konfiguracje danych wejściowych (w sytuacji niepewności) lub zmiennych decyzyjnych (w ocenie subwariantów). W aspekcie rozpatrywanego schematu scenariusza WPP symulacja cząstkowa zakłada bezpośredni podział przebiegu badań na bloki, a następnie dla każdego z bloków reprezentujących układ różnych wartości zmiennych decyzyjnych identyfikację sekwencyjną korzystnego scenariusza. Dzieląc horyzont analizy na skończoną ilość bloków symulacyjnych w zależności od założonych wag w prosty sposób wskazana może zostać najbardziej optymalna, zmienna w czasie sekwencja zmiennych sterujących, bardziej elastycznych niż główne kryterium decyzyjne. Uwzględniając dodatkowo koszty związane ze zmianą decyzji (jeśli takowe istnieją), zasadniczo w sposób dynamiczny możliwa jest wielokryterialna ocena wariantów uwzględniająca rozwiązania cząstkowe, zmiennie w czasie. Zapisując w środowisku symulacyjnym wyniki każdego eksperymentu symulacyjnego wykonanego za pomocą modelu szczegółowego, ocena wielokryterialna może zostać wyodrębniona poza etap badań symulacyjnych.

Znaczącą korzyść w zakresie ograniczenia ilości obliczeń, można uzyskać w rezultacie grupowania podobnych sytuacji, tj. powiązania bardzo podobnych pod względem warunków realizacji okresów czasu, a następnie jednokrotnego przeprowadzenia obliczeń wskazujących, jakie rozwiązanie jest najkorzystniejsze, pomimo że konfiguracja ta może zasadniczo mieć miejsce w różnym czasie obserwacji. Pozwala to w korzystny sposób zredukować ilość pomocniczych badań symulacyjnych.

Kwestią bezpośrednio i nierozdzielnie związaną z definicją scenariuszy jest rosnąca wraz z czasem niepewność wyników, a nawet jakakolwiek materializacja zadanego stanu procesu i punktu pomiarowego. Odwołując się do przyszłości, uzasadnione wydaje się wprowadzenie dodatkowego systemu wag odwzorowujący niepewność odległych w czasie sytuacji, co zostało przewidziane w etapie 4 opisanego scenariusza.

6.5.4.4. Realizacja badań symulacyjnych

Etap realizacji badań symulacyjnych w scenariuszu WPP wymaga cyklicznego powtarzania eksperymentów symulacyjnych w celu dostarczenia kolejnych wskaźników poddawanych ocenie wielokryterialnej. Realizacja badań w tym przypadku może być prowadzona równolegle z modyfikacją lub rozbudową planów kolejnych eksperymentów, w tym tych o bardziej szczegółowej naturze. W określonych przypadkach tożsame scenariusze mogą być obliczane wielokrotnie w celu ustabilizowania zmienności wyników wyjściowych, tak jako to pokazano na rysunku 6.9.



Rysunek 6.9. Wyniki otrzymywane po wykonaniu N prób symulacyjnych (opracowanie własne).

Realizacja badań może ponadto wymagać wprowadzenia i dostrojenia uproszczonych modeli obiektów m.in. rejonu podszybia, gdzie skomplikowany układ transportowy może z powodzeniem zostać zastąpiony modelem uproszczonym. Współpraca modelu RMS i IMS w zakresie generalizowania i uszczegóławiania została opisana w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Stosowalność modeli symulacyjnych w scenariuszu WPP (opracowanie własne).

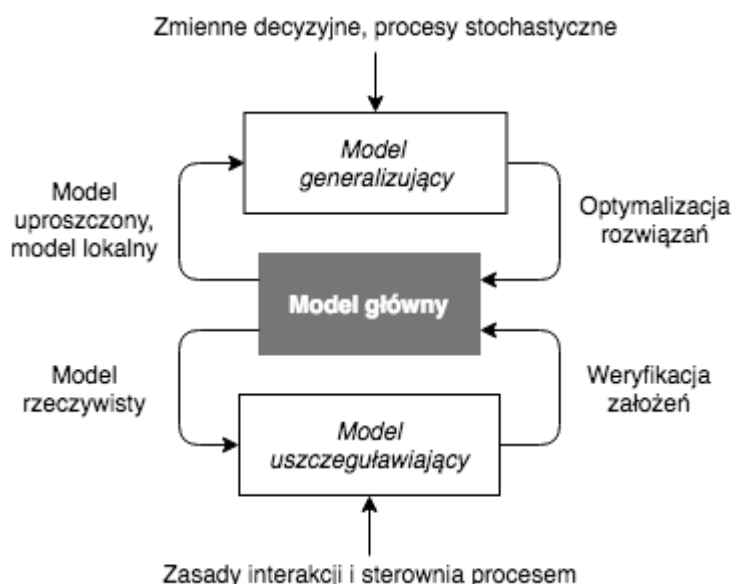
Wyszczególnienie	RMS	IMS (generalizacja)	IMS (uszczegółowienie)
Przebieg trasy transportowej	wysoka	ograniczona	ograniczona
Alokacja wyposażenia	wysoka	wysoka	ograniczona
Dobór par techn.-ruchowych	wysoka	wysoka	ograniczona
Organizacja procesu	średnia	wysoka	wysoka
Sterowanie operacyjne	ograniczona	ograniczona	wysoka

Realizacja badań w scenariuszu WPP obejmować może następujące rodzaje eksperymentów symulacyjnych:

- obliczenia przepływów i akumulacji masy na obiektach i trasach transportowych;
- ocenę ciągłości działania systemu w sytuacji awaryjnej;
- ocenę możliwości technologicznych sterowania procesem;
- badania uzupełniające o charakterze:

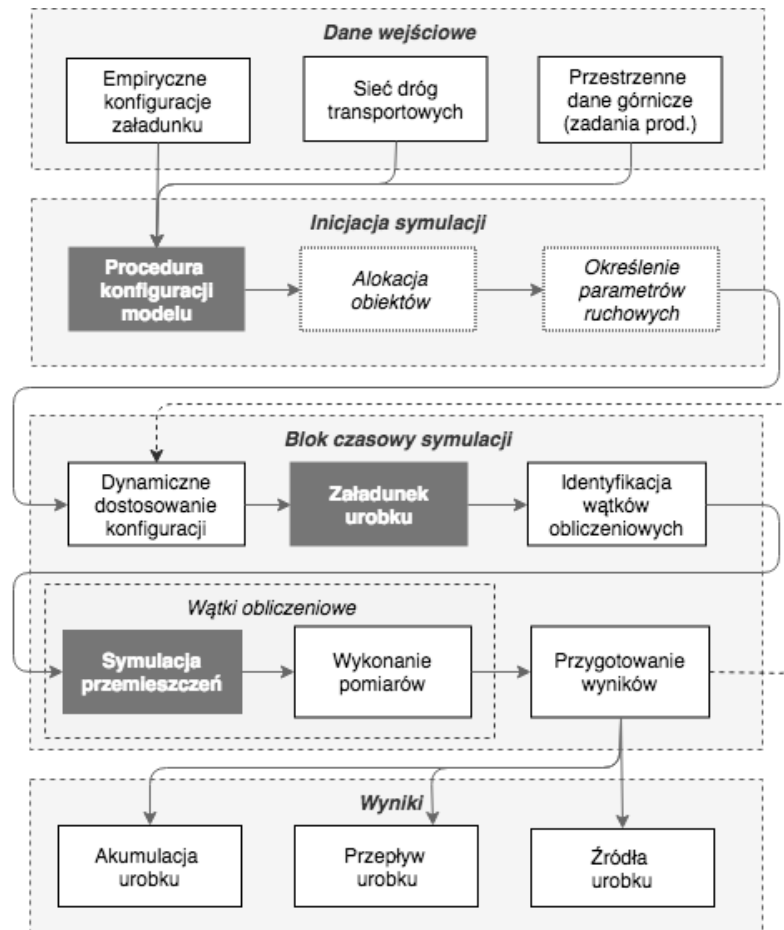
- uszczegóławiającym,
- generalizującym,
- weryfikującym,
- diagnostycznym,
- testowym, w tym testy konkretnych rozwiązań w warunkach skrajnych.

Szczegółnej uwagi wymaga współpraca modeli w celach generalizacji i uszczegółowienia wyników symulacyjnych. Współpraca ta nie zakłada zastępczego przygotowania modelu, a raczej zastosowania zespołu równoległe rozwijanych modeli. Scenariusz WPP zakłada możliwość równoległego wykorzystania aż trzech modeli: głównego, dokładnego i uproszczonego (rys. 6.10). Przy czym model główny stosowany jest z uwagi na szybkość obliczeń, dokładny z uwagi na możliwości dokładnego odwzorowania procesów i interakcji pomiędzy obiektami, a generalizujący w celach badań wykraczających poza warunki przewidziane w symulacji. Model generalizujący umożliwia identyfikację aktualnego stanu w przestrzeni teoretycznych stanów modelu wraz z odpowiadającą im efektywnością. Realizacja badań za pośrednictwem połączonych modeli przyjmuje formę iteracji sterowanych z poziomu modelu głównego z zadanymi warunkami początkowymi.



Rysunek 6.10. Iteracyjny przebieg badań symulacyjnych (opracowanie własne).

Techniczna realizacja procesu symulacji obejmuje inicjację środowiska symulacyjnego oraz cykliczne wykonywanie przewidzianych bloków czasowych symulacji o zadanych parametrach zmiennych wejściowych. W ten sposób otrzymywane są wyniki stanowiące podstawę oszacowania miar wykorzystanych do wielokryterialnej oceny wariantów.



Rysunek 6.11. Całościowy przebieg symulacji w modelu RMS (opracowanie własne).

Rozpatrując podstawowe działania realizowane z poziomu modelu RMS (rys. 6.11) wyszczególnić można trzy procedury: konfiguracji modelu, załadunku urobku i symulacji przemieszczeń. W wyniku powyższych czynności otrzymane zostają dane wyjściowe obejmujące przepływ urobku w obrębie dróg transportowych, akumulację urobku na poszczególnych obiektach oraz informacje na temat źródła jego pochodzenia.

6.5.4.5. Szacowanie miar przekazanych do oceny wariantu

Podstawowym celem opracowania modeli symulacyjnych, jak i całego środowiska symulacyjnego włącznie z interfejsem symulacyjnym, jest oszacowanie wskaźników przekazanych do wielokryterialnej oceny wariantu.

Rekurencyjny model symulacyjny tworzy wyjściowo następujące struktury danych:

- POMIARY_CZASOWE – realizowane z zadaną dokładnością obiektowe pomiary wartości chwilowych przepływu i akumulacji masy oraz narastającego licznika wejść i wyjść jednostek dyskretnych;
- STATYSTYKI – szczegółowe wskaźniki obiektu, obejmujące dla przepływu chwilowego i akumulacji masy urobku wartości takie jak:
 - średnia wartość w okresie,

- czas występowania wartości niezerowych (czas pod obciążeniem),
- średnia liczona z wartości niezerowych,
- kwartyl 0.95 wartości,
- kwartyl 0.99 wartości,
- wartość maksymalna;
- CECHY_ZRODŁA – realizowane z zadaną dokładnością obiektowe liczniki ilości urobku pochodzącego z zadanego źródła z rozróżnieniem klasy jakościowej urobku oraz średniego czasu od wprowadzenia do systemu (jest to używane do profilowania procesu transportowego).

Na bazie wymienionych wskaźników możliwe jest określenie:

- czasowej aktywności lub nieaktywności danego fragmentu trasy lub obiektu funkcjonalnego,
- obciążenia przepływem i masą poszczególnych obiektów funkcjonalnych, jak i odcinków trasy transportowej, przyrównanie wyników do zakładanych zdolności transportowych,
- skuteczności procesu mieszania lub separacji wyszczególnionych klas jakościowych urobku.

Na podstawie informacji obiektowej zawartej w bazie interfejsu symulacyjnego pozyskany zestaw danych wyjściowych pozwala pośrednio na określenie ilości obiektów realizujących proces transportowy w danym czasie, jak również długość użytkowanych tras transportowych oraz wymaganych gabarytów i mocy napędów urządzeń transportowych, jak i szeregu pozostałych parametrów ilościowych. Wykreślić można również charakterystyki w układzie o skumulowanej wartości cechy ilościowej, np. długości obiektu. Na podstawie modelu oceny ciągłości pracy w sytuacjach awaryjnych możliwa jest natomiast ocena czasu wstrzymania produkcji i jej wolumenu w zadanych miejscach pomiarowych w związku z awaryjnym wyłączeniem wybranego obiektu i zadanym czasem potrzebnym do odzyskania jego sprawności.

W drodze wprowadzenia do badań symulacyjnych modeli pomocniczych (zgodnie z koncepcją zaprezentowaną na rysunku 6.10), przeznaczonych głównie do oceny sterowalności, elastyczności i ciągłości procesu transportowego, możliwa jest ocena parametrów procesu takich jak:

- skuteczność separacji lub mieszania urobku o zadanych cechach jakościowych,
- zdolność transportowych w przypadku zwiększenia koncentracji wydobywania w wybranym miejscu lub zmiany przebiegu harmonogramu wydobywania.
- zdolność w zakresie celowego przekierowania urobku na dany szyb wydobywczy,
- ocena ciągłości procesu w sytuacji wystąpienia zdarzeń awaryjnych,

W niniejszej pracy w zakresie oceny sterowalności i elastyczności procesu transportowego, ocenę tę ograniczono do skuteczności separacji i mieszania urobku w odniesieniu do sytuacji (eksploatacji pól ścianowych), gdy taka właściwość była wskazana i pożądana.

Jak stwierdzono na etapie walidacji modeli w rozdziale 7, dodatkowe kryterium oceny stanowić może nieciągłość wykorzystania danych obiektów i tras transportowych wymagających utrzymania. Koszty budowy dróg transportowych ponoszone jednokrotnie przemawiają za jak najdłuższym wykorzystaniem produkcyjnym wyposażenia, co w sytuacji czasowego wyłączenia danego odcinka trasy transportowej nie powinno być wprost utożsamiane z równoległym zamrożeniem kosztów utrzymania.

6.5.4.6. Wielokryterialna analiza wyników

Podstawowym celem analizy wielokryterialnej jest ocena wielu kryteriów wynikowych modelu w warunkach niepewności. Tak jak przedstawiono we wcześniejszych rozdziałach, istnieje cała grupa problemów badawczych wymagających analizy wielokryterialnej. W niniejszej pracy za podstawowe kryteria decyzyjne przyjęto w szczególności układ szerzej opisany w rozdziale 2.2, który obejmuje:

- koszty procesu (destymulanta),
- wydajność i ciągłość procesu (stymulanta),
- sterowalność procesu (stymulanta).

Pewne problemy w zakresie realizacji badań symulacyjnych stanowi pomiar tzw. elastyczności procesu – określonej stricte jako odporność systemu na zmianę założeń odnośnie do przebiegu procesu transportowego w czasie lub zmiany ograniczeń związanych z jego realizacją. Cecha ta jest brana pod uwagę w drodze rozważań dwóch lub więcej wariantów cechujących się zbliżoną efektywnością miar i spełnieniem kryteriów wydajnościowych. Przy czym jeden z nich może cechować się lepszą reakcją na nieoczekiwany wzrost obciążenia ilością urobku lub czasowym rozkładem nadawy. Elastyczność procesu transportowego może też być istotną cechą braną pod uwagę w zakresie m.in. oceny możliwości technologicznych, jako możliwość technicznej realizacji przyszłych lub pominiętych w analizie rozwiązań w tym zakresie. W wyniku czego przyjęto, że cecha ta uwzględniana jest w sposób pośredni w obrębie każdego z kryteriów na etapie planowania eksperymentów symulacyjnych.

Ostatecznie oczekiwane wyniki analiz powinny dać odpowiedź na wiele zróżnicowanych problemów badawczych, z których co najmniej część może zostać zidentyfikowana w trakcie badania. W trakcie prac związanych z opracowaniem, testowaniem funkcjonalnym i weryfikacją działania modeli opracowanych w pracy, sformułowanych zostało wiele szczegółowych problemów badawczych, stanowiących odpowiedź na następujące pytania:

- w jaki sposób zoptymalizować układ dróg transportowych i czy działanie to jest uzasadnione ekonomicznie?
- w jakim zakresie i kiedy podjąć modernizację dróg transportowych, w tym maszyn i urządzeń stosowanych w zakresie odstawy urobku, i jak ją przeprowadzić, zachowując zdolności transportowe?
- gdzie powinny być zlokalizowane punkty rozdziału urobku?
- w jakim zakresie i gdzie zastosować nowe środki techniczne?
- jak zorganizować współpracę cyklicznych maszyn transportowych?
- w jaki sposób nadrzędnie koordynować i sterować procesem transportowym?

Kwestie te związane są bezpośrednio z rolą wsparcia procesów projektowania inżynierskiego.

Przechodząc do analizy i oceny końcowej wariantów w scenariuszu WPP, wskaźniki poddane wielokryterialnej ocenie stanowiąc mogą szczegółowo:

1) W aspekcie kosztów procesu:

- rodzaj i rozmiar użytkowanych obiektów transportowych – możliwy do wyceny jako koszt budowy infrastruktury, zakupu maszyn i innych środków transportowych (wliczając budowę wyrobisk transportowych i zbiorników);
- czas pracy i rozkłady obciążenia – odwzorowujący dla danej grupy maszyn lub urządzeń transportowych koszt obsługi, w tym zużycia materiałów eksploatacyjnych;

- zapotrzebowanie na energię elektryczną;
 - czasowe wykorzystanie infrastruktury – miara przerw w wykorzystaniu niektórych fragmentów dróg odstawy;
 - wymagany zakres i ilość przebudów dróg transportowych;
 - łączna ilość obiektów funkcjonalnych (związana często z ilością pracowników wymaganych do obsługi);
 - łączna długość aktywnych dróg transportowych.
- 2) W aspekcie ciągłości i wydajności procesu transportowego:
- rozkład wydajności w stosunku do wartości projektowanej, opisany jako prawdopodobieństwo przeciążenia;
 - rozkład akumulacji urobku w stosunku do wartości projektowanego, opisany jako prawdopodobieństwo przeciążenia (przenośnik) lub zapełnienia (zbiornik);
 - spodziewany czas przerw w wydobywaniu w przodku oraz czas przerwy w wydobywaniu na powierzchni, spowodowany awarią wybranych obiektów.
- 3) W aspekcie cech technologicznych procesu transportowego:
- wskaźnik procentowy spełnienia konkretnego celu technologicznego zakładającego separację lub kontrolowane mieszanie urobku z różnych źródeł;
 - stopień zawilgocenia urobku wyjściowego;
 - stopień rozdrobnienia urobku szacowany zgrubnie na podstawie liczby przesypów, przejść przez przesiewacz, warunkami załadunku do zbiorników.

Zaproponowany układ wskaźników może zostać z powodzeniem uzupełniony o dodatkowe miary, wykazujące szczególną przydatność na etapie poszukiwania rozwiązania docelowego. Dodatkowe wskaźniki, stanowiąc mogą szczególne wsparcie na etapie oceny elastyczności, sterowalności i wydajności procesu. Układ uzupełniających wskaźników może obejmować następujące miary o charakterze opisowym i diagnostycznym:

- spodziewany dobowy czas realizacji procesu transportowego,
- spodziewane obciążenie w godzinach pracy oraz obciążenie dobowe,
- maksymalny osiągalny przepływ urobku,
- poziom retencji urobku,
- możliwość dostosowania wydajności procesu do wymagań,
- stabilność procesu rozumianą jako obciążenie maksymalne odniesione do średniego.

Należy mieć na uwadze, że zastosowanie wszystkich możliwych miar w obrębie kryteriów decyzyjnych nie zawsze musi być stosowane, a wybór konkretnego zestawu lub formy obliczeniowej wskaźników w głównej mierze powinien być podyktowany potrzebą w zakresie oceny rozwiązań lub porównania konkretnych wariantów decyzyjnych.

7. Walidacja opracowanych modeli symulacyjnych

W rozdziale przeprowadzono walidację działania modeli symulacyjnych, posługując się danymi empirycznymi. Proces walidacji modelu podzielono zbiorczo na etap doboru i przygotowania danych wejściowych oraz etap symulacji wraz z wielokryterialną analizą wyników. Proces walidacji modeli miał za zadanie sprawdzić, czy modele w wymaganym stopniu odwzorowują proces transportowy urobku w kopalni podziemnej.

Proces ich weryfikacji w rozumieniu poprawności implementacyjnej wykonano na etapie ich opracowania oraz powtórzono w niniejszym rozdziale, w efekcie czego zamieszczono diagramy i wykresy pozwalające na diagnostykę modelu symulacyjnego poprzez oszacowanie różnic w przepływach w poszczególnych punktach pomiarowych, jak również odniesienie wyników uzyskiwanych z modelu do danych empirycznych.

7.1. Przygotowanie danych wejściowych

W celu walidacji modeli wykorzystano w większości rzeczywiste dane, pochodzące z funkcjonujących kopalń. Szczególną uwagę poświęcono temu by opracowane dane wejściowe umożliwiły ocenę poprawności i walidację przydatności opracowanych modeli w kontekście tematu niniejszej pracy – analizy wielokryterialnej. W przypadku niedostępności niektórych danych z powodu braku ich ewidencji lub zbyt krótkiego horyzontu czasowego obserwacji posłużono się modelami statystycznymi opracowanymi na potrzeby pracy na znacznie większej ilości kopalń podziemnych. Podobnie postąpiono względem odwzorowania procesów lub prawidłowości właściwych i szeroko obserwowanych w kopalniach węgla kamiennego, z których co najmniej część zamieszczono w rozdziale 3, stosując przy tym uogólnione modele zbudowane na większych próbkach danych, cechujące się większą kompleksowością i zastosowaniem.

Podstawowe kryteria wyboru kopalni i danych źródłowych ujętych w procesie walidacji obejmowały takie cechy jak:

- złożoność przestrzenną i strukturalną układu transportowego,
- możliwości retencji i przekierowania urobku,
- zidentyfikowaną obecność wąskich gardeł w procesie transportowym (w analizowanym przypadku m.in. szyby wydobywcze),
- obecność zdywersyfikowanych, wysokowydajnych technologii eksploatacji kopalni,
- zastosowanie ciągłych oraz cyklicznych środków transportowych,
- dostępność danych m.in. map wyrobisk transportowych, map pokładów wymaganych do opracowania modelu.

Harmonogramy wydobywania wykorzystane w pracy opisywały jedną z wielu możliwych, hipotetycznych możliwości rozcinki złoża i eksploatacji kopaliny na przestrzeni kilkudziesięciu lat. Podstawowe dane geologiczne, podobnie jak i przestrzenny układ wyrobisk transportowych, stanowiły odwzorowanie rzeczywistego obiektu oraz stanu wiedzy na temat warunków zalegania złoża. Zaproponowany system odstawy urobku, dobór wyposażenia, stanowił wersję rozwojową bieżącego układu transportowego, uzasadnioną do rozpatrzenia z perspektywy rzeczywistych potrzeb w zakresie wielokryterialnej analizy i oceny przebiegu procesu transportowego realizowanego w kopalni.

Wybierając kopalnie zwrócono również uwagę na obecność cyklicznych – ruchomych środków transportowych nierealizujących procesu przemieszczania urobku w sposób ciągły. W tym zakresie zamodelowana została kolej kopalniana, stosowana w ciągu odstawy kamienia z przesiewaczy i wyrobisk udostępniających.

Modelowana kopalnia została opisana szerokim zbiorem danych pomiarowych w odniesieniu do obiektów stanowiących źródło urobku (przodków ścianowych i chodnikowych), jak i obiektów transportujących. W głównej mierze parametryzację modeli załadunkowych realizowano metodą przyrównania otrzymanych rozkładów do prób empirycznych – następnie, badając wartość oraz rozkład residuów obu obserwacji, wyznaczano rozkład różnic, starając się, aby był on symetryczny, zbliżony wartością średnią do zera z jak najmniejszym możliwie współczynnikiem zmienności. W odniesieniu do przyszłych przedsięwzięć eksploatacyjnych z uwagi na brak informacji o doborze wyposażenia, szczegółowych danych geologiczno-górnictwowych rzutujących na uciążliwość – przyjęto zbliżony przebieg wydobywania do historycznych wartości, zakładając wartości średnie i zmienność na poziomie umożliwiającym osiągnięcie planów wydobywczych. W tym zakresie możliwe byłoby również opracowanie modelu regresji lub innego rozwiązania obejmującego metody uczenia maszynowego na historycznej próbie danych. Jednak z uwagi na skomplikowanie i czasochłonność zagadnienia oceny wpływu wielu czynników na przebieg eksploatacji w przodku, jak również wymaganą dostępność kompleksowego zbioru danych historycznych, nie podjęto się tego typu realizacji. Tym niemniej należy zaznaczyć, że w przypadku dużego, dobrze opisanego zbioru danych realizacja takiego działania w celu predykcji przyszłych wyników produkcyjnych i przebiegu produkcji wydaje się uzasadniona i praktycznie osiągalna.

Należy odnotować, że prezentowane w rozdziale dane źródłowe z uwagi na wieloletnią projekcję, jak i odwołania do danych historycznych musiały zostać celowo znormalizowane lub tam gdzie było to uzasadnione, dodano czynnik losowy, uniemożliwiając tym samym ujawnienie informacji wrażliwych przedsiębiorstwa. Tym samym publikacja zagregowanych danych, zestawień, założeń operacyjnych i szczegółowych planów produkcyjnych kopalni nie została ujęta w pracy.

7.1.1 Przestrzenna struktura wyrobisk

Utworzenie mapy wyrobisk transportowych istniejących i planowanych wykonane było na podstawie danych zapisanych w formacie plików CAD, danych przestrzennych GIS oraz dokumentacji w wersji do druku (plików pdf). Pierwotne dane wprowadzone do modelu obejmowały:

- 390 wyznaczonych odcinków wyrobisk transportowych głównych, udostępniających i przygotowawczych stanowiących trasę przebiegu przenośników lub kolei kopalnianej,
- 15 obiektów punktowych takich jak zbiorniki retencyjne oraz szyby.

Powstała w ten sposób mapa obiektów na potrzeby badań walidacyjnych została uproszczona i uzupełniona o położenie środków transportowych, głównie przenośników taśmowych. Następnie zbiór danych przestrzennych został przekształcony do 207 odcinków liniowych tras oraz 222 obiektów punktowych odwzorowujących miejsca połączeń – głównie punkty załadunkowe, przesypy, punkty wejścia i wyjścia ze zbiorników. Dane pochodzące z map lub dokumentacji projektowych, uzupełniono o współrzędną Z, przyjętą na podstawie odczytów głębokości spągu dla danego poziomu wydobywczego lub pokładu. Każdy z wyodrębnionych obiektów został zakwalifikowany do konkretnego poziomu lub opisany jako obiekt kilkupoziomowy, m.in.: upadowa, szyb, zbiornik.

Opisany zbiór danych przestrzennych nie posiadał jednak zapisu informacji na temat struktury funkcjonalnej. Struktura połączeń została zrealizowana w sposób półautomatyzowany poprzez odszukanie najbliższego punktu w trójwymiarowej przestrzeni, następnie za pomocą dedykowanego skryptu opracowanego w języku Python, wizualizującego strukturę w przestrzeni, ręcznie zweryfikowano poprawność połączenia i kierunek transportu urobku. Optymalizacja struktury danych wejściowych pozwoliła ostatecznie zapisać całość w postaci 192 obiektów opisanych w jednolity, następujący sposób:

- podstawowe dane (identyfikator, nazwa obiektu, typ obiektu),
- położenie (poziom wydobywca, pole eksploatacyjne, współrzędne: x,y,z),
- połączenia obiektu (cel podstawowy, cele alternatywne).

Wymienione cechy obiektów odpowiadały bazodanowemu formatowi zapisu informacji na temat obiektów uczestniczących w procesie transportowym. Jednocześnie każdy z obiektów mógł zostać opisany zestawem dodatkowych informacji, przykładowo dla przenośnika taśmowego cechy te obejmowały:

- a) Podstawowe dane (Identyfikator, oznaczenie funkcjonalne, lokalizacja – oddział, lokalizacja – chodnik).
- b) Parametry techniczne (prędkość ruchu taśmy, szerokość, długość całkowita, kąt nachylenia, wysokość podnoszenia (różnica wysokości między zwrotnią a czołem przenośnika), zainstalowana moc i ilość silników napędowych).
- c) Umiejscowienie w strukturze (załadunek – nr identyfikacyjny przenośnik sypiącego, odległość od zwrotni wysypu, rozładunek – nr identyfikacyjny przenośnika odbierającego, rodzaj transportowanego materiału).

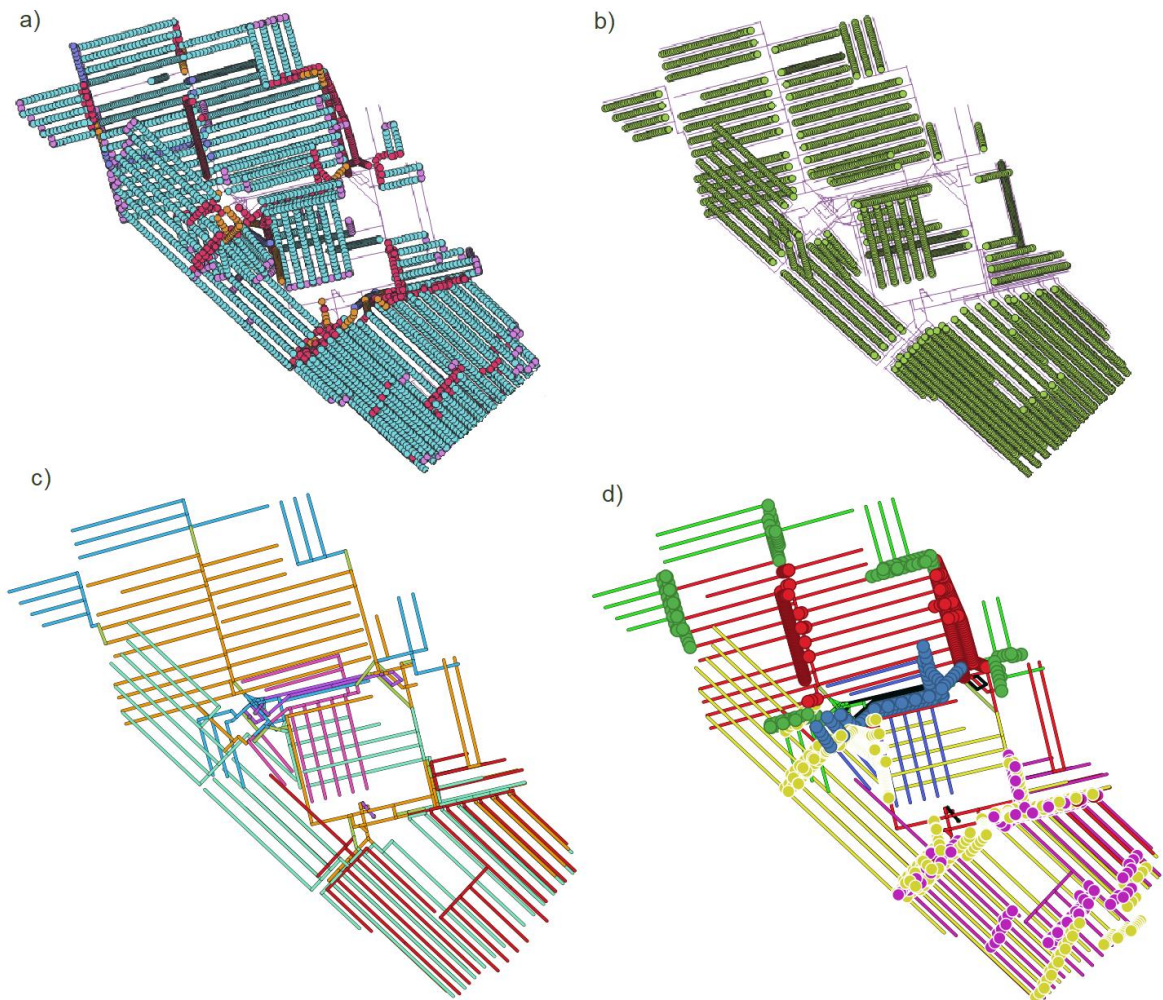
7.1.2 Przestrzenne dane górnicze

Realizacja modeli symulacyjnych procesów transportowych wymaga odwzorowania harmonogramu wydobywania jako głównego wymuszenia oddziałyującego na układ transportowy i bezpośrednią przyczynę zaistnienia procesu transportowego. Przy czym uwzględnienie wymuszeń może przybrać bardziej precyzyjną lub uogólnioną formę. Na potrzeby niniejszej pracy uznano za uzasadnione szczegółowe odwzorowanie robót górniczych, jak i harmonogramów produkcyjnych wraz z projektami rozczinki złoża. Decyzja ta jest szczególnie uzasadniona zważywszy na to, że obecnie dane te mogą stanowić postać wyjściową projektu udostępnienia i eksploatacji całościowo zrealizowanego w narzędziach przeznaczonych stricte do projektowania i harmonogramowania eksploatacji kopalni. Precyzja i dostępność danych w formie cyfrowej może zasadniczo skrócić proces przygotowania modelu. Tym samym uzyskuje się również większą precyzję odwzorowania przebiegu procesu wydobywania w czasie. Dane te mogą być aktualizowane w sposób nadążny uwzględniając stopień wykonania planów produkcyjnych lub zmiany w ich założeniach wynikające z wewnętrznych lub zewnętrznych czynników oddziałyujących na przedsiębiorstwo górnicze.

W celach walidacji modeli przygotowano i wczytano zbiór przestrzennych danych górniczych obejmujących harmonogram robót na okres ponad 30 lat produkcji. Zbiór danych opisywał kopalnię węgla kamiennego i zawierał informacje o ponad 12 tysiącach elementarnych zadań produkcyjnych, które obejmowały wykonanie wyrobisk głównych, udostępniających, przygotowawczych postępów ścian eksploatacyjnych we wskazanym okresie. Dekretacja zadań produkcyjnych podyktowana była stałym postępem eksploatacji (rys 7.1).

Zapis przestrzennych danych górniczych zawierał:

- dane lokalizacyjne: identyfikator zadania, nazwa wyrobiska, pokład, numer pola wydobywczego, oddział wydobywczy, współrzędne x,y,z,
- dane funkcjonalne: rodzaj wyrobiska, typ zadania, proponowany szyb wydobywczy, typ maszyny urabiającej, typ obudowy, szerokość (długość) wyrobiska,
- dane czasowe: początek zadania, zakończenie zadania, horyzont planowania, tydzień eksploatacji,
- dane produkcyjne: wydobywanie brutto, wydobywanie kamienia, wydobywanie węgla (insitu), metry postępu (narastająco),
- dane geologiczne: typ węgla, kaloryczność węgla (insitu), kaloryczność węgla surowego, uzysk obliczeniowy, zapocielenie węgla insitu, zapocielenie węgla surowego, wysokość furty eksploatacyjnej, grubość przerostu, miąższość węgla, opad stropu, przybierkę spągu, średnia grubość kamienia, gęstość urobku, masę węgla wg rodzaju,



Rysunek 7.1. Przestrzenna mapa wyrobisk transportowych i robót górniczych (a – planowane wyrobiska przygotowawcze, b – planowane wyrobiska ścianowe, c – docelowy przebieg wyrobisk transportowych, d – planowane wyrobiska udostępniające i wyrobiska główne, przecinki technologiczne) (opracowanie własne).

7.1.3 Założenia procesów stochastycznych

Jak już nadmieniono wcześniej, zmienność nadawy urobku w czasie może mieć zasadniczy wpływ na wyniki uzyskane z zastosowaniem stochastycznego modelu symulacyjnego. Przeprowadzone w pracy badania nad zmiennością wydobywania pozwoliły opracować i skonfigurować model załadunkowy w taki sposób, aby możliwie najlepiej odwzorowywał on rzeczywiste warunki losowe. W celach weryfikacyjnych i kalibracyjnych na podstawie pomiarów empirycznych wydobywania zmianowego i dobowego kompleksów ścianowych i strugowych, dobrano statystyczny współczynnik zmienności postępu dobowego dla kompleksu strugowego na poziomie 0,411 oraz odpowiednio 0,34 dla kompleksu kombajnowego.

Na potrzeby badań walidacyjnych modeli symulacyjnych przyjęto typową 4-zmianową organizację produkcji z jedną zmianą konserwacyjną realizowaną na ostatniej zmianie. Alternatywnie przyjęć można było określone prawdopodobieństwem przeznaczenia dowolnej zmiany w całości lub części na prace konserwacyjne, co jest praktykowane w zależności od stanu wykonanych zadań produkcyjnych i tych towarzyszących produkcji – m.in. po dłuższym nieplanowanym postoju. Model umożliwił przyjęcie takich założeń, lecz z powodu małej istotności nie były one stosowane w celu jego walidacji. W sposób empiryczny na podstawie danych historycznych wyznaczono przybliżony zegarowy harmonogram zmiany załóg produkcyjnych oraz czas przerw organizacyjnych pomiędzy poszczególnymi zmianami. W przypadku kopalni notującej wysoką wydajność wydobywania z przodka przerwy te z reguły nie są dłuższe niż 30 minut, stąd też w założeniach modelu przyjęto czas przerw pomiędzy zmianami wynoszący średnio od 15 do 30 minut. Jakkolwiek czas ten w odniesieniu do planowanych (w bliższej lub odleglejszej przyszłości) ścian, dodatkowo mógłby zostać bardziej precyzyjnie oszacowany poprzez powiązanie z długością dróg transportowych, tym niemniej zagadnienie to odbiega od tematyki pracy.

W następnym kroku przyjęto spodziewany współczynnik czasu wydobywania (nadawy urobku) podczas tzw. zmian z wydobywaniem. Wartość tę ustalono w oparciu o empiryczne badanie obiektów rzeczywistych (rozdział 3.3) i przeciętnie dla kompleksu strugowego wyniosła ona 0,53 dla kombajnu 0,57. Szczegółowa analiza czasowa zapisu danych pochodzących z przodka ścianowego pozwoliła wyróżnić bardzo dużo zatrzymań o stosunkowo krótkim czasie oraz małą ilość zatrzymań trwających względnie długi czas. Mowa tutaj o tzw. mikrozatrzymaniach oraz zatrzymaniach wydobywania związanych bezpośrednio z zadziałaniem czynników pochodzenia naturalnego oddziaływujących na ciągłość wydobywania bądź zaistnieniem zdarzeń losowych związanych m.in. z eksploatacją wyposażenia. Analizując rozkład czasów postoju, przyjęto umowy podział zatrzymań produkcji na trwające do 10 minut oraz od 10 minut wzwyż. W modelu stochastycznym załadunku okres pracy, gdzie nie występowały przerwy dłuższe niż 10 minut, oznaczono jako praca maszyny z możliwymi tzw. mikropostojami. W tym okresie wyznaczono średni czas trwania cyklu pracy i mikrozatrzymań. Zmiany stanów odwzorowano poprzez proces Markowa o znanych intensywnościach przejść między stanami, odczytanym bezpośrednio z rozkładu prawdopodobieństwa trwania przerwy produkcyjnej oraz rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy.

W następnych krokach przyjęto zabiór właściwy dla stosowanej technologii eksploatacji (przykładowo dla struga w zakresie 0,025–0,055m) oraz dobrano wartość średnią oraz współczynniki zmienności losowej prędkości urabiania. Dla instalacji strugowej średnia prędkość ruchu wyniosła niespełna 3 m/s na biegu szybkim, dla kombajnu wartość zwykle oscylowała w zakresie od 4,5 do 9 metrów posuwu na minutę. Kumulację urobku wynikającą z szybkiego ruchu głowicy strugowej z uwagi na rolę tego zjawiska odwzorowano za pośrednictwem dedykowanego modelu. Analogicznie

odwzorowano przerwy technologiczne w ścianach kombajnowych związane z zawrębianiem na początku i na końcu ściany.

W odniesieniu do kombajnów chodnikowych przyjęto cykl obejmujący urabianie trwający średnio 30 minut oraz 34 minuty postoju i towarzyszących prac technologicznych związanych z zabudową obudowy. Wartości te przyjęto dla gabarytów chodnika o wysokość 4,3–5,1m i szerokość 6,3–6,9 m z rozstawem obudowy wynoszącym 0,9 m. Gabaryty te posłużyły do obliczeń dopływu urobku w cyklu urabiania (tab. 7.1).

Bilansowanie wydobycia wynikającego z harmonogramu przeprowadzono głównie poprzez uzależnienie czasu wydobycia od wyniku produkcyjnego spodziewanego w jednostce czasu, uwzględniając przy tym ustaloną prędkość pracy przewidzianą harmonogramem wysokość ściany i zabiór. Prawdliwość powyższych założeń potwierdzona została badaniami na większej ilości maszyn urabiających.

Tabela 7.1. Przykładowa konfiguracja punktów załadunku urobku (opracowanie własne).

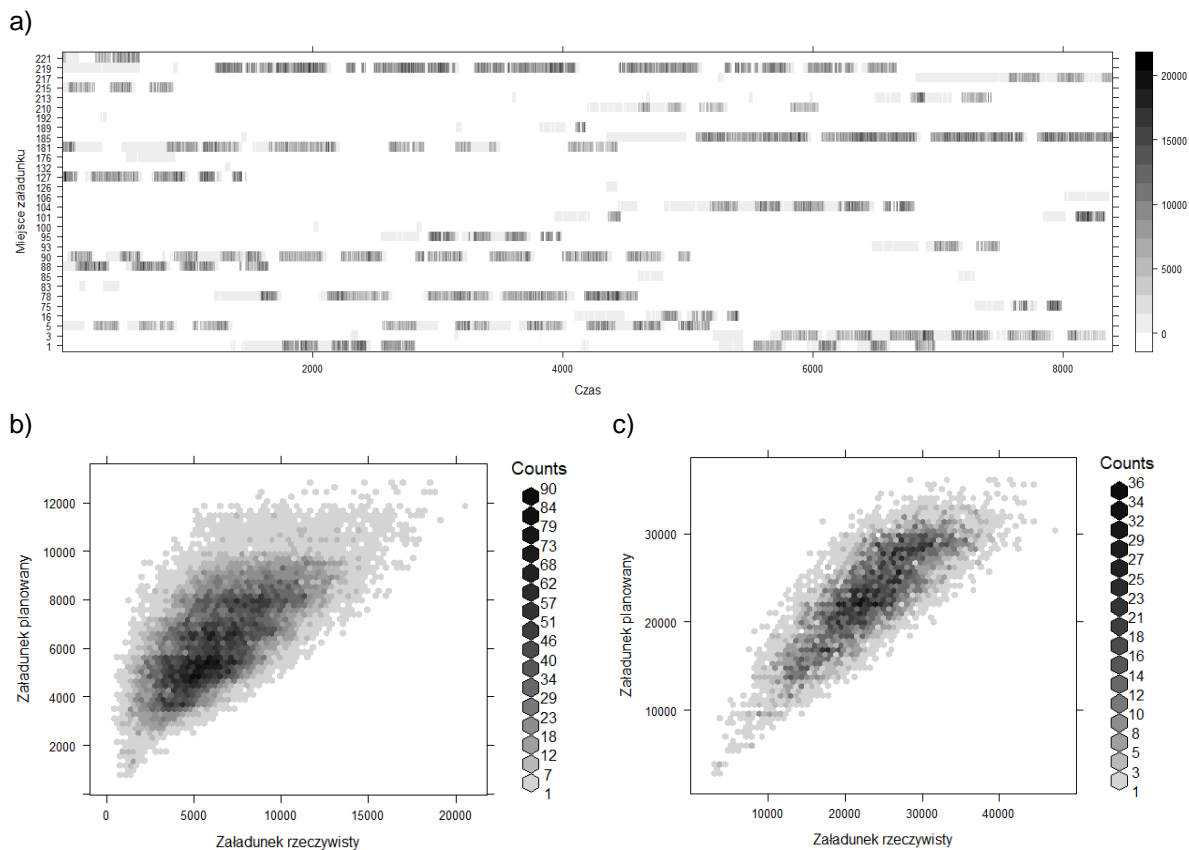
Wyszczególnienie	Kombajn ścianowy	Strug ślizgowy	Kombajn chodnikowy
Średni czas pracy [s]	4713	4396	1800
Średni czas postoju [s]	1476	2000	2055
Średni czas urabiania [s]	596	284	596
Średni czas krótkiego postoju [s]	144	41	15
Czas przerwy między zmianami [s]	1800	600	1200
Ilość zmian produkcyjnych	3	3	3
Droga maksymalna [m]	<i>*szerokość ściany</i>	<i>* szerokość ściany</i>	0,9
Prędkość średnia [m/s]	0,0809	3	0,00048
Prędkość – wsp. błędzenia losowego	0,22	0,02	0,25
Prędkość – krok. błędzenia losowego	0,08	0,5	0,09
Prędkość – skala błędzenia losowego	1	1	1
Prędkość – wsp. zmienności losowej	0,1	0,02	0,15
Prędkość – prawd. zmiany losowej	1	1	1
Zabiór średni [m]	0,85	0,0241	<i>*szerokość chodnika</i>
Zabiór – wsp. błędzenia losowego	0,05	0,28	0,07
Zabiór – krok. błędzenia losowego	0,06	0,06	0,09
Zabiór – prawd. błędzenia losowego	1	1	1
Zabiór – wsp. zmienności losowej	0,02	0,08	0,03
Zabiór – prawd. zmiany losowej	1	1	1
Prędkość przenośnika odbierającego [m/s]	1,5	1,5	1,5
Wysokość wyrobiska [m]	<i>*wysokość ściany</i>	<i>*wysokość ściany</i>	<i>*wysokość chodnika</i>
Czas zmiany produkcyjnej [s]	19800	21000	19800
Współczynnik rozluźnienia urobku	1,667	1,667	1,667

7.2. Symulacja i wielokryterialna analiza wyników

W trakcie badań symulacyjnych szczególną uwagę skierowano na kwestie związane z poprawnością działania samych modeli oraz skuteczność mechanizmów umożliwiających operacyjną ich weryfikację, poprzez diagnostykę na etapie kalibracji danych wejściowych. Wymagało to wzmożonej koncentracji na reprezentatywnym charakterze przygotowanych danych wejściowych, jak i wybranym problemie decyzyjnym. W rezultacie postanowiono zrealizować scenariusz Wsparcia Procesów Planistycznych (WPP) w sytuacji alternatywnych możliwości poprowadzenia dróg odstawy urobku.

7.2.1. Weryfikacja w formie wstępnych badań symulacyjnych

Dysponując długookresowym modelem symulacyjnym wraz ze szczegółowymi założeniami dotyczącymi punktów załadunkowych, jak i dynamiki samego procesu wydobywania w czasie, możliwe staje się przeprowadzenie symulacji weryfikującej działanie modelu i poprawność przyjętych założeń. Wynik tych badań jest istotny z uwagi na weryfikację poprawności sformułowanego modelu, jak również stanowi on podstawę kalibracji parametrów, wprowadzenia usprawnień i zmian w stosunku do wersji pierwotnej. Badania te obejmować powinny zasięgiem możliwie najdłuższy horyzont czasowy symulacji, a ich wyniki, stopniowo poprzez dostrajanie modelu, powinny stanowić podstawę długookresowej analizy wielokryterialnej procesów transportowych. W rezultacie otrzymano wyniki zaprezentowane na rysunku 7.2.

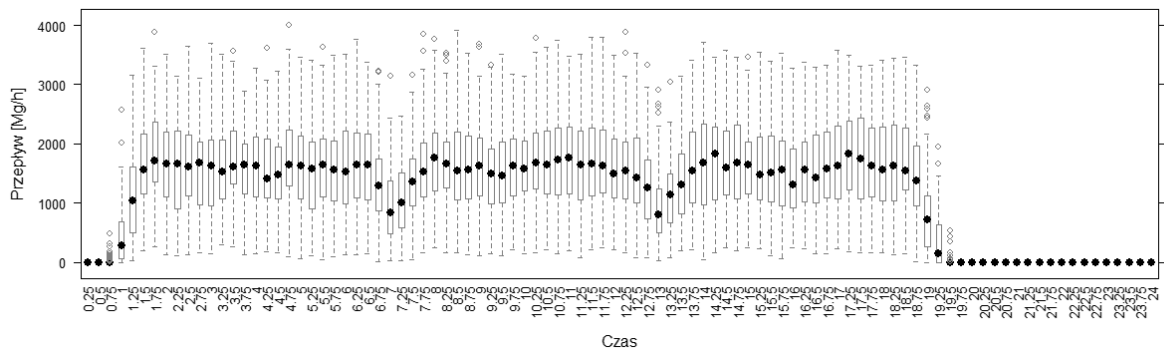


Rysunek 7.2. Diagramy weryfikacji poprawności załadunku (opracowanie własne).

- a) Wykres Gantta dla miejsc załadunku. b) Zestawienie załadunku planowanego i rzeczywistego dla ścian. c) Zestawienie załadunku planowanego i rzeczywistego na poziomie kopalni.

Wykresy zamieszczone na rysunku 7.2 pozwoliły zweryfikować kwestię podstawową – aktywność stochastycznych punktów załadunkowych oraz ścisłość związku pomiędzy wartościami planowanymi – wynikającymi z harmonogramu, a wartościami uzyskanymi z modeli nadawy odwzorowujących procesy stochastyczne. Otrzymany rozkład residuów pomiędzy planem a wykonaniem mógł być zwrotnie odniesiony do danych historycznych charakteryzujących zadania wykonane przez kopalnię w celu dostrajania i zwiększania stopnia dopasowania modelu. W celu określenia wiarygodności modelu możliwe jest wprowadzenie danych historycznych jako danych wejściowych, a następnie interpretacja residuów względem rzeczywistych wyników. Rozkład symetryczny o wartości średniej skupionej wokół wartości zerowej, świadczyłby o dobrym dopasowaniu modelu. Alternatywnie eksperyment ten można

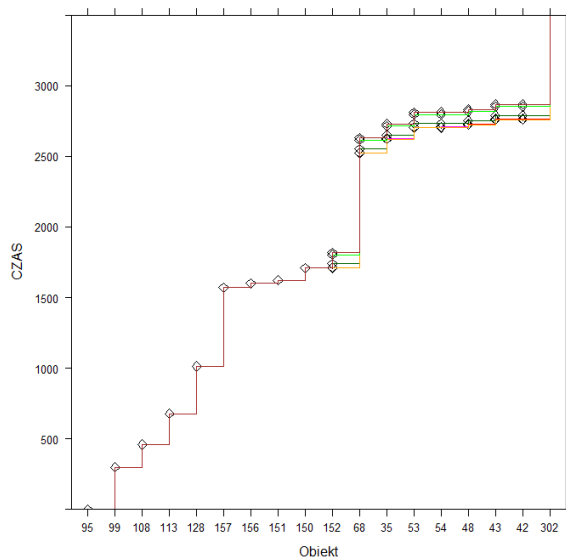
powtarzać wielokrotnie do uzyskania założonego stopnia dopasowania. Zliczanie udziału dopasowanych rozkładów w łącznej ilości prób umożliwiłoby weryfikację modelu z uwagi na indywidualny, stochastyczny przebieg i skończoną próbkę danych historycznych.



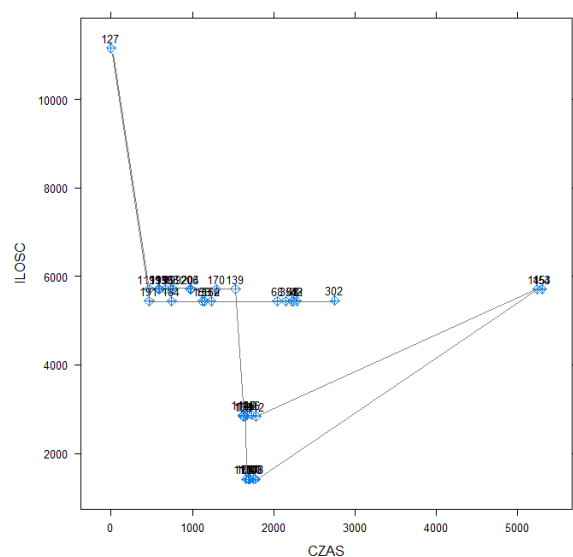
Rysunek 7.3. Statystyczny przebieg zmiany produkcyjnej z zarysowanym momentem zmiany załogi produkcyjnej i czwartą zmianą konserwacyjną (opracowanie własne).

Istotne z perspektywy działania modelu jest również porównanie zapisów czasowych aktywności punktów załadunkowych do danych rzeczywistych, w tym celu dla każdego z punktów mogą być sporządzone wykresy ilustrujące: zmienność procesu w funkcji czasu, zgodność statystycznego rysunku zmiany produkcyjnej oraz zakres wpływu i częstotliwość oddziaływania procesów stochastycznych (rys 7.3).

a)

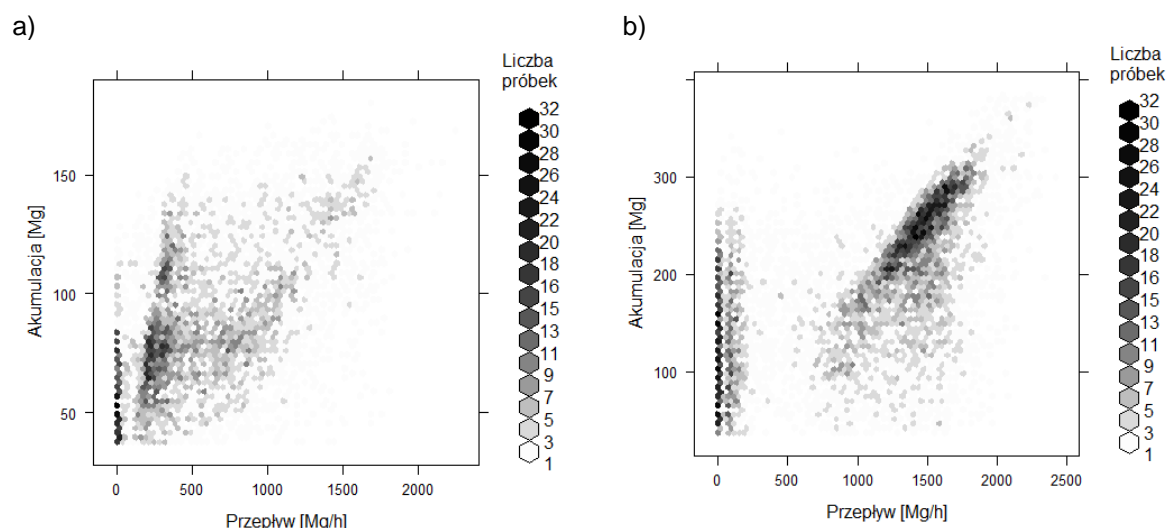


b)



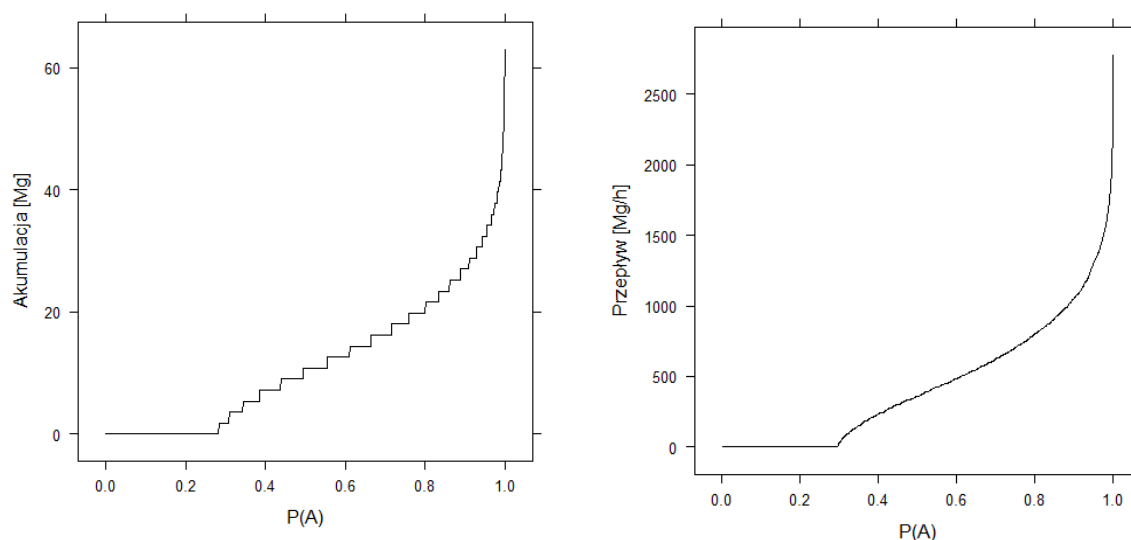
Rysunek 7.4. Diagramy diagnostyczne a) lokalizacja i czas od załadunku do wydobycia na powierzchnię; b) ilość zgromadzonego urobku i średni czas zmiany lokalizacji w systemie (opracowanie własne).

Kolejnym etapem weryfikacji wstępnych wyników otrzymanych z modelu jest analiza procesu transportowego, a w szczególności zgodności bilansu mas i rozpływów urobku. W tym celu wykorzystywane są diagramy i wykresy diagnostyczne (rys. 7.4) obejmujące czasowy zapis procesów transportowych zachodzących w obrębie danego odcinka lub gałęzi wyrobisk transportowych (rys. 7.4a) lub też analiza rozplywu urobku z wskazanego źródła załadunkowego (rys 7.4b) w określonym przedziale czasu.



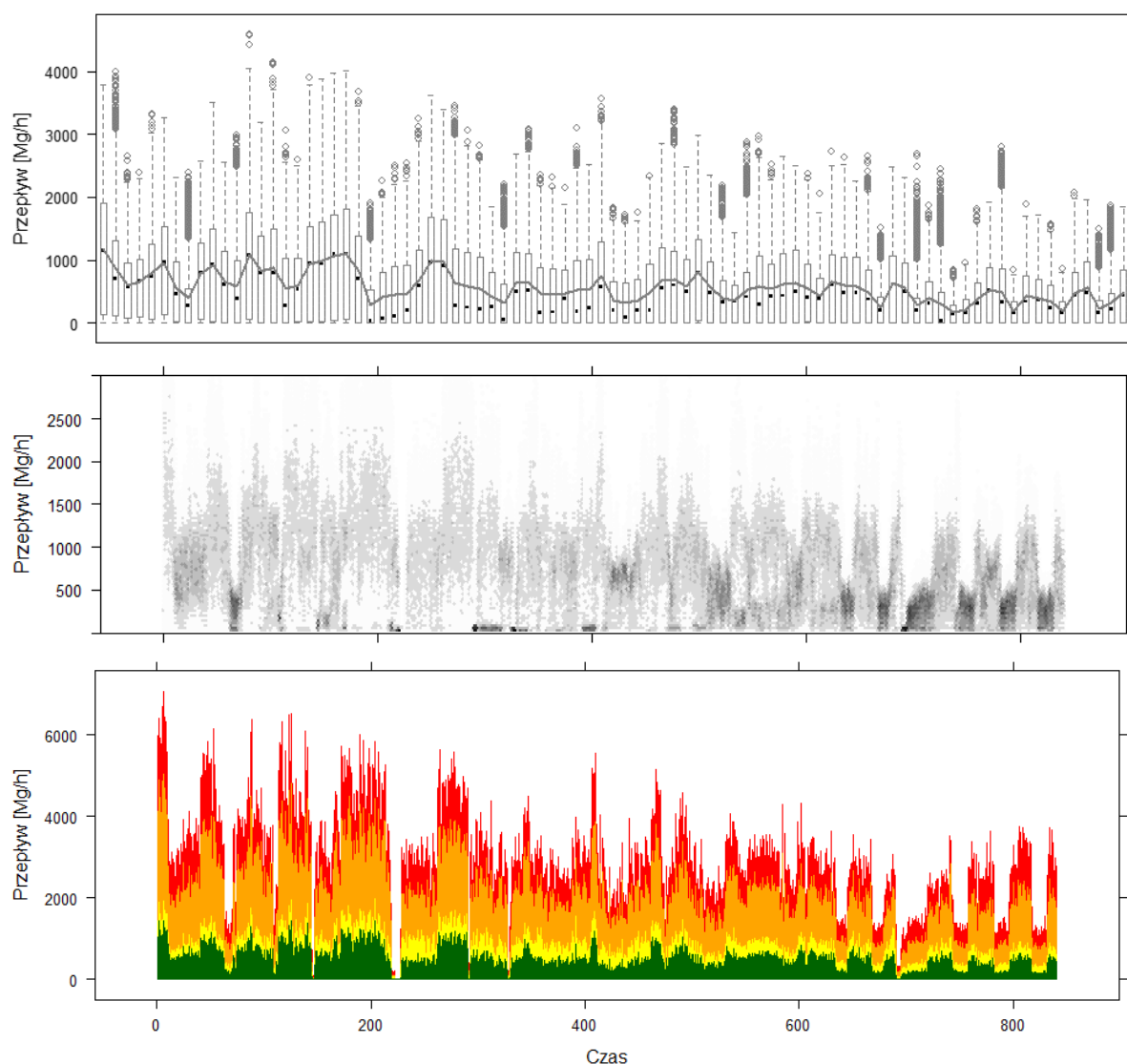
Rysunek 7.5. Przepływ i akumulacja urobku dwóch różnych przenośników taśmowych; a) przepływ podlegający dużym wahaniom; b) przepływ podlegający ograniczonym wahaniom (opracowanie własne).

W następnym kroku przeprowadzone zostały badania obejmujące poszczególne obiekty biorące udział w procesie transportowym. Wiele walorów praktycznych posiada ilustracja korelacji dwóch wielkości rejestrowanych na poziomie obiektu – akumulacji i przepływu masy urobku (rys 7.5). Na rysunku 7.5 zaprezentowano wykresy dla dwóch węzłów. Różnią się one istotnie z uwagi na rodzaj źródła nadawy i gabaryty obiektów. W jednym z przypadków (rys. 7.5a) przepływ urobku zmienia się dynamicznie w szerokim zakresie przy podobnych ilościach urobku skumulowanego na obiekcie – oznacza to duże zróżnicowanie nadawy urobku. Sytuacja taka może mieć miejsce w części odstawy zbiorczej łączącej urobek z wielu źródeł lub w bezpośredniej odstawie urobku z kompleksu strugowego. W drugim z przypadków przepływ jest bardziej stabilny i zmienia się w ograniczonym stopniu, a w pewnym zakresie ilość urobku akumulowanego jest ściśle proporcjonalna do wartości przepływu – oznacza to nieciągłe podawanie w czasie względnie stabilnej masowo strugi urobku. Analiza przedstawionych wykresów, ich parametryzacja, zastosowanie funkcji grupujących pozwala dodatkowo sklasyfikować i opisać warunki eksploatacji obiektów, co może odgrywać zasadniczą rolę w prawidłowym planowaniu ich przyszłego funkcjonowania.



Rysunek 7.6. Przepływ i akumulacja urobku dla wybranego przenośnika taśmowego (opracowanie własne).

Jedną z podstawowych metod analitycznych stanowi analiza rozkładów akumulacji urobku i przepływu urobku na obiektach w sensie prawdopodobieństwa wystąpienia danych wartości. Na wykresach zamieszczonych na rysunku 7.6 zaprezentowano rozkłady sporządzone dla jednego z obiektów. Kształt wykresów pokrywa się z obserwowanymi w rzeczywistości przypadkami. Jednocześnie uzasadniona staje się analiza zmienności rozkładów wartości w czasie. W tym celu można się posłużyć tzw. wykresem pudełkowym, dwuwymiarowym histogramem lub też wartościami agregowanymi z rozkładów (m.in. wartością średnią, wartością średnią niezerową, percentylami) (rys. 7.7).

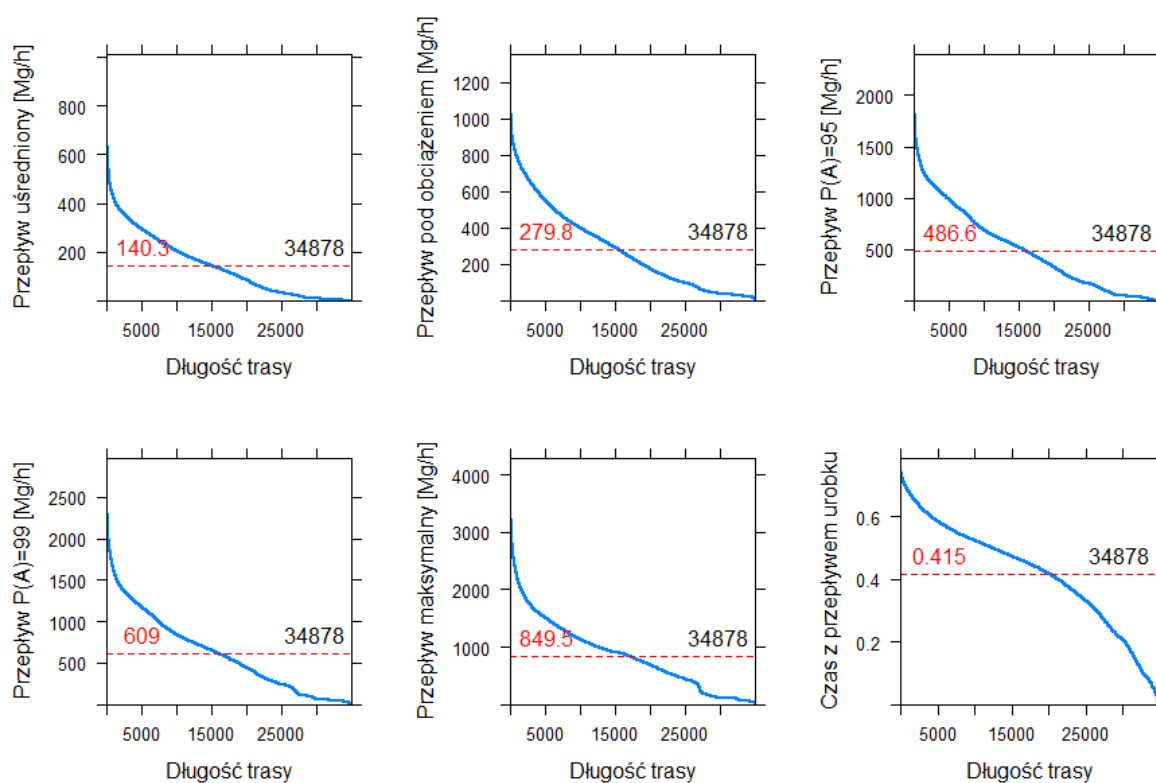


Rysunek 7.7. Zapis czasowy przepływu urobku wybranego obiektu; wykres pudełkowy; histogram 2d, wartości odczytane z rozkładów – kolejno od najmniejszej: wartość średnia, wartość średnia niezerowa, percentyl $P(a)=0.95$, percentyl $P(A)=0.99$ (opracowanie własne).

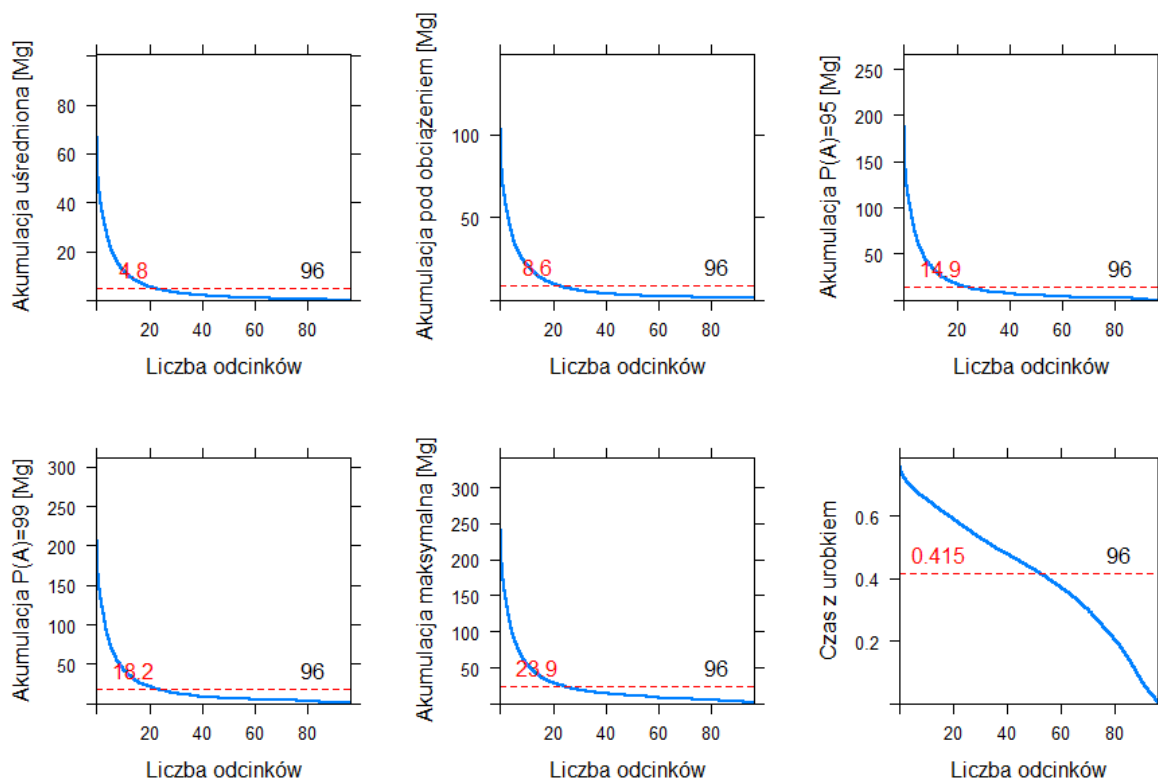
Analiza zmienności warunków pracy w czasie pozwala na etapie wczesnej symulacji stwierdzić, w którym okresie odcinek, maszyna lub urządzenie transportowe poddawane będzie nasilonemu obciążeniu, a w którym zasadniczo nie bierze udziału w procesie, co pozwala poza parametrami techniczno-ruchowymi zaplanować czynności związane z jego remontem, modernizacją lub zmianą parametrów ruchowych.

7.2.2. Wyniki symulacji długookresowej

Właściwa reprezentacja i podsumowanie wyników długookresowej symulacji procesów transportowych w kopalni podziemnej na przestrzeni kilkunastu lat eksploatacji kopaliny jest zadaniem wymagającym przemyślanego podejścia. Podstawowe zastosowanie znajdują tutaj metody statystycznej reprezentacji poszczególnych kryteriów oceny w aspekcie wprowadzanych zmian lub różnych alternatyw danych wejściowych. Na rysunkach 7.8 oraz 7.9 przedstawiono rozkłady wartości kluczowych parametrów poddawanych ocenie – przepływów masy oraz ilości masy gromadzonej na obiektach. Dane te, po odniesieniu do rzeczywistych możliwości transportowych lub akumulacyjnych obiektów, pozwalają między innymi na ocenę niezawodności oraz efektywności energetycznej procesu. Jednocześnie przygotowanie wyników w postaci wykresu uporządkowanego opisanego dodatkowo w łącznej długości dróg odstawczych, pozwala zidentyfikować wariant najkorzystniejszy z uwagi na wielkość rozpatrywanej do utrzymania infrastruktury transportowej.

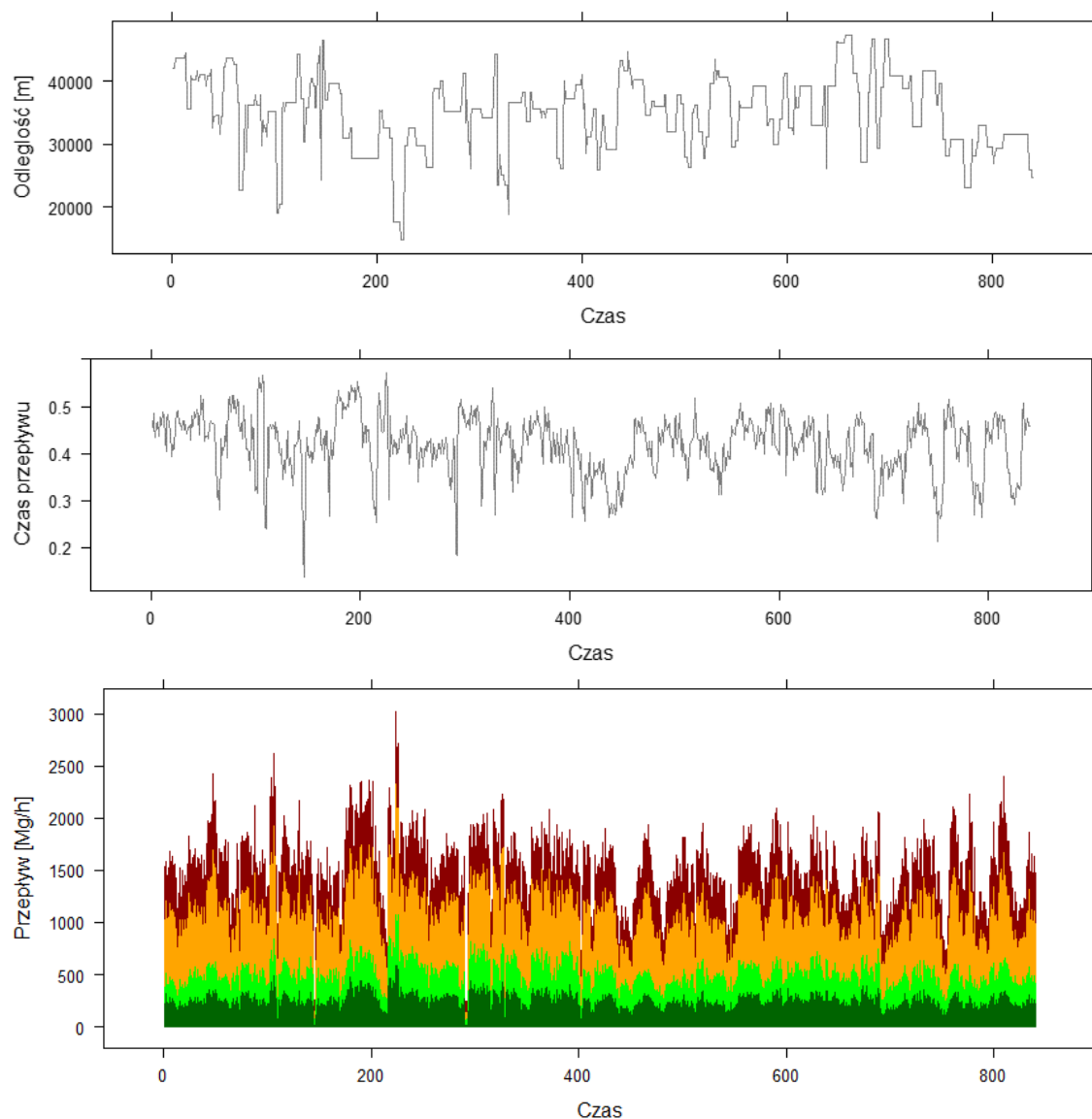


Rysunek 7.8. Wykres uporządkowany przepływu urobku w funkcji łącznej długości dróg odstawy (opracowanie własne).



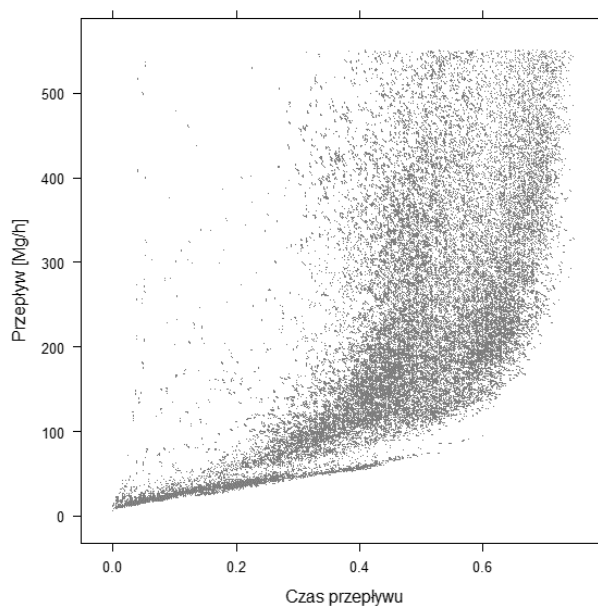
Rysunek 7.9. Wykres uporządkowany akumulacji urobku w funkcji liczebności wyodrębnionych obiektów (opracowanie własne).

Zastosowane zestawienie danych wyjściowych zostało użyte jako jeden z podstawowych sposobów statystycznego podsumowania i tworzone jest poprzez naniesienie kolejnych wartości wraz z cechą opisującą obiekt (przykładowo długością drogi transportowej), a następnie uporządkowanie wartości od największej do najmniejszej. Dla osi x cecha ilościowa podzielona zostaje przez ilość próbek czasowych użytych w celu budowy wykresu, tj. w przypadku zaistniałej symulacji 840 kolejnych 10-dniowych przedziałów czasu poddanych badaniu. Jednocześnie uzasadnione jest zobrazowanie wybranych zagregowanych parametrów poprzez pojedynczą wartość opisującą dany przedział czasu, reprezentującą całą populację obiektów. W ten sposób na podstawie danych wyjściowych z modelu RMS mogą być przygotowane wykresy prezentujące między innymi zmienną długość dróg odstawczych w czasie, średni przepływ urobku w systemie oraz średni przepływ w obrębie obiektów. Dane wyjściowe przyjmują postać zagregowanych wartości ważonych dowolnie przyjętą cechą poszczególnych elementów.



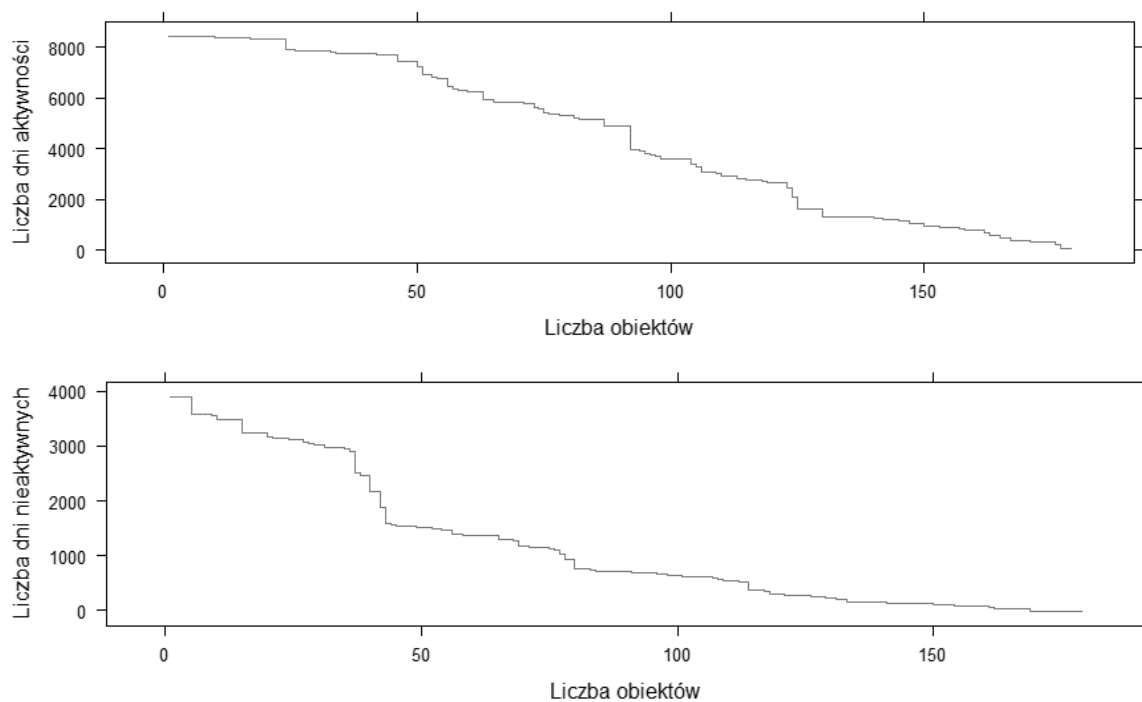
Rysunek 7.10. Przebieg czasowy zagregowanych parametrów procesu transportowego (łącna odległość transportu urobku, współczynnik czasowy przepływu urobku, wskaźniki statystyczne wartości przepływu – kolejno od najmniejszej: wartość średnia, wartość średnia niezerowa, percentyl $P(a)=0.95$, percentyl $P(A)=0.99$) (opracowanie własne).

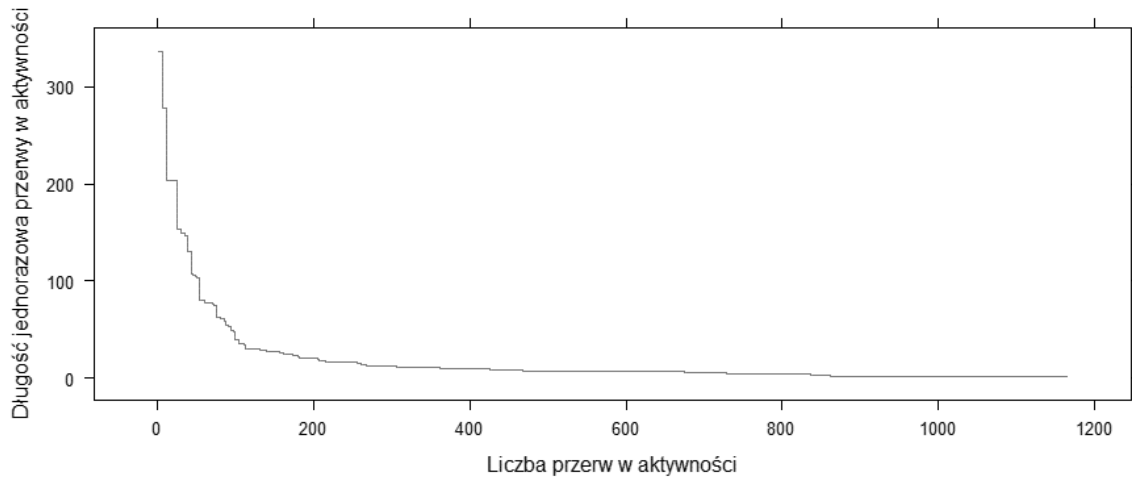
Wykres na rysunku 7.10 wykonany został analogicznie jak wcześniejszy wykres uporządkowany, z tą różnicą, że sporządzona jest agregacja wartości dla wszystkich obiektów w funkcji czasu. W pewnych sytuacjach agregacja danych może zostać celowo pominięta – jak zaprezentowano to na rysunku 7.11. Tego rodzaju podejście może stanowić źródło ciekawej wiedzy na temat warunków realizacji procesu w ujęciu holistycznym, stanowiąc punkt początkowy procesu głębszej eksploracji danych wynikowych z modelu RMS.



Rysunek 7.11. Wykres zależności współczynnika czasu oraz wartości przepływu dla wybranych obiektów transportowych (opracowanie własne).

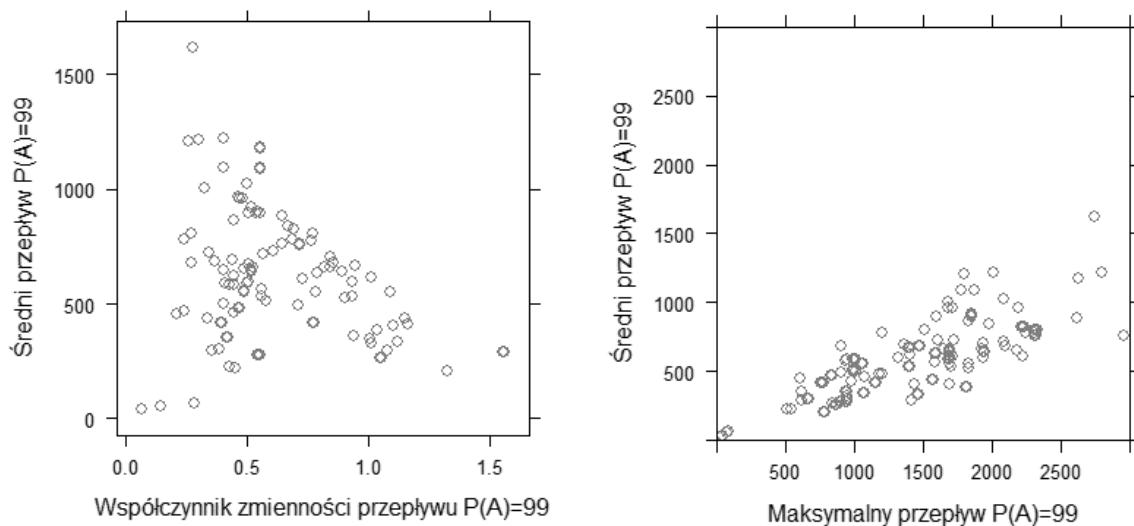
Jednym z głównych argumentów przemawiających za zastosowaniem modelu długookresowego są korzyści wynikające z wydłużenia czasu analizy mające odzwierciedlenie w identyfikacji istotnych zmian w zakresie wykorzystania elementów transportowych. Ocena przebiegu eksploatacji obiektów pozwala zidentyfikować i pogrupować obiekty z uwagi na przewidywaną ciągłość eksploatacji i czasowe zapotrzebowanie na realizację funkcji transportowej (rys. 7.12).





Rysunek 7.12. Wykresy podsumowujące ciągłość zapotrzebowania na realizację funkcji transportowych (opracowanie własne).

Badanie ciągłości realizacji zadań transportowych może być skoncentrowane wokół konkretnych elementów (jak w dalszej części rozdziału) lub poszczególne momenty wyłączające dany odcinek z ruchu traktowane mogą być jako zdarzenia dyskretne, w odniesieniu do których zasadniczą wagę odgrywa okres wyłączenia z ruchu. Pozwala to zdecydować o ewentualnych czynnościach obsługowych, utrzymaniu lub demontażu i zabudowie nowej infrastruktury w miejscu istniejącej. Jednocześnie zastosowanie sposobu agregacji danych dla obiektów pozwala wyodrębnić obiekty, których planowane obciążenie podlega istotnym zmianom w funkcji czasu (rys. 7.13). Mowa tu zarówno o zmienności średniego przepływu urobku, jak i zmienności górnej wartości rozkładu przepływu strugi urobku w czasie $P(A)=0.99$. W wyniku badań symulacyjnych stwierdzono, że górna wartość przepływu ($P(A)=0.99$) ma zdecydowanie większe znaczenie z perspektywy utrzymania ciągłości.



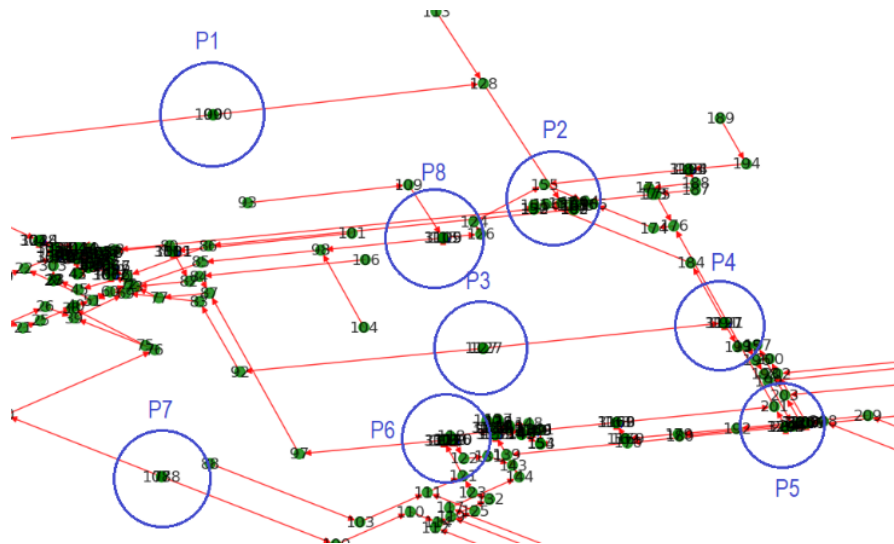
Rysunek 7.13. Korelacje pomiędzy wartościami średnimi, współczynnikiem zmienności i wartością maksymalną obserwowaną w okresie symulacji długookresowej (opracowanie własne).

Realizacja długookresowych badań symulacyjnych pozwoliła zidentyfikować bardzo korzystny obszar do stosowania metod optymalizacji liniowej lub programowania ograniczeń. Dobór parametrów techniczno-ruchowych obiektów, definicja okresów ich przezbrajania, remontów, wymiany i modernizacji, strategia nadążnego dopasowania do zmieniających się warunków eksploatacji, stanowić mogą bardzo interesujący aspekt będący konsekwencją badań symulacyjnych, gdzie metody

optymalizacyjne bazować mogą bezpośrednio na danych dostarczonych z modelu. Niestety w sytuacji, w której parametry ruchowe oddziaływać będą na przebieg procesu transportowego, a ich wpływ nie będzie się ograniczać do maksymalnych, dopuszczalnych wartości i ograniczeń, konieczne staje się wykonanie powtórnych badań, przez co integracja modelu symulacyjnego jako części iteracyjnej pętli optymalizacyjnej prowadzi do skrajnego wydłużenia czasu badań. W efekcie uzasadnione wydaje się zastosowanie w tym celu stochastycznych metod optymalizacji.

7.2.3. Określenie wariantów poddanych analizie

Aby przeprowadzić wielokryterialną analizę i ocenę procesów transportowych, konieczne jest zidentyfikowanie alternatywnych scenariuszy przebiegu procesów w czasie. W obrębie niniejszego rozdziału walidację modeli symulacyjnych przeprowadzono na przykładzie wyboru jednego z trzech wariantów prowadzenia drogi transportowej w punkcie P4 (rys 7.14).



Rysunek 7.14. Miejsca decyzyjne, w których istnieje teoretyczna możliwość przekierowania urobku (opracowanie własne).

Główne momenty decyzyjne umiejscowione w obrębie punktów P1-P7 wskazane na rysunku 7.14 obejmują propozycje wyboru kierunków odstawy. Decyzje te mogą mieć charakter ciągły i wiążący lub być dodatkowo zmienne w funkcji czasu lub też mogą być realizowane jednocześnie oba warianty rozdziału urobku z pewnymi założeniami, co do sterowania procesem transportowym w czasie w zależności od przyjętych, operacyjnych kryteriów i warunków realizacji procesu na poziomie całej kopalni.



Rysunek 7.15. Decyzja i okres ich oddziaływania przedstawione w postaci wykresu Ganta. (opracowanie własne).

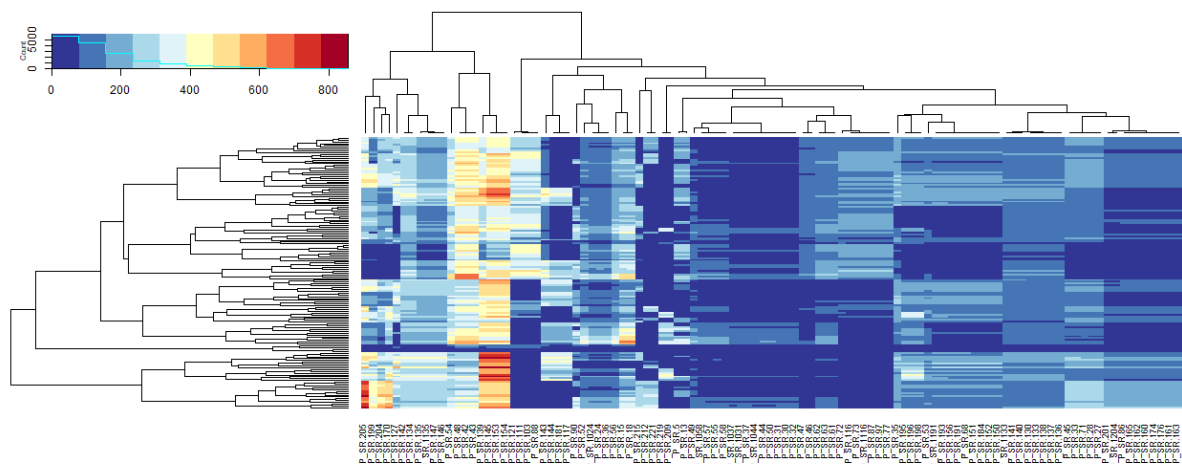
Dla poszczególnych punktów decyzyjnych na podstawie harmonogramu i wyników symulacji długookresowej sporządzono wykres prezentujący aktywność procesu transportowego w danym punkcie (rys 7.15). Teoretycznie wskazane na rysunku punkty przekierowania urobku dają następujące możliwości:

- a) P1 oraz P8: Przekierowanie urobku z północnych pól eksploatacyjnych w rejon szybu północnego lub przekierowanie w rejon północno – wschodni do punktu decyzyjnego P2.
- b) P2: Przekierowanie urobku z pól północno-wschodnich w rejon szybu północnego lub wschodnimi drogami transportowymi w kierunku południowym.
- c) P3: Przekierowanie urobku z pola środkowego w kierunku zachodnim do szybu północnego lub na wschód do miejsca decyzyjnego (P4).
- d) P4: Przekierowanie urobku z rejonu pól środkowych w kierunków północnym lub południowym.
- e) P5: Przekierowanie urobku z pól południowo – wschodnich w rejon szybu południowego lub na północ wschodnimi drogami transportowymi.
- f) P6: Przekierowanie urobku z rejonu szybu północnego do południowego lub z rejonu północnego do południowego.
- g) P7: Odstawa urobku z zachodnich pól eksploatacyjnych w kierunku na szyb północny lub szyb południowy.

Należy mieć na uwadze, że każdy z opisanych wariantów wymaga dodatkowej weryfikacji w aspekcie wentylacji oraz zabezpieczenia dróg transportu materiałów oraz ludzi. Ponadto każdy z nich charakteryzują co najmniej dwa możliwe rozwiązania odnośnie wyboru kierunku. Co więcej w niektórych przypadkach możliwa jest czasowa zmiana decyzji lub też zapewnienie technicznych możliwości odbioru urobku jednocześnie w obu alternatywnych kierunkach. Dotyczy to szczególnie wschodnich dróg transportowych, gdzie urobek może być skierowany z północy na południe (punkt P2) z południa na północ (punkt P5) lub w obu kierunkach (punkt P4). Decyzje podjęte w punktach P2, P4 i P6 są więc ze sobą ściśle połączone, a ewentualne odstępstwa od jednego rozwiązania określone są przez czasową aktywność poszczególnych punktów transportowych urobku.

Jedną z trudniejszych decyzji w przykładowym systemie odstawy jest skierowanie urobku z rejonu środkowego pola eksploatacyjnego (P4), w przypadku którego transport na szyb północny, jak i południowy wydaje się w równym stopniu uzasadniony z uwagi na zbliżoną odległość. Stąd też zważając na potrzeby w zakresie realizacji badań walidacyjnych, zdecydowano się przeprowadzić przykładową analizę 3 scenariuszy: północnego, południowego i obustronnego dla środkowego pola eksploatacyjnego w punkcie decyzyjnym P4.

W celu porównania poszczególnych scenariuszy ograniczono horyzont czasowy do czasu aktywności punktu decyzyjnego P4 – tj. 1600 dni produkcyjnych. Na podstawie wyników modelu długookresowego przeprowadzono grupowanie według podobieństwa stanów realizacji procesu transportowego w obrębie całego systemu odstawy (rys. 7.16). Wyniki te pozwalają określić podobieństwo wymuszeń oddziałujących na układ transportowy zarówno w obrębie powołanych 1600 dni produkcyjnych, jak i całego okresu eksploatacji. Grupowanie względem punktów pomiarowych pozwala na identyfikację gałęzi, które z uwagi na zbliżony przebieg procesu można traktować jednorodnie. Tego rodzaju technika została w ramach badań wykorzystana wielokrotnie do planowania eksperymentów z zastosowaniem modeli deterministycznych, w celu maksymalizacji okresu czasu, dla którego mogą one być reprezentatywne. Grupowanie obiektów może być z powodzeniem wykorzystane również na etapie uczenia maszynowego układów sterujących lub optymalizacji zagadnień doboru technicznych środków realizacji procesu i ich nastaw techniczno-ruchowych.



Rysunek 7.16. Wyniki grupowania wyników symulacji w aspekcie wzajemnego podobieństwa obiektów (oś X) oraz próbek czasowych (oś Y) (opracowanie własne).

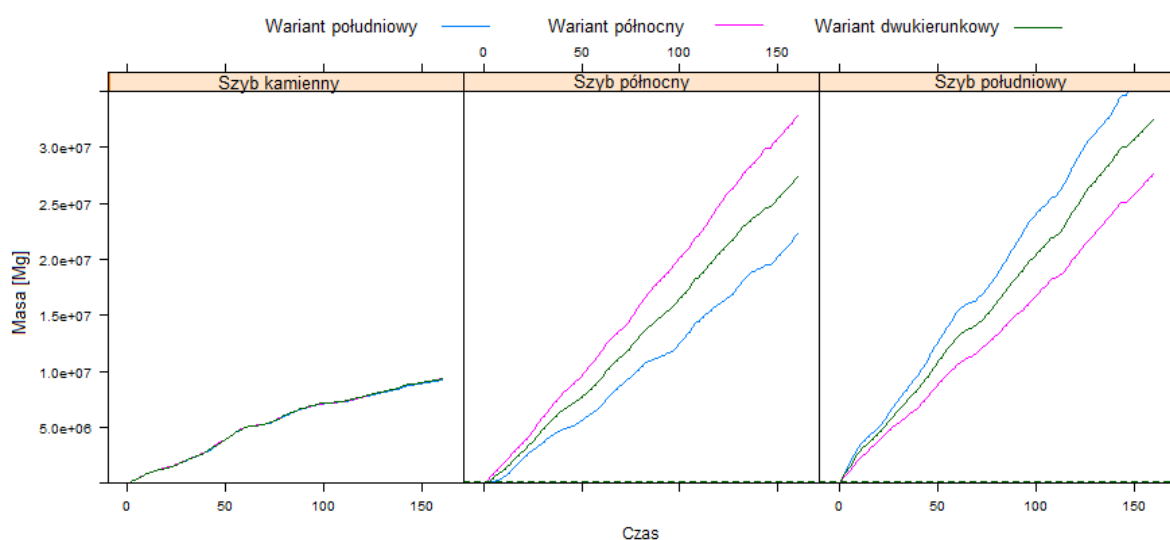
W wyniku klasteryzacji uzyskanych danych stwierdzono, że można wyodrębnić ok. 8 zbliżonych stanów realizacji procesu transportowego, które charakteryzują się względnie dużym podobieństwem z uwagi na stopień obciążenia poszczególnych elementów systemu. Zamieszczone na rysunku 7.16 dendrogramy wykorzystane zostały do planowania szczegółowych, wybiórczych eksperymentów symulacyjnych, tak aby w jak największym stopniu odwzorowywały one warunki obecne w całym analizowanym okresie czasu. Docelowo mogą one posłużyć również do automatyzacji tego procesu.

W ramach badań walidacyjnych modeli określono przykładową kolejność realizacji działań w aspekcie wielokryterialnej analizy wybranych scenariuszy:

1. Przeprowadzenie wstępnej symulacji długookresowej.
2. Identyfikacja i wybór najbliższych punktów decyzyjnych wraz z opisem ich wzajemnej interakcji.
3. Wielowariantowe badania w pełnym horyzoncie czasowym najbliższego punktu decyzyjnego.
4. Wielowariantowe badania uzupełniające – ciągłość procesu.
5. Wielowariantowe badania uzupełniające – możliwości technologiczne.
6. Ocena wielokryterialna, dostrajanie modelu, powrót do punktu 3.

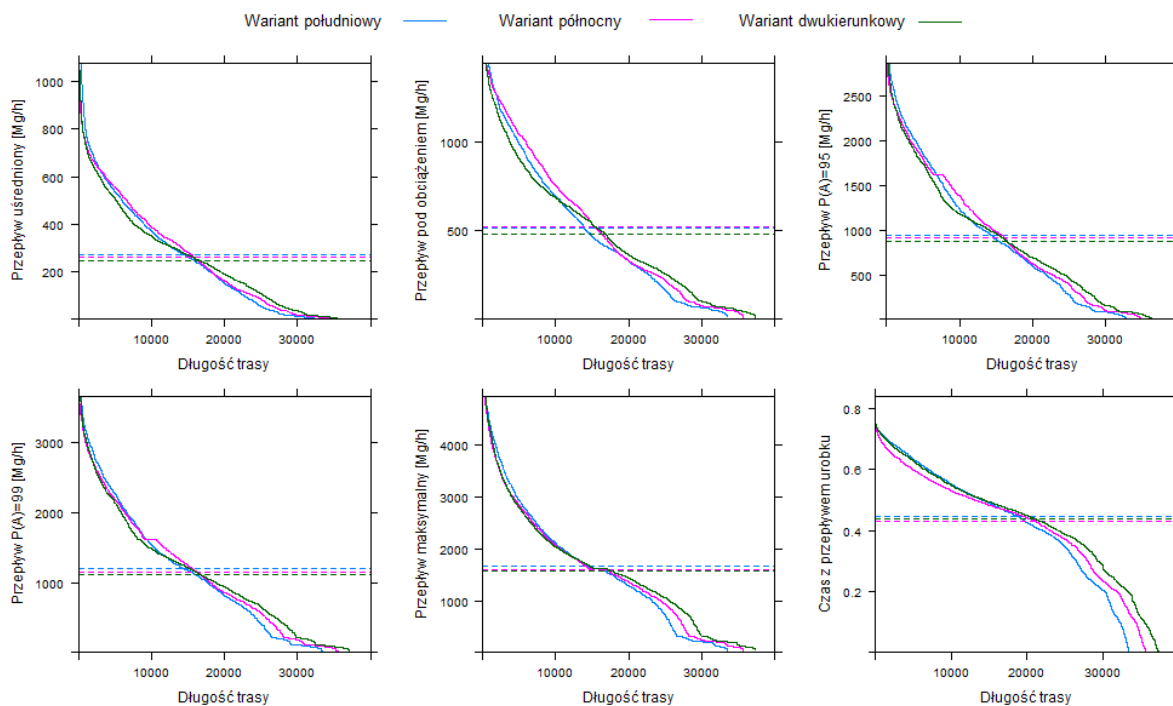
7.2.4. Badanie wydajności i efektywności procesu transportowego z użyciem modelu rekurencyjnego (RMS)

Model rekurencyjny został użyty w ramach wielokryterialnej analizy w celu określenia stopnia oraz rozkładu obciążenia poszczególnych elementów w funkcji czasu symulacji wynoszącego 1600 dni produkcyjnych. Zastosowanie modelu rekurencyjnego umożliwiło ocenę aktualnego długoterminowego harmonogramu eksploatacji oraz bieżącej i planowanej struktury elementów systemu przez wyniki opisujące przebieg procesu transportowego w czasie. Model rekurencyjny zawierał wyłącznie uproszczone mechanizmy interakcyjne oraz proste metody regulacji i sterowania procesem transportowym, których wytyczne mogły zostać udoskonalane w drodze stosowania modeli szczegółowych. Na rysunku 7.17 przedstawiono w sposób narastający wydobywanie mierzone na poszczególnych szybach wydobywczych.

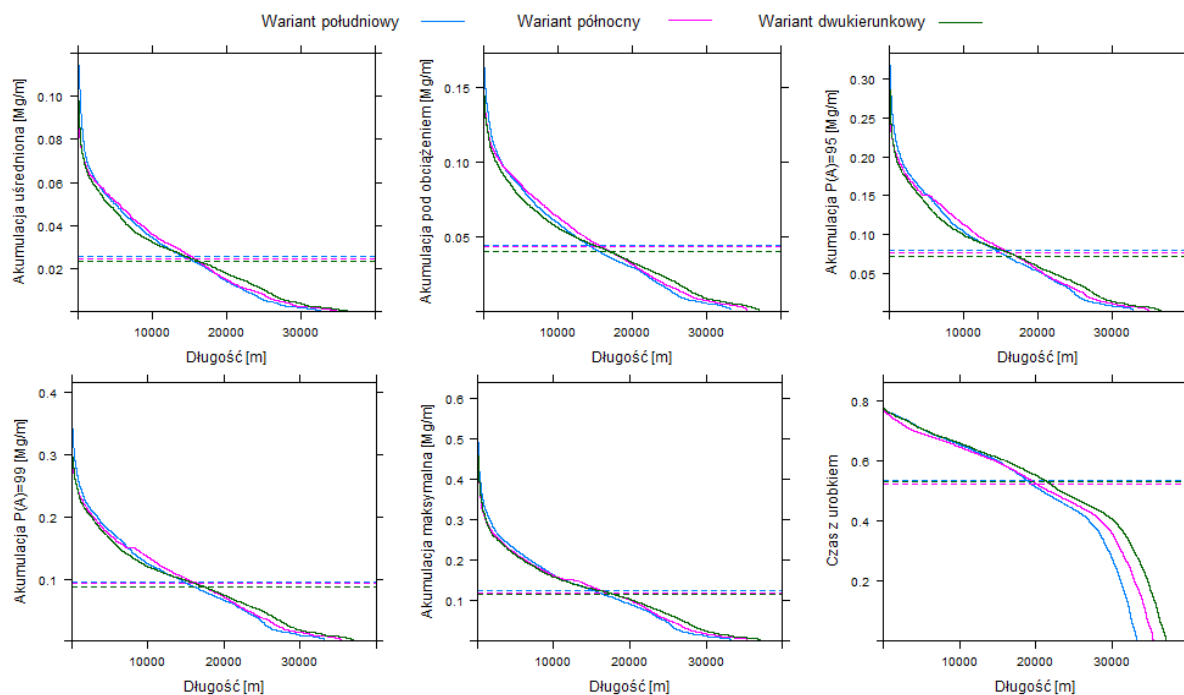


Rysunek 7.17. Wydobywanie narastające na poszczególnych szybach wydobywczych (opracowanie własne).

Dla wskazanych wariantów przeprowadzono wizualizację danych za pomocą technik wskazanych na początku rozdziału. Zauważyć można, że poszczególne warianty różnią się zarówno rozkładem obciążenia, jak i długością trasy transportowej. Najdłuższym pod względem długości trasy transportowej wariantem jest wariant zakładający utrzymanie obydwu dróg odstawy urobku. Szczegółowe wyniki opisujące poszczególne warianty przedstawione zostały na rysunkach 7.18 oraz 7.19.

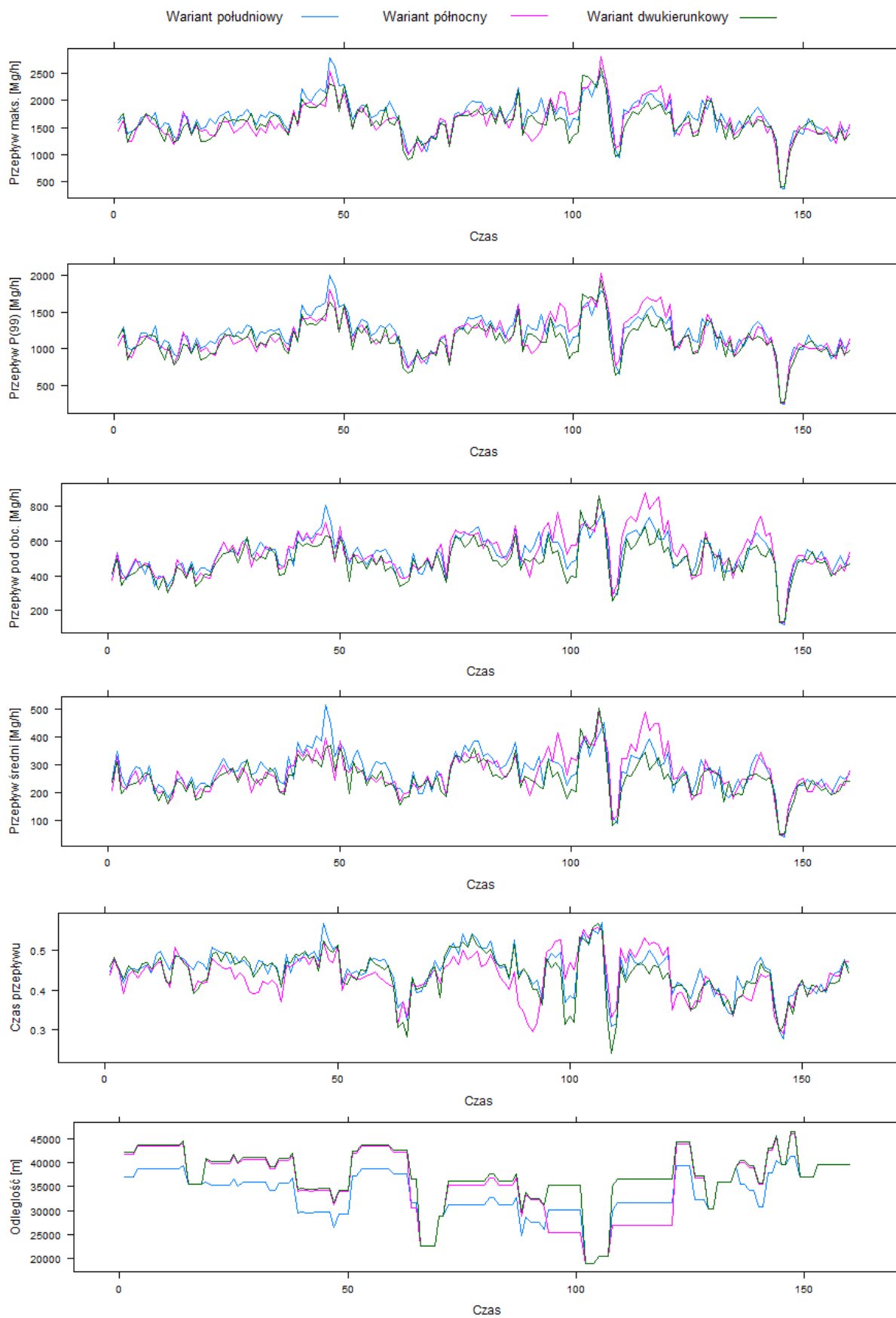


Rysunek 7.18. Przepływy urobku zarejestrowane dla poszczególnych wariantów (opracowanie własne).



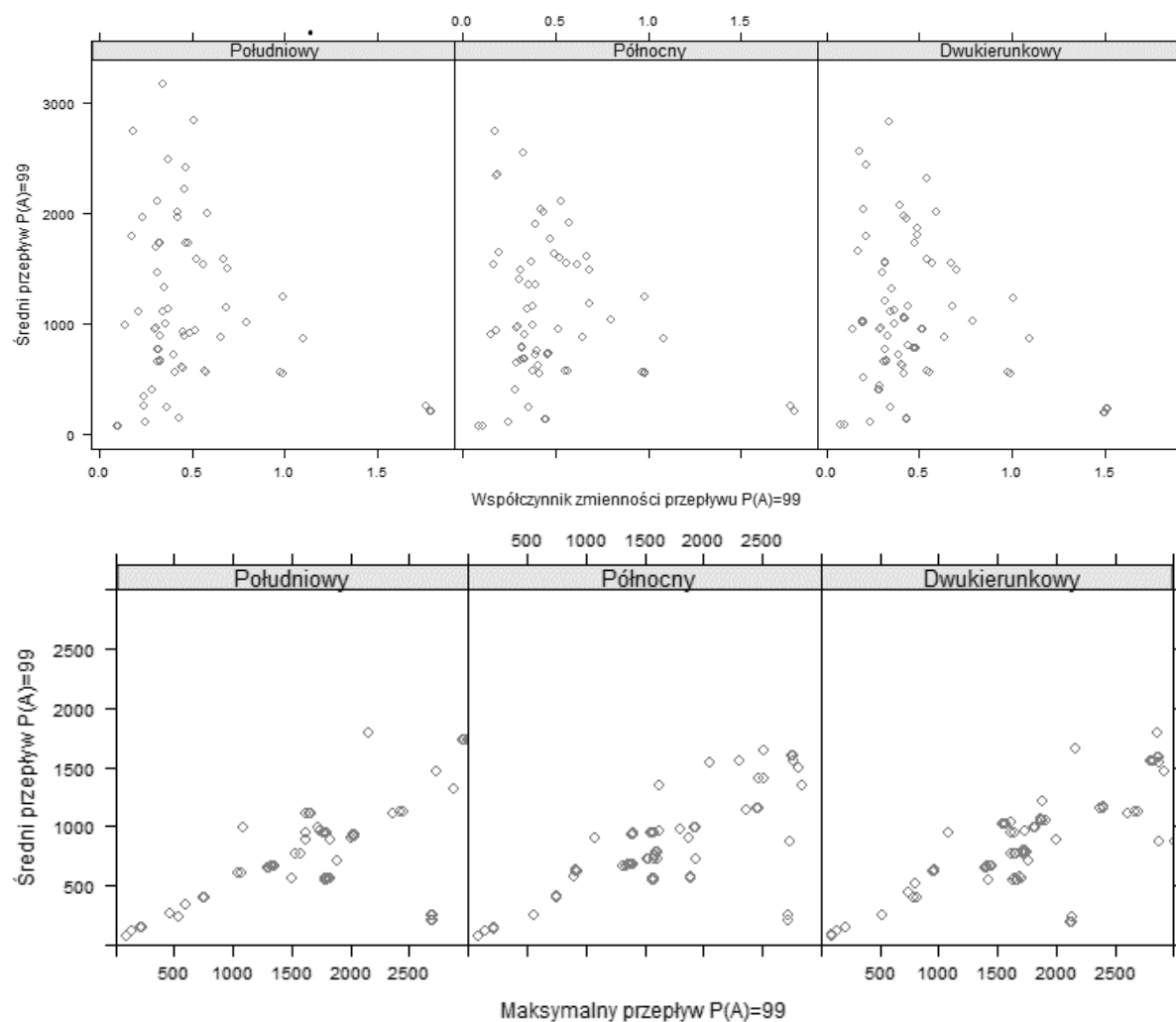
Rysunek 7.19. Akumulacja urobku zarejestrowana dla poszczególnych wariantów (opracowanie własne).

W dalszej kolejności analizie poddana została zmienność obciążeń urobkiem w funkcji czasu symulacji, czasowy wskaźnik obciążenia elementów transportowych oraz łączna długość utrzymywanych dróg transportowych. Wykresy te zostały zamieszczone zbiorczo na rysunku 7.20.



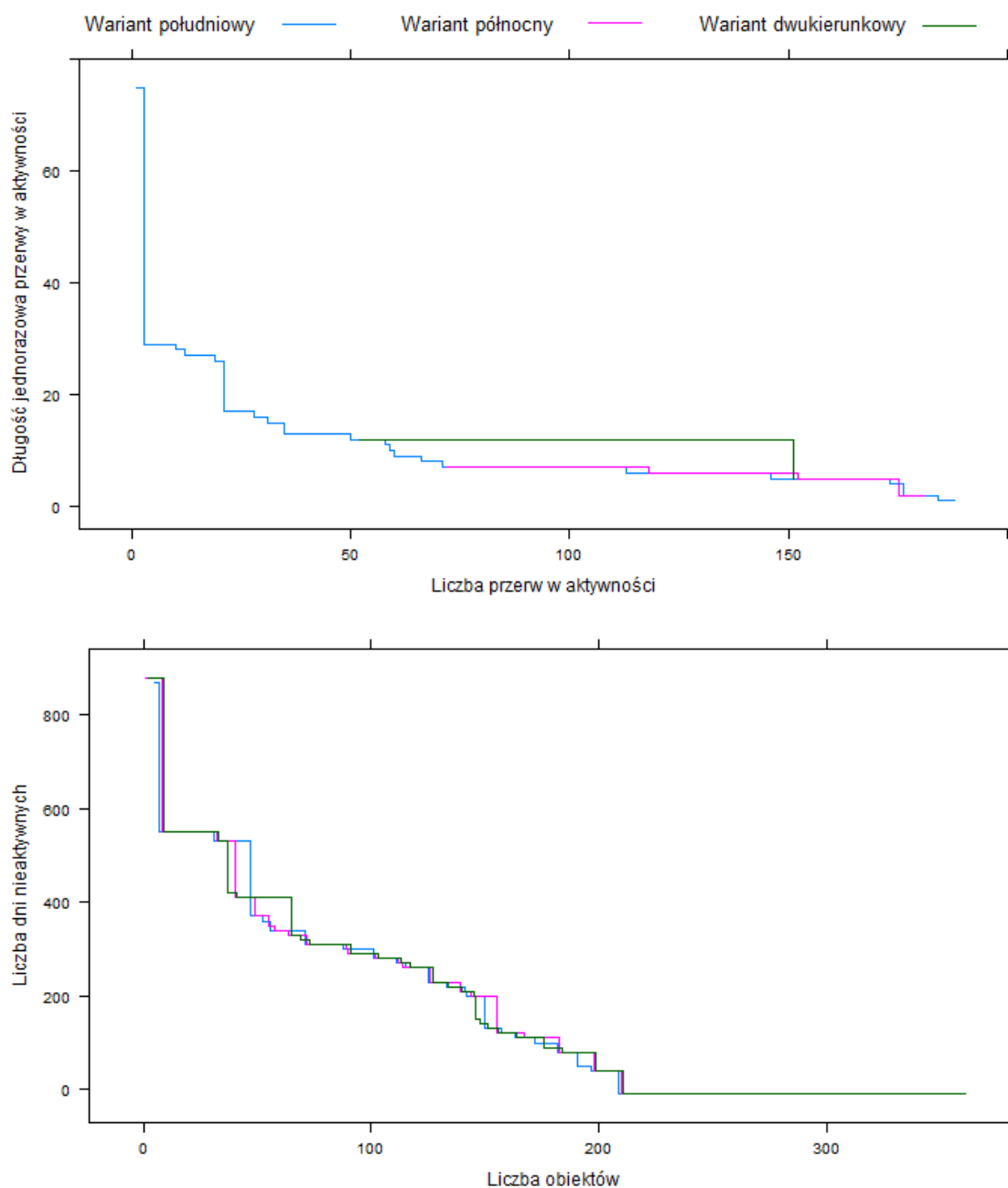
Rysunek 7.20. Przebiegi czasowe zagregowanych parametrów procesu transportowego (opracowanie własne).

Dalszą analizę wyników przeprowadzono na bazie średniej wartości przepływu odpowiadającej 99 percentylowi tejże wartości, jak również poprzez obserwację współczynnika zmienności tej wartości, porównanie wartości średniej do wartości maksymalnej zaobserwowanej podczas badań (rys 7.21).



Rysunek 7.21. Średnie wartości przepływu $P(A)=99$ a maksymalny uzyskany w badaniach przepływ $P(A)=99$ oraz współczynnik zmienności przepływu $P(A)=99$ zestawione dla poszczególnych wariantów wielokryterialnej oceny (opracowanie własne).

W następnym kroku przygotowano wykresy łącznego czasu przerw w aktywności elementów systemu oraz długości tych przerw – dane te zilustrowano na rysunku 7.22.



Rysunek 7.22. Wykresy podsumowujące ciągłość zapotrzebowania na realizację funkcji transportowych dla poszczególnych wariantów wielokryterialnej oceny (opracowanie własne).

Wyniki pozyskane z modelu RMS w okresie objętym badaniami poddane zostały parametryzacji, wybrane wskaźniki zamieszczono w tabeli 7.3. Oprócz wyników kluczowe znaczenie dla zrozumienia kontekstu danych pełni analiza wykresów przedstawionych w niniejszym rozdziale.

Jednocześnie należy zauważyć, że model analityczny nie obejmował porównania uzyskanych wartości do maksymalnych obciążalności obiektów m.in. maksymalnej ilości urobku znajdującego się na taśmie lub miejscowych przekroczeń ilości urobku powodującej uszkodzenia mechaniczne bądź zakłócenie procesu transportu urobku. Pomimo iż tego rodzaju analiza byłaby uzasadniona, wymaga jednocześnie nadążnej optymalizacji: doboru istniejących i planowanych w przyszłości odcinków tras, tudzież parametrów ruchowych maszyn transportowych, co wykracza znacząco poza tematykę niniejszej pracy w pewnym stopniu wymuszając iteracyjne wykorzystanie stochastycznego modelu

symulacyjnego w połączeniu z technikami optymalizacyjnymi. Tym niemniej istniejący model może w przyszłości zostać rozbudowany o opisaną funkcjonalność.

7.2.5. Badanie ciągłości procesu transportowego z użyciem modelu interakcyjnego (IMS)

Komplementarność zastosowanych modeli symulacyjnych wynikająca z braku jednego, właściwego i efektywnego modelu pozwalającego ocenić wiele kryteriów realizacji procesu, wymaga wprowadzenia badań uzupełniających. W ramach niniejszych badań skoncentrowano uwagę na ryzyku związanym z awaryjnością szeroko rozumianym jako iloraz prawdopodobieństwa wystąpienia oraz skutków awarii. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia w pewnym stopniu mogła zostać wsparta modelem symulacyjnym, bowiem awaryjność nie wynika wyłącznie z lokalizacji, wieku i stanu technicznego, gabarytów maszyny transportowej lecz również procesu jej użytkowania który korespondować może z uzyskanymi w modelu długoterminowym charakterystykami obciążenia obiektu. Należy stwierdzić, że warunki eksploatacji obiektu technicznego to czynniki kluczowe warunkujące częstotliwość wystąpienia awarii. Tym niemniej modele symulacyjne mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim na etapie oceny skutków awarii i ich wpływu na zakłócenie realizacji podstawowych zadań transportowych. Do zadań tych zaliczyć można w pierwszej kolejności odbiór urobku z punktów załadunkowych niepowodujący zatrzymania wydobywania oraz dostarczenie urobku w sposób ciągły na powierzchnię, zwykle do zakładów przeróbki kopaliny, które odbywa się najczęściej za pośrednictwem szybów wydobywczych. Oba te zadania są ze sobą ściśle połączone zwykle w sposób elastyczny z uwagi na istnienie możliwości retencyjnych urobku.

W ramach pracy zidentyfikowano cztery podstawowe następstwa wystąpienia przerwy w ciągłości realizacji procesu transportowego:

- awaria nie skutkuje ograniczeniem produkcji i wydobywania na powierzchnię, skuteczna retencja oddziałowa i retencja w zbiornikach przyszybowych sprawia, że zakłócenie przepływu urobku zostaje nadrobione,
- awaria nie skutkuje ograniczeniem wydobywania w przodku, ogranicza jednak wydobywanie na powierzchnię, tj. pojawia się przesunięcie czasowe w wydobywaniu urobku na powierzchnię, umownie możliwe do nadrobienia w zależności od rozmiaru wąskiego gardła układu transportowego,
- awaria nie ogranicza wydobywania na powierzchnię, następuje przerwa w odstawie urobku z przodka, tj. zgromadzony nadmiar urobku w rozpatrywanej sytuacji pozwala wykorzystać w pełni możliwości transportowe systemu, występuje jednak przerwa w produkcji na jednym z przodków (w części przypadków z uwagi na przesunięcie realizacji prac pomocniczych możliwa do nadrobienia),
- awaria skutkuje ograniczeniem wydobywania oraz ograniczenie transportu na powierzchnię, brak odbioru urobku z przodka powoduje nieodwracalną utratę zdolności transportowych i produkcyjnych na przodku.

Zasadniczo sytuację można opisać poprzez utratę zdolności produkcyjnych w przodku lub utratę zdolności produkcyjnych w zakładzie przeróbki lub szybie wydobywczym, jeśli takowy stanowi wąskie gardło układu transportowego.

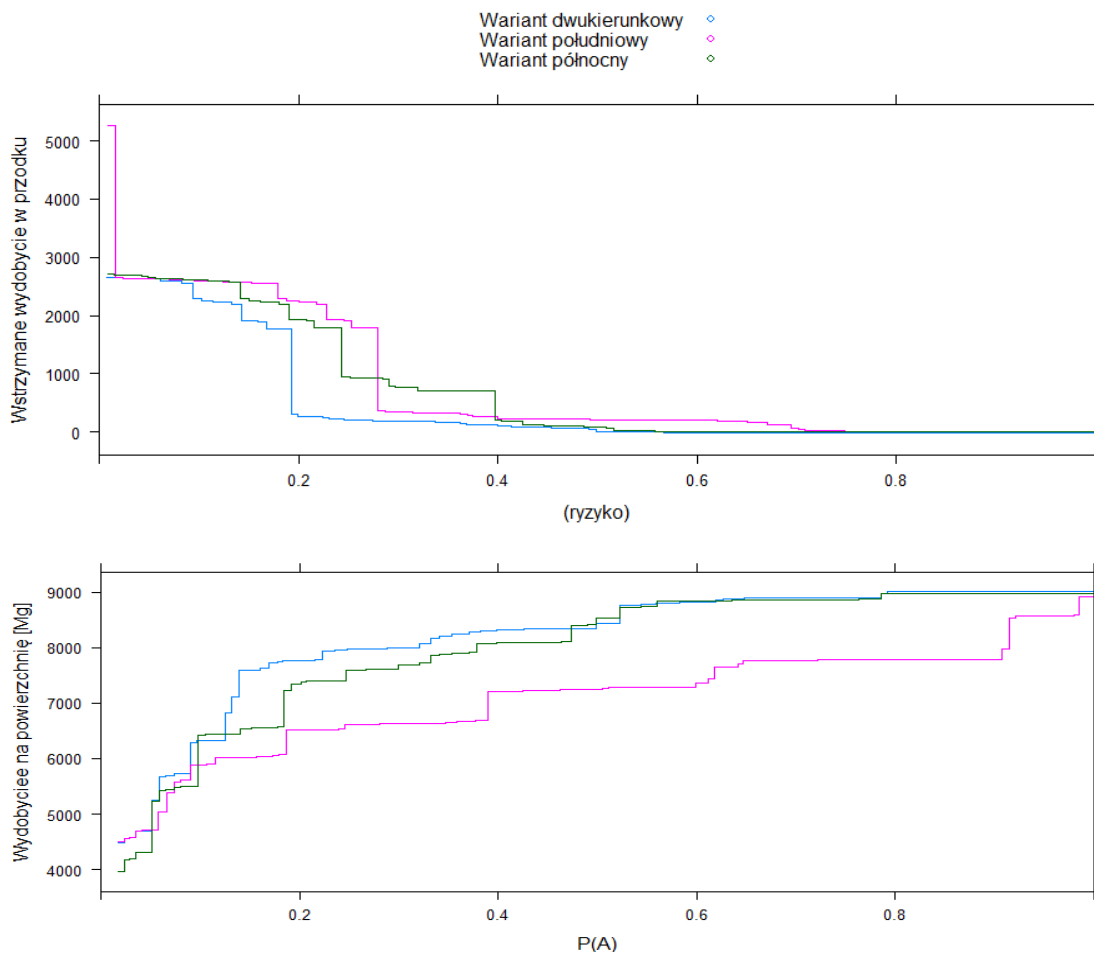
W przypadku analizy niezawodności i symulowanego wyłączenia obiektów uzasadnione jest zastosowanie symulacji deterministycznej zakładającej identyczny zapis czasowy nadawy urobku, co w „bloku symulacyjnym” RMS. Tego rodzaju zabieg pozwala w prosty sposób porównać ze sobą

rozpatrywane scenariusze poddane analizie wielokryterialnej, zachowując stochastyczny charakter całej symulacji.

Przeprowadzone badania symulacyjne zakładały znane prawdopodobieństwo awarii dla każdego z obiektów w każdej symulacji, niezależnie od czasu oraz stopnia obciążenia w danym wariancie. Z powodu braku źródła informacji odnośnie do związku pomiędzy długością, mocą a intensywnością eksploatacji pojedynczego obiektu przyjęto uproszczoną relację odwzorowującą znaczne różnice w długości poszczególnych obiektów (równanie 7.1).

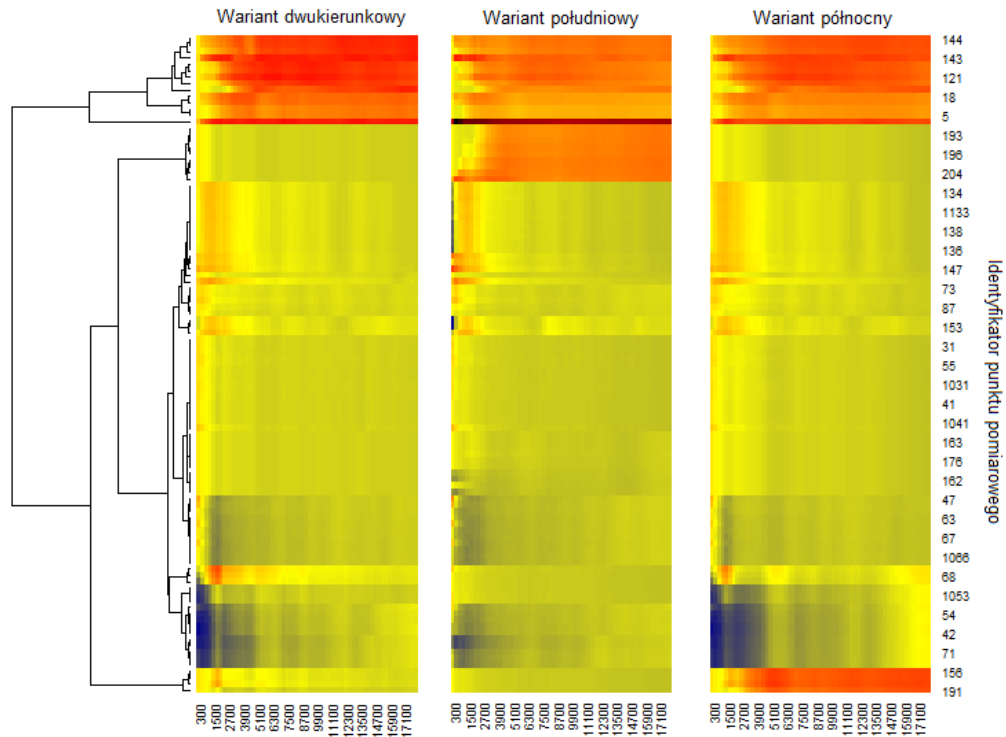
$$P(A) = I_a \cdot \left(1 + \left(\frac{L}{500}\right)\right) \quad 7.1$$

Gdzie $P(A)$ oznacza prawdopodobieństwo awarii przesyłnika taśmowego o długości L i intensywności awarii I_a . Dla zadanego prawdopodobieństwa awarii przeprowadzano czasowe wyłączenie danego elementu i obserwowano wpływ na przebieg realizacji zadań produkcyjnych oraz wydobyte na powierzchnię względem scenariusza bazowego – tj. scenariusza bez wystąpienia awarii. Uzyskane wyniki przedstawione w funkcji wykresu skumulowanego w funkcji prawdopodobieństwa awarii przedstawiono na wykresie 7.23. Wykres ten stanowi opis reprezentujący skutki awarii w funkcji prawdopodobieństwa jej zaistnienia.



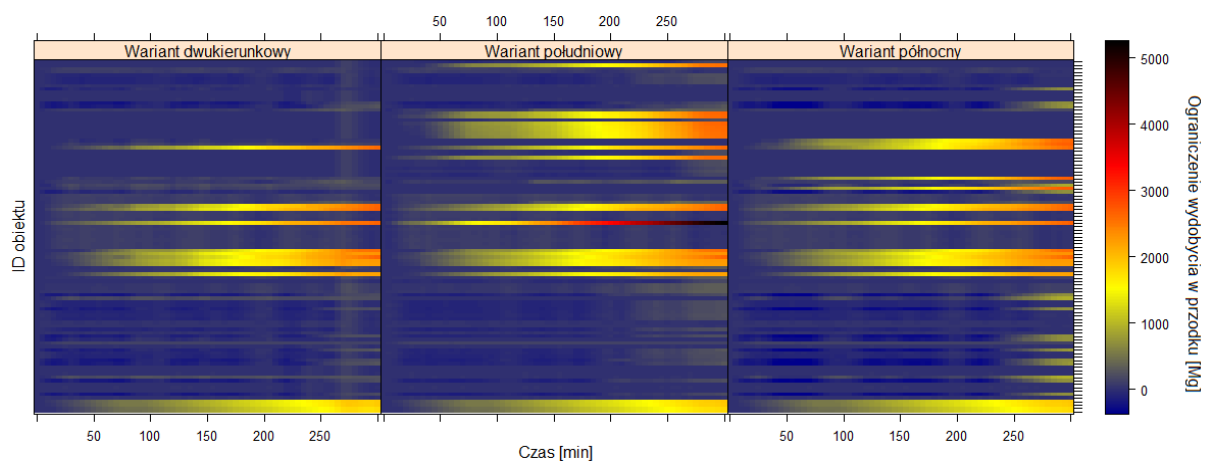
Rysunek 7.23. Utrata zdolności wydobywczych w przodku oraz wydobyte na powierzchnię dla poszczególnych wariantów wielokryterialnej oceny (opracowanie własne).

Wykresy uporządkowane zawarte na rysunku 7.24 stanowią szczegółowe podsumowanie wyników oceny niezawodności w aspekcie poszczególnych obiektów, których dotyczyła awaria. Zważywszy zarówno na wstrzymanie wydobycia na przodku, jak i ograniczenie wydobycia na powierzchnię, w odniesieniu do danych użytych w celu walidacji modeli, najkorzystniejszym wariantem jest rozwiązanie dwukierunkowe.



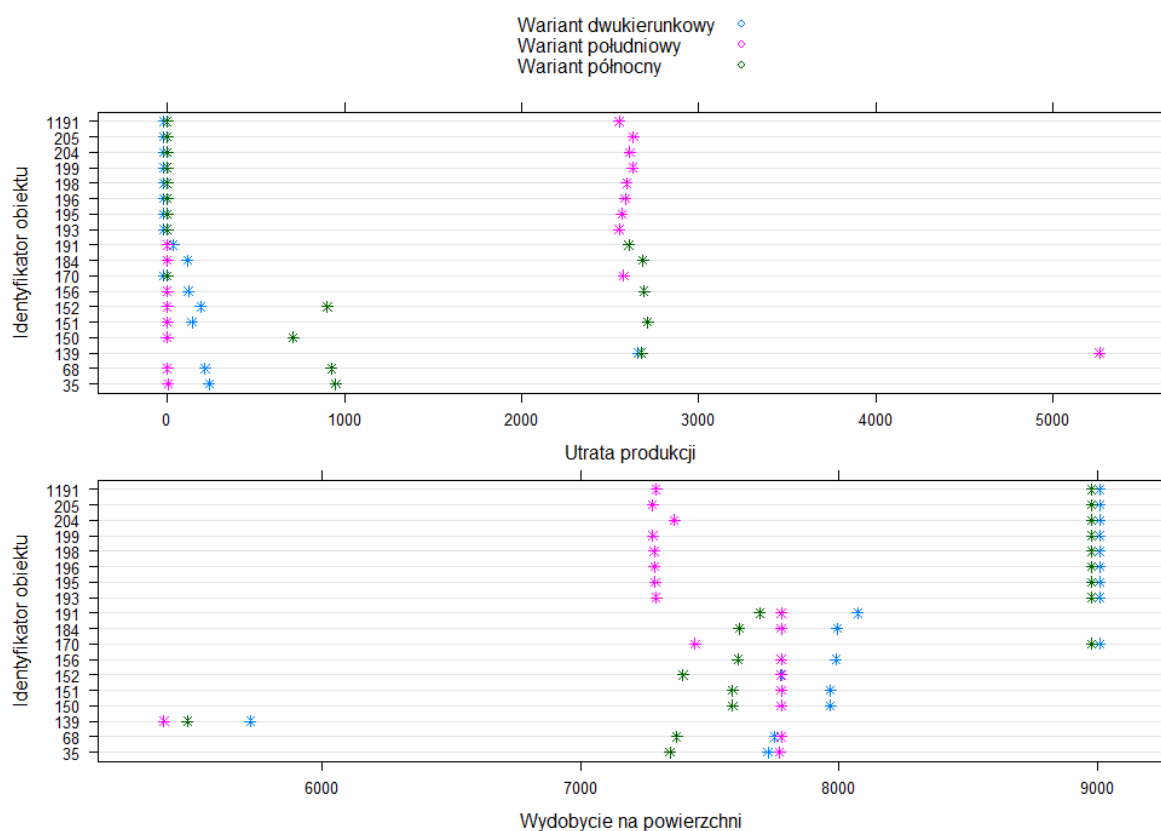
Rysunek 7.24. Grupowanie punktów awarii w aspekcie czasowego przebiegu utraty zdolności wydobywczych w przodku sporządzony dla wybranych elementów systemu odstawy (opracowanie własne).

Dodatkowych danych dostarczyć może zapis obejmujący grupowanie punktów z uwagi na miejsce w strukturze funkcjonalnej oraz czas, który upłynął od początku awarii. Dla poszczególnych scenariuszy w ten sposób sporządzić można dendrogram pozwalający na klasyfikację skutków awarii w obrębie elementów systemu transportowego (rys. 7.25).



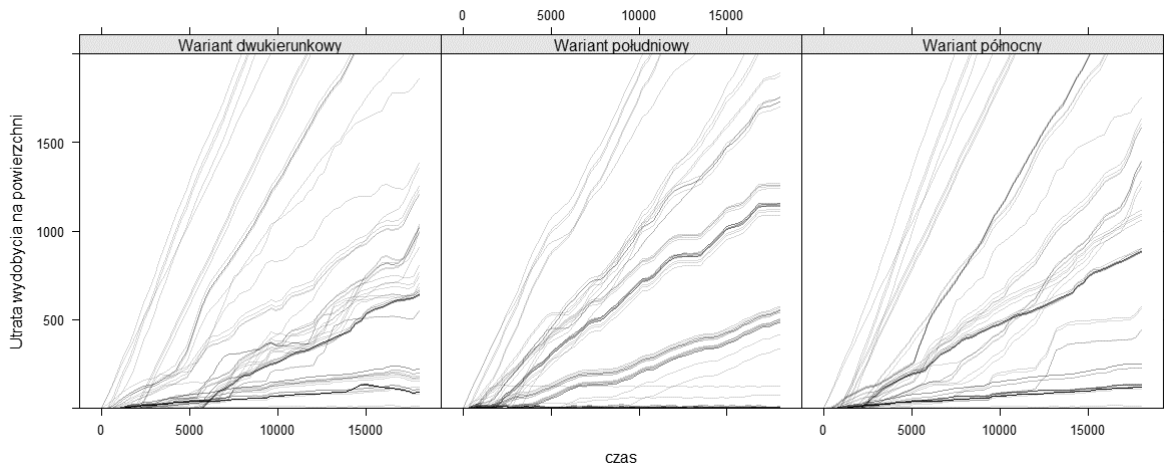
Rysunek 7.25. Wykres typu *heatmap* utraty zdolności wydobywczych w przodku sporządzony dla wszystkich elementów systemu odstawy (strata produkcji w przodku) (opracowanie własne).

W celu podkreślenia różnic charakteryzujących poszczególne warianty oceny przeprowadzono selekcję elementów transportowych z uwagi na miejsce w strukturze oraz wcześniej uzyskane wyniki grupowania (rys. 7.24 oraz 7.25), następnie za pomocą prostego wykresu zilustrowano wartości otrzymywane dla poszczególnych wariantów (rys. 7.26).



Rysunek 7.26. Zestawienie wartości dla awarii wybranych punktów transportowych (opracowanie własne).

Istotną cechą badań symulacyjnych jest możliwość pomiaru i interpretacji przebiegów czasowych w aspekcie utraty wydobywania (rys. 7.27). Zdolność ta jest o tyle istotna, iż w pewnych warunkach z uwagi na elastyczność systemu dochodzić może do ograniczenia wpływu awarii, a nawet eliminacji negatywnych jej skutków. Rozpatrując realizację kilku bądź kilkunastu niezależnych badań symulacyjnych obejmujących różne dane wejściowe, wyeliminować można ponadto wadę modelu deterministycznego, a więc sytuację, gdy opisane uprzednio zmiany wynikają wyłącznie z czasowego zapisu pracy punktów załadunkowych.



Rysunek 7.27. Czasowy przebieg następstw awarii elementów systemu transportowego (opracowanie własne).

Realizacja badań symulacyjnych na potrzeby oceny niezawodności obejmowała symulację wstępną z parametrami tożsamymi jak w przypadku symulacji długookresowej dla danego czasu, a następnie cykliczne przeprowadzenie kolejnych deterministycznych symulacji skutków uszkodzenia każdego z obiektów. Dane wejściowe w rozumieniu – zapisu pracy punktów załadunkowych każdorazowo pobierane zostały z modelu symulacyjnego długookresowego, zatem realizacja pełnego zakresu czasowego sprawiała, że model deterministyczny nabierał cech modelu stochastycznego.

Techniczna realizacja badań symulacyjnych zakładała, że w momencie uszkodzenia obiektu aktywowane zostały istniejące drogi alternatywne umożliwiające zachowanie ciągłości procesu. Bądź w przypadku istnienia zbiornika retencyjnego bezpośrednio przed uszkodzonym obiektem zatrzymywana została nadawa urobku. W innym przypadku uszkodzenie obiektu powodowało zablokowanie ruchu na gałęzi od źródła do punktu awarii.

Pomiar stanu procesu realizowano z zadaniem czasookresem od wystąpienia uszkodzenia do zadanej wartości czasowej. Nie wykonywano jednocześnie prób zakładających wcześniejsze odzyskanie zdolności do pracy, stwierdzających, czy chwilowa nieciągłość procesu może zostać zbilansowana w przyszłości poprzez nadmiar urobku i zdolności retencyjne systemu. Nie wiadomo zatem jak w dłuższym horyzoncie awaria wpłynie na wydobywanie kopalni uwzględniając dozwolony, wyznaczony harmonogramem i regulaminem czas pracy urządzeń transportowych. Badania tego rodzaju z uwagi na ilość kombinacji charakteryzują się dużą czasochłonnością i wyłącznie z tego powodu nie zostały one przeprowadzone. W przypadku szczególnej koncentracji na ocenie elastyczności systemu jak najbardziej powinny być one stosowane, należy wskazać, że dane uzyskane w ich wyniku mogą wnieść wartość dodaną do analizy ciągłości procesów transportowych.

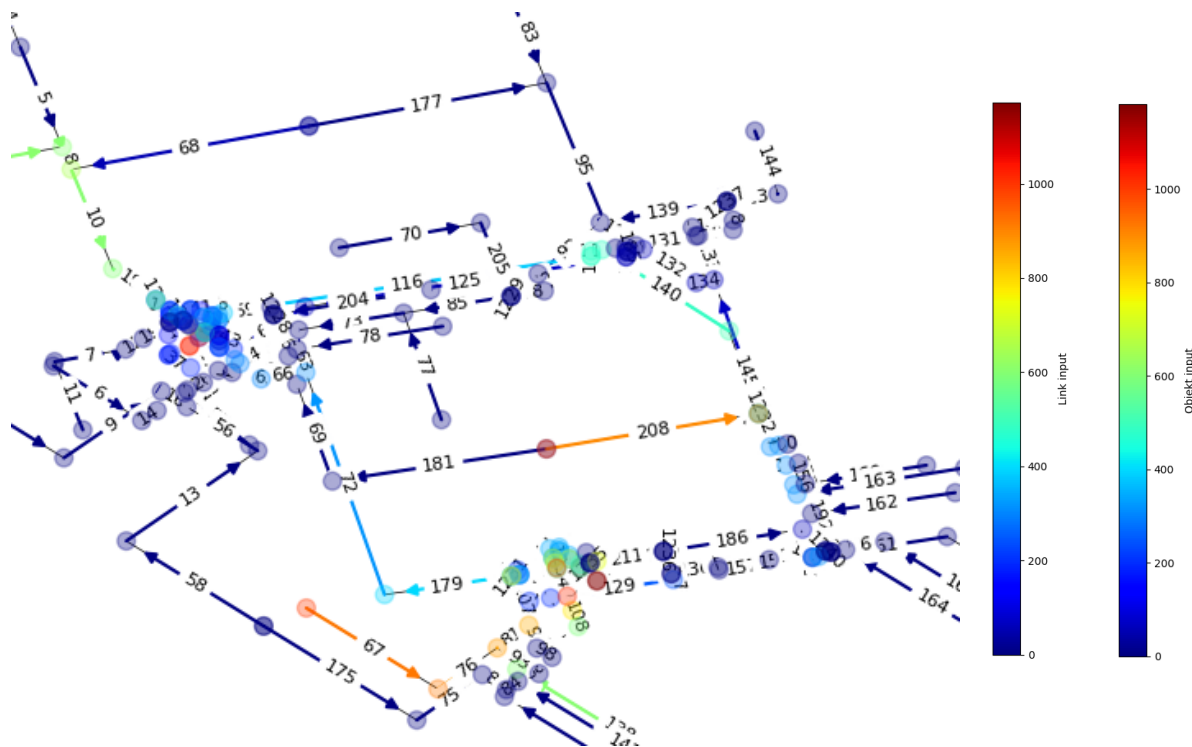
7.2.6. Badanie cech technologicznych procesu transportowego z użyciem modelu interakcyjnego (IMS)

W celu realizacji oceny możliwości technologicznych w obrębie procesu transportowego urobku wykorzystano dane geologiczne oraz podstawową zaletę symulacji mas dyskretnych – pełną identyfikację i parametryzację wyodrębnionych obiektów. Poszczególnym masom jednostkowym przypisano identyfikator źródła nadawy oraz dokonano podziału ilościowego według udziału węgla i kamienia dla punktu załadunkowego, przy czym każdy element mógł być w całości opisany jako kamień

lub węgiel. Tego rodzaju założenie uprościło zasadniczo realizację obliczeń, a w przypadku, gdy wymagany byłby bardziej szczegółowy zapis, istniała możliwość zmniejszenia jednostki objętości elementarnej masy, a więc zwiększenia ilości elementów reprezentujących obieg masy w obrębie systemu.

Badania możliwości technologicznych procesu przeprowadzono w obrębie całego systemu odstawy urobku, uwzględniając następujące kryteria:

- skuteczność działania systemu selektywnego wydobycia kamienia, tj. przesiewaczy zabudowanych miejscowo w głównych drogach transportowych oraz dróg odstawy kamienia z robót chodnikowych;
- możliwości skierowania urobku z badanego źródła do czasowo wydzielonych zbiorników retencyjnych i jego wydobycia na powierzchnię w kontrolowanych czasowo cyklach uniemożliwiających zmieszanie urobku z innymi jego źródłami.



Rysunek 7.28. Przestrzenny przebieg tras transportowych z naniesioną ilością elementów przekazanych w danym kierunku transportowym (opracowanie własne).

Dla skutecznej realizacji badań konieczne było umożliwienie wizualizacji przebiegu oraz stanu wybranego parametru w postaci mapy przestrzennej wyrobisk (rys. 7.28). Realizacja badania możliwości technologicznych wymagała bowiem dostosowania metod regulacji i sterowania procesem w szczególności określenia warunków logicznych pracy punktów decyzyjnych, w aspekcie dalszego kierunku transportowego bądź sekwencji pracy elementów systemu. Skutkiem tego wymagana była implementacja bardziej złożonych interakcji pomiędzy obiektami a stanem procesu transportowego mająca odzwierciedlenie w precyzyjnej konfiguracji mechanizmów sterujących i regulujących proces transportowy. Obejmowały one w szczególności nastawy umożliwiające kontrolowane łączenie i rozdział urobku. Dotyczy to między innymi funkcji sterujących wyjściem ze zbiorników przyszybowych połączonych zbiorczo, w zależności od stopnia napełnienia poszczególnych zbiorników

oraz nadrzędnego celu obejmującego czasowe, selektywne przekierowanie urobku z wybranego zbiornika do szybu. Innym przykładem zastosowanych rozwiązań może być podział urobku do zbiorników w obrębie rozgałęzionej struktury urządzeń transportowych, który wymagał zastosowania kilku warunków logicznych w obrębie struktury współpracujących obiektów, jednoznacznie określających lokalne działanie układu transportowego w zależności od ogólnych warunków i przebiegu realizacji procesu. Otrzymane w efekcie badań wyniki pojedynczych prób poddano uśrednieniu i zestawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Wyniki badań możliwości technologicznych (opracowanie własne).

Wyszczególnienie	Wariant mieszany	Wariant południowy	Wariant północny
Skuteczność przekierowania urobku z wskazanego źródła w zbiorniku selektywnym [%]	81,8%	85,1%	85,1%
Stopień zanieczyszczenia urobku w zbiorniku selektywnym [%]	24,3%	37,2%	16,5%
Ogólny stopień zanieczyszczenia urobku kamieniem [%]	17,1%	16,0%	17,4%
Rezerwa czasowa na szybie północnym [min.]	278	296	242
Rezerwa czasowa na szybie kamiennym [min.]	296	285	300
Rezerwa czasowa na szybie południowym [min.]	200	91	226

Realizacja oceny możliwości technologicznych wykonana w następstwie oceny ciągłości procesu oraz warunków niezakłóconej jego realizacji uświadamia, jak niezwykle istotną kwestią, zważywszy na tematykę niniejszej pracy, jest uwzględnienie preferencji w aspekcie oceny wielokryterialnej już na etapie realizacji samych badań. Kwestia ta jest szczególnie zauważalna w przypadku analizy technologicznych aspektów procesu, bowiem uruchomienie alternatywnych dróg transportowych do zdecydowanie bardziej oddalonych punktów odbioru lub transportujących surowiec okrężną drogą może jednocześnie umożliwić maksymalizację wyników modelu z perspektywy technologicznej oceny procesu, a pogorszyć pod względem efektywności. Tym samym najkorzystniejszy wariant technologiczny może być zupełnie nieuzasadniony z uwagi chociażby na techniczne warunki wydobywania przekierowanego urobku na powierzchnię lub zwiększone koszty realizacji procesu wynikające chociażby z zużycia energii i utrzymania ruchu maszyn. W związku z powyższym, aby ograniczyć działania semioptymalizacyjne wypaczające charakter scenariuszy poddanych wcześniej częściowej analizie w badaniach, oprócz wskaźników opisujących wyniki technologiczne, testowano czas pełnej realizacji zadania transportowego, wyznaczając tym samym czas pozostały do końca dnia produkcyjnego. Wartość tą opisuje tzw. rezerwa czasowa.

7.2.7. Wielokryterialna ocena przebiegu procesu transportowego

Wyniki otrzymane w rezultacie badań symulacyjnych przeprowadzonych w rozdziałach 7.2.4, 7.2.5 i 7.2.6 zestawiono zbiorczo w tabeli 7.3. Dalsze wykorzystanie wyników może obejmować przypisanie wag poszczególnym wskaźnikom w celu podsumowania każdego z wariantów. Dlatego należałoby wykorzystać można jedną z wielu metod rankingowych m.in. AHP, ANP, ELECTRE III, PROMETHEE II.

Tabela 7.3 Wyniki analizy wielokryterialnej (opracowanie własne).

Wyszczególnienie	Wariant mieszany	Wariant południowy	Wariant północny
Wyniki badań wydajności i efektywności procesu			
Obciążenie średnie [Mg/h]	247,6	273,1	263,2
Aktywna długość dróg transportowych [m]	37329,1	33466,1	35645,2
Obciążenie P(A)=0.99 [Mg/h]	1108,4	1192,5	1147,7
Obciążenie P(A)=0.95 [Mg/h]	870,1	942,9	917,4
Obciążenie średnie (niezerowe) [Mg/h]	482,4	516,1	522,5
Liczba dni przerwy w eksploatacji odcinków transportowych (średnia dla obiektu symulacji)	156,0	143,3	184,5
Liczba dni przerwy w eksploatacji odcinków transportowych (średnia ważona długością drogi transportowej)	181,8	164,3	218,7
Dni z przekroczeniem pojemności maksymalnej zbiorników przyszybowych	19	41	6
Wyniki badań niezawodnościowych procesu			
Wydobycie na powierzchnię w przypadku awarii dowolnego obiektu ($t_{obs}=18000s$) [Mg]	8178	7100	7996
Wydobycie na powierzchnię w przypadku awarii dowolnego obiektu ($t_{obs}=10800s$) [Mg]	4986	4392	4879
Wydobycie na powierzchnię w przypadku awarii dowolnego obiektu ($t_{obs}=3600s$) [Mg]	1748	1595	1689
Wstrzymanie odbioru ($t_{obs}=18000s$) [Mg]	465	769	693
Wstrzymanie odbioru ($t_{obs}=10800s$) [Mg]	269	394	314
Wstrzymanie odbioru ($t_{obs}=3600s$) [Mg]	75	107	60
Wyniki badań technologicznych właściwości procesu			
Skuteczność przekierowania urobku z wskazanego źródła w zbiorniku selektywnym [%]	81,8%	85,1%	85,1%
Stopień zanieczyszczenia urobku w zbiorniku selektywnym [%]	24,3%	37,2%	16,5%
Ogólny stopień zanieczyszczenia urobku kamieniem [%]	17,1%	16,0%	17,4%
Rezerwa czasowa na szybie północnym [min.]	278	296	242
Rezerwa czasowa na szybie kamiennym [min.]	296	285	300
Rezerwa czasowa na szybie południowym [min.]	200	91	226

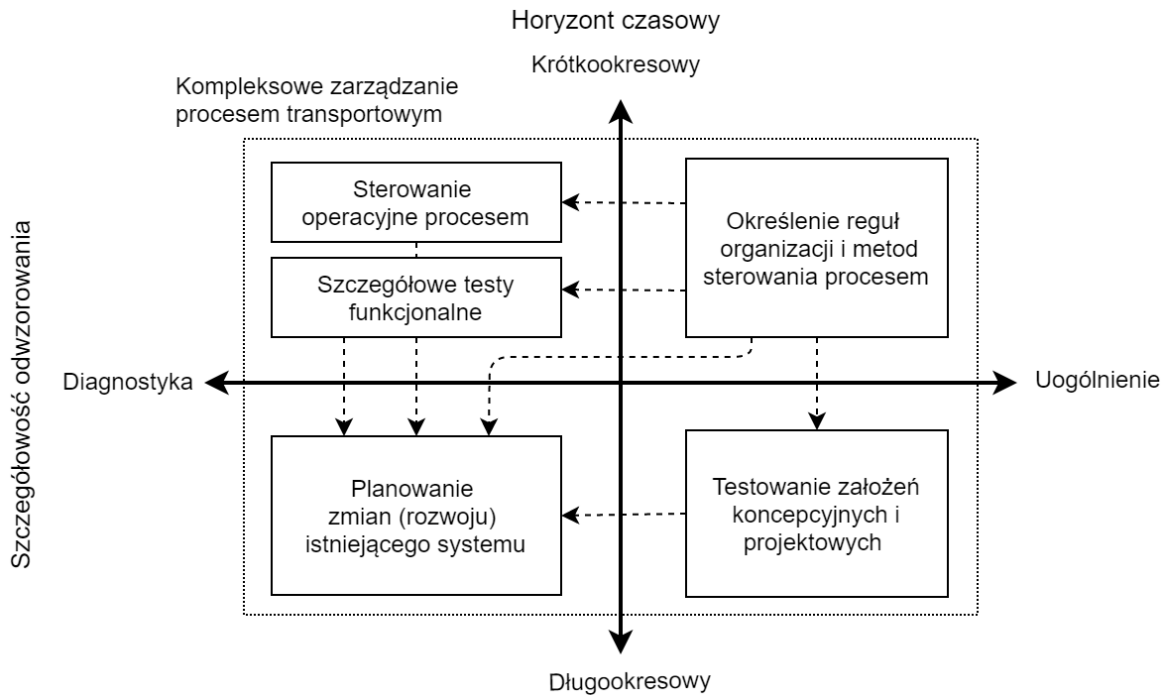
Realizując eksperymenty symulacyjne, celowo nie zastosowano przydzielania nowo projektowanym trasom przenośnikowym szczegółowych parametrów fizycznych i technicznych, tak jak miało to w przypadku istniejącej infrastruktury (dotyczy to w szczególności szerokości taśmy). Tego rodzaju ograniczenia stanowią przedmiot optymalizacji, jednak tematyka zautomatyzowanego projektowania ciągów transportowych w kilku lub kilkunastoletniej predykcji w odniesieniu do przyszłości jest trudnym zadaniem i uwzględniać powinna również inne kwestie związane z cyklem życiowym wyposażenia. Tego rodzaju rozwiązanie wspomagać mogłoby dobór parametrów ruchowych dla poszczególnych okresów czasu takich jak optymalna prędkość liniowa taśmy lub wytyczne i nastawy definiujące zakres regulacji tejże prędkości. Stąd też zagadnienie to pominięto, przypisując nowo powstałym odcinkom charakterystyczne z uwagi na miejsce i funkcję prędkości przemieszczania urobku. Problematykę doboru parametrów fizycznych wskazać można jako kierunek dalszych badań, umożliwiającą rezygnację z przyjętych na etapie walidacji modeli uproszczeń.

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rezultat pracy stanowią dwa opracowane od podstaw, unikalne modele symulacyjne, RMS i IMS, umożliwiające analizę procesu transportowego w krótkim, jak i długim horyzoncie czasowym. Łącznie z nimi zrealizowana została metodyka ich zastosowania w celu szczegółowego odwzorowania i oceny przebiegu procesu transportowego urobku, generalizacji wiedzy we wsparciu zróżnicowanych obszarów decyzyjnych. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanych modeli (zamieszczone w rozdziale 7) potwierdziły ich wysoką przydatność i użyteczność w zakresie wielokryterialnej analizy procesu transportu urobku, co pozwala potwierdzić tezę i osiągnięcie celu niniejszej pracy. Istnieje zatem możliwość opracowania i zastosowania opracowanych modeli symulacyjnych dla potrzeb wielokryterialnej analizy procesów transportu urobku. Rozwiązanie to pełnić może istotną rolę w zakresie wsparcia decyzyjnego w kontekście oceny warunków funkcjonowania i doskonalenia istniejących oraz projektowanych systemów jego odstawy w kopalni podziemnej.

Podstawowy aspekt funkcjonalny różnicujący sformułowane i zaimplementowane modele stanowi dynamika i zakres wzajemnych interakcji obiektów zdefiniowanych w przestrzeni symulacyjnej. Z poznawczego punktu widzenia celowe zastosowanie zróżnicowanych podejść, algorytmów i środowisk implementacji pozwoliło na porównanie działania oraz przeprowadzenie testów współpracy dwóch rozwiązań, działających w ujęciu makro- lub 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 w kopalni podziemnej, gdyż odwzorowanie maszyn samojezdnych znacząco różni się od symulacji działania układów ciągłych, takich jak przenośniki taśmowe. 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, a w rezultacie wypracowania metodyki zastosowania i współpracy obu modeli. Rozwiązanie obejmowało również opracowanie dedykowanych temu celowi narzędzi w postaci: interfejsów, procedur przetwarzania i technik wizualizacji danych wejściowych oraz wyjściowych modeli (rozdział 3 i 7).

W ogólnym ujęciu zaproponowane w pracy rozwiązanie objęło swoim zasięgiem dwa kluczowe w ocenie autora kierunki wsparcia decyzyjnego realizowanego w formule wielokryterialnej analizy procesu transportu urobku. Kierunki te zawierają się w tematyce planowania techniczno-organizacyjnych rozwiązań przedsięwziętych w celu realizacji procesu odstawy urobku w długim lub krótkim horyzoncie czasowym. Zważywszy na zasięg czasowy, stawiają one istotnie zróżnicowane wymagania względem modeli symulacyjnych w aspekcie doboru i alokacji środków transportowych lub organizacji i sterowania ich pracą. Z wielu przyczyn, jako dodatkową kategorię podziałową przyjąć można zatem poziom generalizacji problemu rozpatrując jednocześnie diagnostyczny lub uogólniony charakter zastosowanego modelu oraz otrzymanego rozwiązania. Podstawowy podział obszarów wsparcia decyzyjnego podsumowano zbiorczo na rysunku 8.1. Podział ten pozwala przede wszystkim wyróżnić problemy natury powtarzalnej oraz zidentyfikowane scenariusze badań symulacyjnych, w odniesieniu do których ujęcie problemu wymaga precyzyjnego odwzorowania szczegółowości procesu uwzględniając strukturalną i fizyczną naturę istniejących relacji.



Rysunek 8.1. Obszary wsparcia decyzyjnego (opracowanie własne).

Zaprezentowana w pracy koncepcja podziału zastosowań znalazła swoje odzwierciedlenie zarówno w cechach funkcjonalnych opracowanych modeli symulacyjnych, jak również w uwzględnieniu konieczności ich wzajemnego skomunikowania, w celu wymiany danych pomiędzy równoległymi modelami zorientowanym w zaproponowanej płaszczyźnie podziałowej. Tym samym rozwiązanie problemu wymagało dodatkowo opracowania interfejsów symulacyjnych dla sprawnej realizacji badań zwiększających szczegółowość i precyzję modelu lub badań uogólniających. Konstrukcja ten łączy opracowane modele symulacyjne w dedykowany sposób zważywszy na cechy funkcjonalne i techniczne opracowanych modeli symulacyjnych, przez co stanowi własną propozycję wsparcia w zakresie analizy wielokryterialnej procesu transportowego. Jak starano się przedstawić w rozdziale 2.3, owo kompleksowe i zarazem elastyczne podejście dostarczające szerszy zakres wsparcia decyzyjnego, stanowi o unikalnym charakterze rozwiązania podjętego w pracy problemu.

Złożoność procesu transportu urobku w kopalni podziemnej, jego stochastyczna natura, zdolność kontrakcji i ekspansji w czasoprzestrzeni, traktowane jako kluczowe warunki realizacji, a tym samym szerzej przedstawione jako wprowadzenie do tematyki pracy w rozdziale 3, zdecydowały w głównej mierze o celu niniejszej pracy, zakładającym wykorzystanie symulacji komputerowej, jako docelowego narzędzia wsparcia decyzyjnego. Zastosowane rozwiązanie, poza zaletami charakterystycznymi dla metod symulacyjnych, takimi jak zdolność wykonania badań symulacyjnych dla warunków nieosiągalnych lub trudno osiągalnych w rzeczywistości oraz możliwością kontroli populacji statystycznej, cechuje się:

- brakiem ograniczeń dotyczących złożoności struktury i stopnia skomplikowania badanego systemu transportu urobku,
- możliwością bezpośredniego uwzględnienia procesów stochastycznych, co pozwala na modelowanie procesów transportu urobku o dużym udziale czynników losowych,
- elastycznością środowiska symulacji w zakresie agregacji lub dezagregacji modelu stosownie do wymaganego stopnia szczegółowości i potrzeb praktycznych,

- możliwością łatwego manipulowania modelem, algorytmami, parametrami obiektów i zmiennymi sterującymi w celu oceny wpływu zmian na przebieg procesu w modelu mikroskopowym (IMS) z możliwością translacji wyników do modelu makroskopowego (RMS),
- możliwością identyfikacji nie do końca znanych relacji między obiektami uczestniczącymi w procesie transportu urobku oraz uwarunkowaniami realizacji procesu w modelu interakcyjnym (IMS),
- możliwościami bezpośredniej implementacji w układach sterowania procesem transportu urobku z tzw. ruchomym horyzontem (ang. *Model Predictive Control*) w formie bibliotek i skryptów języka Python.

Przeciwstawnie do opisanych zalet zastosowanej metody badawczej możliwe staje się również określenie jej podstawowych wad w zakresie przewidzianym tematyką pracy. Zaliczyć do nich można przede wszystkim:

- brak uniwersalnych reguł tworzenia modeli symulacyjnych procesów transportowych oraz metod rozstrzygnięcia o ich poprawności,
- ograniczone możliwości automatyzacji procedur budowy modeli i związaną z tym względnie dużą czasochłonność tworzenia modeli,
- dużą wrażliwość efektów badań symulacyjnych na błędy w modelowaniu oraz planowaniu przebiegu eksperymentu – symulacja może być przykładowo rozwiązaniem zbyt dokładnym lub zbyt ogólnym, zważywszy na naturę problemu.

Proponując docelowe rozwiązanie problemu badawczego, ukierunkowano je naprzeciw wymienionym czynnikom, których znaczenie skutecznie ograniczyłoby praktyczną wartość pracy. Efekt, co najmniej częściowej eliminacji wymienionych uprzednio wad, uzyskano dzięki:

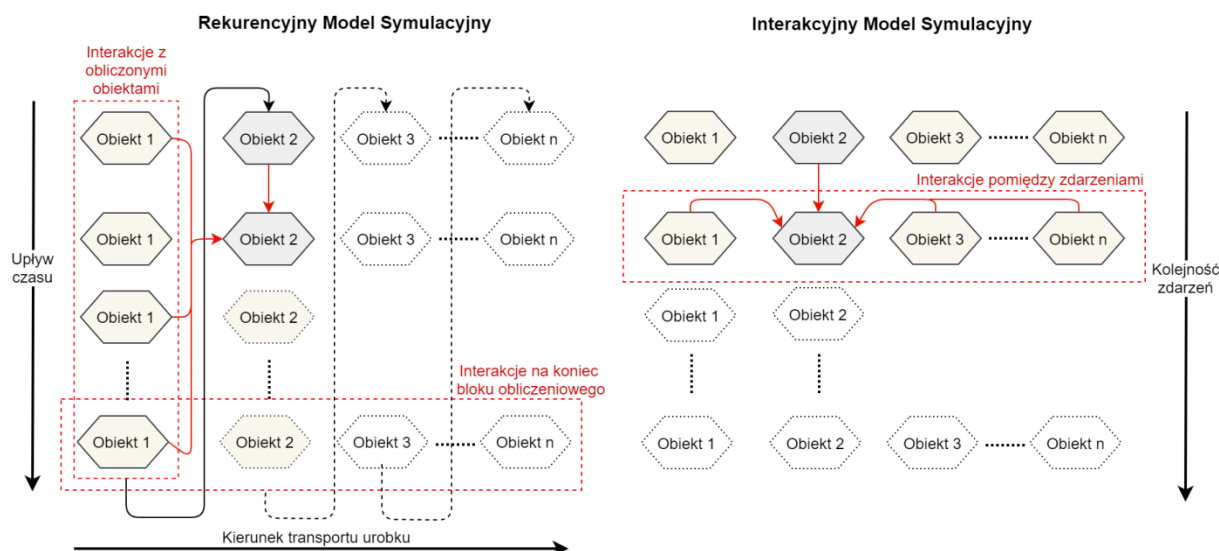
- zastosowaniu dwóch niezależnych, wzajemnie weryfikujących się i uzupełniających funkcjonalnie modeli o dużej elastyczności konfiguracji,
- wsadowym wykorzystaniu danych źródłowych pochodzących z różnorodnych systemów OT oraz ERP przedsiębiorstw górniczych z zastosowaniem w tym zakresie ustandaryzowanych profili informacyjnych, m.in. karty efektywności kompleksu ścianowego,
- opracowaniu interfejsu bezpośredniej wymiany danych pomiędzy modelami symulacyjnymi,
- organizacji wzajemnej współpracy modeli w ruchomym horyzoncie czasowym w celu jednoczesnego uzyskania uogólnionego oraz szczegółowego odwzorowania procesu transportu urobku,
- opracowaniu środowiska symulacyjnego w formie bazy danych zarządzającej danymi wejściowymi, wyjściowymi oraz przebiegiem i inicjacją obliczeń.

Identyfikując szczegółowo rodzaje i zakres wymaganego wsparcia decyzyjnego, jak również poszukując rozwiązania docelowego, skoncentrowano szczególną uwagę na celu symulacji i jej podstawowych założeniach. Czynnikiem ten, traktowano jako kluczowy z perspektywy uzyskania wysokiego stopnia trafności zastosowanych modeli symulacyjnych. W konsekwencji, rozdział 6 pracy w całości poświęcono kwestiom metodologicznym, obejmując techniczne i organizacyjne uwarunkowania realizacji różnych zadań analitycznych. Określeniu wymagań funkcjonalnych oraz technicznych względem modeli opisanych w rozdziale 5 towarzyszyła eksploracyjna analiza danych opisujących przebieg procesu transportowego. Dane te, których wybrane próbki zamieszczono w rozdziale 3, stanowiły jednocześnie argumenty wejściowe dla opracowanych modeli symulacyjnych.

Realizowany konsekwentnie rozwój pierwszych modeli symulacyjnych prowadził kolejno do przedsięwzięcia różnych sposobów symulacji przestrzeni, symulacji prawdopodobieństwa oraz symulacji czasu, jak również wzajemnych interakcji owych podsystemów na poziomie koncepcyjnym,

a finalnie technicznym w języku programistycznym. Należy zaznaczyć, że w pracy podjęto wielokrotne próby opracowania modeli symulacyjnych, które następnie testowano ze szczególnym uwzględnieniem walorów użytkowych. Jednymi z pierwszych były modele ze stałym krokiem czasowym z bezpośrednim lub pośrednim uwzględnieniem przestrzeni na poziomie obiektów funkcjonalnych. Chronologiczny rozwój modeli postępował od prostych algorytmów obliczeniowych odwzorowujących numerycznie równania różniczkowe o zmiennych skojarzonych opracowanych w środowisku Matlab (rozdział 4) poprzez modele z masą dyskretną i stałym krokiem czasowym symulacji, skończywszy na modelach z masą dyskretną, które są inicjowane zdarzeniami. Uzyskane końcowo rozwiązania opisane w rozdziale 5, więc: Rekurencyjny Model Symulacyjny oraz Interakcyjny Model Symulacyjny stanowiły następstwo i bezpośredni rezultat działań koncepcyjnych. Jak nadmieniono wcześniej, owe modele różnią się pod wieloma względami, co w przekonaniu autora należy rozpatrywać jako dodatkową zaletę. W zakresie, w jakim było to możliwe do przedstawienia, zostało to opisane na etapie walidacji ich działania w rozdziale 7 oraz specyfikacji docelowych scenariuszy użytkowych w rozdziale 6.

Można przyjąć, że model rekurencyjny (RMS) w swoim podstawowym założeniu koncepcyjnym wyodrębnia tzw. bloki obliczeniowe przemieszczające się w dodatkowym wymiarze, wyznaczonym w przestrzeni i czasie przez kolejność przepływu urobku w obrębie modelu strukturalnego systemu. W skrajnych przypadkach zdefiniowane krótkie bloki symulacyjne pozwalają uzyskać funkcjonalność modelu ze stałym krokiem czasowym ze wszystkimi wadami i zaletami takiego rozwiązania, gdzie do wad zaliczyć należy przede wszystkim spadek szybkości obliczeniowej. W rekurencyjnym modelu symulacyjnym zachodzi możliwość interakcji wyłącznie z obiektami przetworzonymi na poziomie tzw. bloku symulacyjnego – opisanej na rysunku 8.2 jako tzw. interakcja pionowa w pełnym zakresie czasowym bloku symulacyjnego. Cecha ta stanowi unikalną właściwość, której przydatność ujawniła się w trakcie walidacji działania modeli. Pozwolić to może na implementację procedur optymalizacyjnych już na poziomie modelu symulacyjnego, w tym efektywne wykonywanie obliczeń iteracyjnych, związanych z regulacją procesu transportowego w obrębie punktów węzłowych dla dwóch lub więcej gałęzi transportowych. Zatem, o ile w przypadku pierwszych obiektów obliczanych w modelu strukturalnym, podgląd stanu innych bloków symulacyjnych jest ograniczony, tak w przypadku obliczeń dla obiektów zlokalizowanych w obrębie zbiorników przyszybowych, obliczanych na końcu, znany jest niemal pełen zapis nadawy urobku w obrębie bloku symulacyjnego. Właściwość ta nie występuje w przypadku interakcyjnego modelu (IMS), w odniesieniu do którego iteracja obliczeniowa lub optymalizacja wymagają przeprowadzeniu całej symulacji na nowo. Tym samym model rekurencyjny (RMS) wraz z postępem obliczeń pozwala na zagnieżdżone testy procedur regulacji przepływu urobku, jednocześnie umożliwiając pełen podgląd stanu systemu i interakcje obiektów wyłącznie po zakończeniu obliczeń dla wszystkich bloków symulacyjnych. Wykorzystanie takiej funkcjonalności jest możliwe głównie dzięki temu, że model strukturalny systemu odstawy urobku na ogół stanowi graf skierowany, co umożliwia rozszerzenie zakresu czasowego bloków symulacyjnych z jednoczesnym ograniczeniem interakcji (niesie to ze sobą negatywne konsekwencje m.in. w sytuacji badania przebiegu i wpływu awarii obiektu). W efekcie pracy spostrzeżono, że przetwarzanie równoległe bloków symulacyjnych daje dodatkowo możliwość priorytetowania i kolejkowania gałęzi obliczeniowych, lecz cecha ta nie została wykorzystana w przeprowadzonych badaniach, co stanowi o dalszym potencjale rozbudowy modelu rekurencyjnego.



Rysunek 8.2. Podstawowe różnice w zakresie odwzorowania interakcji modeli (opracowanie własne).

Rozbudowany system tzw. wyzwalaczy opracowany w interakcyjnym modelu (IMS) pozwala natomiast na znacznie poszerzoną parametryzację interakcji pomiędzy obiektami. Rozwiązanie takie umożliwi również budowę złożonych zasad sterowania na bazie podstawowych, elementarnych funkcji wpływających na przebieg procesu. Jest to rozwiązanie optymalne, zważywszy, że sterowanie i parametryzacja modelu rekurencyjnego wymaga budowy dedykowanych skryptów i algorytmów określających sposób nadrzędnej kontroli nad obiektami, a nieciągłość procesu regulacji i sterowania wymaga opracowania dedykowanych metod analizy danych historycznych, opisujących przebieg procesu w zakończonym bloku obliczeniowym. Stan ten stanowił w pewnym stopniu uzasadnienie opracowania modelu interakcyjnego, którego wyniki obliczeniowe przeprowadzone na poziomie mikroskopowym procesu transportowego z zadaną szczegółowością dopasowaną do rzeczywistych potrzeb, posłużyć mogą do kalibracji modelu rekurencyjnego. Oceniając parametry opracowanych i przedłożonych jako rozwiązanie modeli symulacyjnych sporządzono tabelę 8.1, w której to zestawiono ich podstawowe cechy użytkowe.

Tabela 8.1. Zestawienie podstawowych cech opracowanych modeli (opracowanie własne).

Grupy cech	Rekurencyjny Model Symulacyjny (RMS)	Interakcyjny Model Symulacyjny (IMS)
Reprezentacja obiektów	Obiekty liniowe z relacjami wejścia i wyjścia.	Obiekty punktowe z relacjami (również ruchome).
Interakcje obiektów i sterowanie	Brak interakcji na poziomie bloku symulacyjnego za wyłączeniem podglądu obiektów w obliczonych wątkach. Holistyczne sterowanie możliwe na zakończeniu obliczenia w bloku.	Pełne i dowolnie zróżnicowane interakcje poprzez dowolne wyzwalacze, zdarzenia bliskie i dalekie. Sterowanie w dowolnym czasie wg kalendarza lub inicjowane zdarzeniami.
Cechy właściwe dla obiektów	Uniwersalne obiekty opisane jednolitym zestawem parametrów.	Zróżnicowane obiekty, o modyfikowalnych właściwościach i zachowaniu.
Kolejność obliczeń	Zgodna z grafem skierowanym i ewentualnymi priorytetami obliczeniowymi na łączonych drogach odstawy.	Najbliższa czasowo aktywność przewidziana w holistycznym dzienniku zdarzeń.
Upływ czasu	Na poziomie strukturalnym – dowolna ilość bloków czasowych o zadanym czasie trwania, na poziomie bloku – sekwencja zdarzeń.	Sterowany przez aktywności obiektów (sekwencja zdarzeń dyskretnych).

Skala obliczeń	Proste operacje arytmetyczne i logiczne związane z przeniesieniem wyodrębnionej masy dyskretnej.	Dowolne operacje na własnościach obiektów.
Regulacja ruchu urobku (w tym wstrzymanie odbioru)	Przeniesienie masy bez informacji zwrotnej z punktu odbioru, regulacja wyłącznie na poziomie symulowanego obiektu, dla całej struktury obiektów regulacja możliwa jest po zakończeniu obliczeń.	Pełne możliwości regulacji na podstawie wielu relacji, w tym możliwość wstrzymania odbioru przez obiekt znajdujący się dalej w strukturze
Podstawowe zalety	<ul style="list-style-type: none"> – Bardzo duża szybkość obliczeń. – Uniwersalne obiekty. – Możliwość odwzorowania modelu z stałym krokiem czasowym. 	<ul style="list-style-type: none"> – Odwzorowanie bardzo złożonych procesów transportowych i interakcji między obiektami. – Pełna implementacja obiektowa, obejmująca m.in. dziedziczenie właściwości definiowanych obiektów. – Skalowalność procesu transportowego.
Podstawowe wady	<ul style="list-style-type: none"> – Brak pełnej interakcji i podglądu stanu systemu na poziomie bloku. – Utrudniona zmiana funkcjonalności obiektów. – Problem kalibracji w sytuacji istnienia złożonych procesów transportowych np. Maszyn samojezdnych. 	<ul style="list-style-type: none"> – Ograniczona wydajność obliczeniowa.
Zastosowanie użytkowe	<ul style="list-style-type: none"> – Wysoka użyteczność jako model bazowy we wsparciu procesów planistycznych (WPP) w zakresie oszacowania czasowej wydajności pracy odcinków dróg transportowych, śledzenia urobku z zdefiniowanych źródeł nadawy. – Użyteczny również jako model generalizujący dane z modelu IMS w scenariuszu uzupełniających zadań badawczych (UZB) w celu szybkiego wykonania wielu obliczeń w warunkach niepewności. 	<ul style="list-style-type: none"> – Wysoka użyteczność jako model służący do wsparcia operacyjnego i testów (scenariusz WOT). – Wysoka użyteczność jako model użyty do uzupełniających zadań badawczych (scenariusz UZB), szczególnie w kontekście oceny sposobu organizacji, sterowania pracą środków transportowych jak i przebiegu zdarzeń awaryjnych. – Użyteczny również jako model uszczegóławiający model RMS we wsparciu procesów planistycznych (WPP).

Utrzymanie aplikacyjnego charakteru pracy obejmowało opracowanie, weryfikację i co najważniejsze – empiryczną walidację nowych narzędzi analitycznych wraz z opisem sposobów ich praktycznego użycia. W tym zakresie na podstawie przeprowadzonych badań i eksperymentów symulacyjnych z użyciem rzeczywistych próbek danych charakteryzujących proces transportowy realizowany w kopalni podziemnej, określono zastosowanie poszczególnych modeli symulacyjnych. Należy zauważyć, że opracowane na potrzeby praktycznych badań modele symulacyjne, wykorzystywały w głównej mierze dane gromadzone w klasie systemów operacyjnych (ang. Operational Technology, OT) i ERP przedsiębiorstwa górniczego. W związku z tym przedłożone rozwiązanie może stanowić bardzo wydajne narzędzie wspomagające planowanie i optymalizacje procesu transportowego, zgodne z koncepcją tzw. cyfrowego bliźniaka zaproponowaną w ramach postulatów Przemysłu 4.0. Zgodnie z tą koncepcją oraz wnioskami sformułowanymi w efekcie badań symulacyjnych na potrzeby walidacji działania modeli wyznaczono dalsze kierunki rozwoju zaproponowanego rozwiązania. Zostały one określone w efekcie identyfikacji problemu wieloaspektowej optymalizacji w przestrzeni różnych grup zmiennych sterujących oraz zastosowania metod grupowania danych wejściowych i wyników z modelu. Pierwsza z perspektyw rozwojowych obejmuje optymalizację bazującą na analizie wielokryterialnej procesu transportowego,

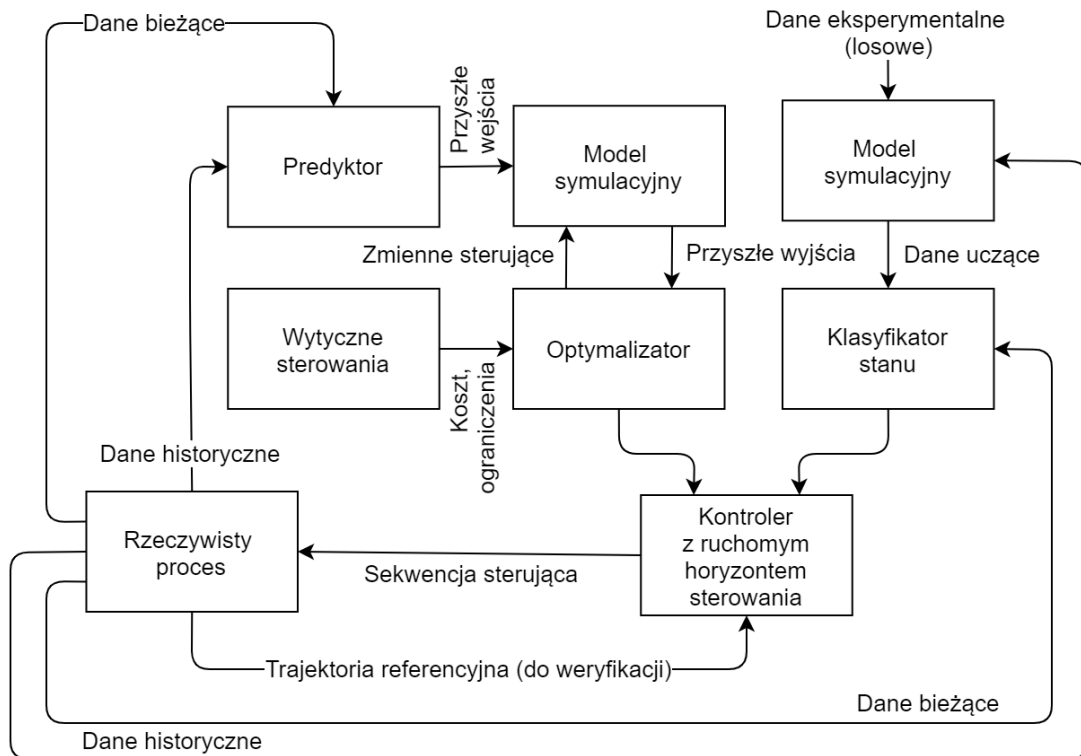
odzworowanego w holistycznym ujęciu, jednak z podziałem na różne kategorie zmiennych decyzyjnych, w tym:

- wyznaczanie tras transportowych,
- dobór technicznych środków realizacji procesu,
- organizację procesu transportowego,
- sterowanie procesem transportowym.

Wyniki otrzymane w rezultacie walidacji modeli symulacyjnych w rozdziale 7 pozwalają przedsięwziąć stanowisko, że optymalizacja z użyciem współpracującego modelu makroskopowego (RMS) oraz mikroskopowego procesu transportowego (IMS) może pozwolić na dodatkowe wsparcie procesów koncepcyjnych i projektowych. Techniczna realizacja, a w głównej mierze samo „osadzenie” procedur matematycznej optymalizacji wewnątrz modelu w formule skryptów programowania całkowitoliczbowego lub programowania ograniczeń (wstępne testy przeprowadzono w środowisku IBM ILOG CPLEX), pozwoli prawdopodobnie na uzyskanie korzystnych rezultatów zważywszy na czasochłonność wynikającą z procesów stochastycznych odzworowanych przez model symulacyjny. Optymalizacja w formie programowania liniowego może znaleźć również inne zastosowanie, w szczególności na etapie doboru wyposażenia i parametrów techniczno-ruchowych obiektów. Charakterystyki wyjściowe otrzymane z modelu symulacyjnego, opisujące m.in. prawdopodobieństwo pracy odcinka drogi transportowej z zadaną wydajnością, wymagany czas dostępności oraz niezawodność, mogą posłużyć do optymalizacji doboru maszyn i urządzeń z uwzględnieniem parametrów takich jak:

- wydajność transportowa,
- dostępność (normatywna gotowość do realizacji procesu transportowego),
- niezawodność – średni czas pomiędzy awariami (MTBF, ang. *Mean Time Between Failures*),
- naprawialność – średni czas naprawy (MTTR, ang. *Mean Time To Recovery*),
- operatywność – zdolność pracy w różnych warunkach np. min. wysokość stropu,
- kompatybilność,
- trwałość użytkowa,
- zdolność akumulacji urobku,
- sterowalność.

Drugi z możliwych kierunków rozwoju rozwiązania obejmuje wykorzystanie modeli do nauki metod sterowania przebiegiem procesu w drodze uczenia maszynowego oraz optymalizacji. Wstępna koncepcja takiego rozwiązania została zilustrowana na rysunku 8.3.

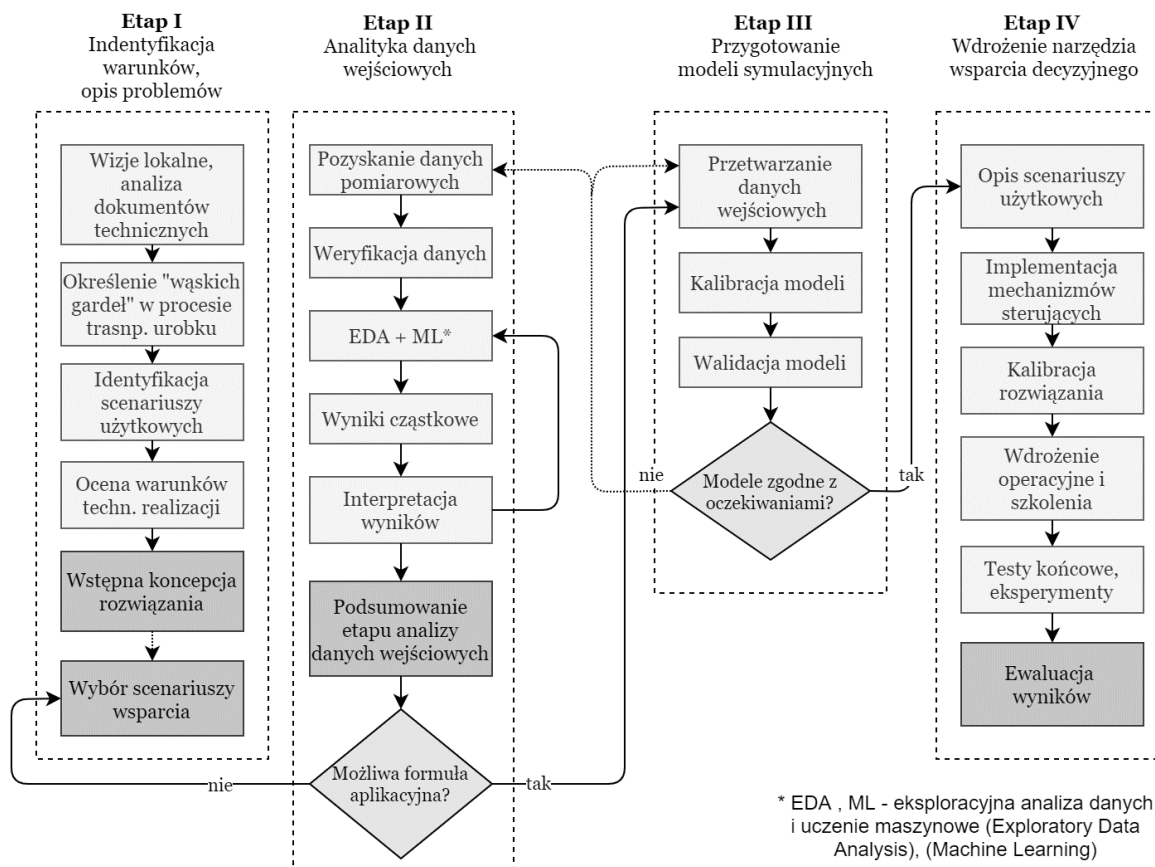


Rysunek 8.3. Zastosowanie modeli symulacyjnych w nadrzędnym sterowaniu procesem transportowym z użyciem predykcji, uczenia maszynowego oraz przesuwany horyzontem (opracowanie własne).

Pierwsze próby przeprowadzone w celu poprawy jakości urobku wyjściowego poprzez selektywny transport urobku kamiennego, przeprowadzono z użyciem programowanie logicznego z ograniczeniami. Próby te, uzasadniły podział tego rodzaju wsparcia na dwie fazy. W obrębie n -najbliższych zmian produkcyjnych działanie kontrolera obejmowało wyłącznie dobór założeń odnośnie strategii regulacji i sterowania procesem oraz ogólnych wytycznych takich jak przeznaczenie zbiorników retencyjnych. Etap ten był realizowany zgrubnie z użyciem uproszczonego modelu symulacyjnego. Wyjściowa sekwencja sterująca była nadążnie aktualizowana w ruchomym horyzoncie z użyciem modelu szczegółowego. Model ten odpowiadał również za dostarczanie ograniczeń do optymalizatora i modelu uproszczonego. Tego rodzaju zastosowanie modeli symulacyjnych, wskazać należy jako możliwy docelowy kierunek rozwoju zaproponowanego w pracy rozwiązania. Dodatkowo sterowanie procesem oprócz wyników z bloku optymalizacji korzystać może z klasyfikatora stanu procesu. Klasyfikator ten na podstawie podobieństwa do jego zachowania w przeszłości lub w obrębie losowych eksperymentów (dostarczających danych uczących właściwych dla bieżącej konfiguracji systemu), może wskazać proponowane kroki działania układu regulacji na podstawie reguł decyzyjnych, rozpatrując obszerny zbiór stanów procesu i skutków potencjalnych działań. Tego rodzaju aplikacja w przyszłości może dostarczyć przedsiębiorstwom górniczym prowadzącym eksploatację pod ziemią możliwości skoordynowania transportu w sposób minimalizujący koszty lub maksymalizujący przychód wynikający z jakości pozyskanej kopaliny. W szczególności dotyczy to może kopalń węgla koksującego o zadanych parametrach jakościowych lub geologicznych cech rudy metalu poddawanej procesowi wzbogacania.

Realizacja tematu pracy pozwoliła również wyszczególnić i opisać modelowy przebieg aplikacji modeli symulacyjnych realizujących funkcje wsparcia decyzyjnego w warunkach kopalń podziemnych. Model ten składającego się z 4 kolejnych etapów opisanych szczegółowo na rysunku 8.4. Etap I stanowi inicjację działań mających na celu określenie problemów decyzyjnych oraz ogólnych warunków

realizacji procesu transportu urobku. Na tym etapie określony powinien być stopień trudności opracowania rozwiązania docelowego oraz jego koncepcja z oceną technicznych możliwości realizacji. Etap II stanowi pogłębiona analityka danych wejściowych. W szczególności obejmująca identyfikację występujących związków przyczynowo-skutkowych, holistycznego podsumowania uwzględniającego dynamiczny charakter procesu w obrębie wyodrębnionych funkcjonalnie struktur obiektów. Etap III to przygotowanie modeli symulacyjnych, natomiast etap IV ich bezpośrednie wykorzystanie w zakresie optymalizacji, predykcji bądź też wsparcia operacyjnego włącznie z bezpośrednim sterowaniem procesem transportowym.



Rysunek 8.4. Modelowy przebieg aplikacji przedstawionego rozwiązania (opracowanie własne).

Podsumowując rezultaty pracy, należy stwierdzić, że racjonalizacja procesów transportowych urobku osiągalna jest w drodze dwóch skorelowanych działań. Zaprojektowania i wykonania elastycznego i funkcjonalnego układu transportowego, umożliwiającego dostosowanie do zmian charakterystycznych dla działalności górniczej przy zachowaniu wysokiej efektywności działania i jakości urobku wyjściowego. Cel ten jest osiągalny w rezultacie opracowania i wdrożenia metod organizacji pracy i sterowania procesem transportu odznaczających się najwyższą efektywnością opisaną stopniem sprawności i skuteczności. Stosując analogię z obszaru techniki cyfrowej oraz IT (ang. *information technology*, IT) współlistnienie tych dwóch płaszczyzn opisać można zastępczo przykładem współpracy zasobów sprzętowych (ang. *hardware*) oraz oprogramowania (ang. *software*). Wielokryterialna analiza procesu odstawy urobku z zastosowaniem modeli symulacyjnych, tak jak to przedłożono w niniejszej pracy, może stanowić w tym zakresie integralny element ciągłego doskonalenia działalności operacyjnej koncentrujący uwagę na przestrzeni techniczno-organizacyjnej procesu. Prowadzić może w rezultacie do realizacji systematycznych działań ukierunkowanych na zapewnienie jak największej efektywności ekonomicznej transportu urobku w aspekcie podstawowych założeń oraz funkcji istniejącego bądź planowanego systemu. Zgodnie z tym, rozpatrując cel pracy

należy stwierdzić, że przedłożone modele symulacyjne to właściwe narzędzia przeznaczone do wsparcia powyższych działań poprzez dostarczenie nowej przestrzeni analitycznej, stanowiącej łącznik pomiędzy podlegającymi akwizycji danymi a rosnącymi wymaganiami biznesowymi względem efektywności procesów transportowych.

Literatura

- Achttien, Donald B., i Robert H. Stine. 1964. „Computer simulation of a haulage system”. *Mining Congress Journal*, 41–46.
- Ahmed, Haitham M., Malcolm J. Scoble, i W. Scott Dunbar. 2016. „A Comparison between Offset Herringbone and El Teniente Underground Cave Mining Extraction Layouts Using a Discrete Event Simulation Technique”. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 30 (2), 71–91.
- Alford, Christopher, Marcus Brazil, i David H. Lee. 2007. „Optimisation in underground mining”. *Handbook of operations research in natural resources*, 561–577. Springer.
- Alrabghi, Abdullah, i Ashutosh Tiwari. 2015. „State of the Art in Simulation-Based Optimisation for Maintenance Systems”. *Computers & Industrial Engineering* 82 (April): 167–82.
- Anani, A, i K Awuah-Offei. 2016. „Effect of changing duty cycles with a panel in cm-shuttle car matching: a case study”, 9.
- Anani, Angelina Konadu. 2016. *Applications of Simulation and Optimization Techniques in Optimizing Room and Pillar Mining Systems*, 241.
- Andraş, Andrei, Iosif Andraş. 2015. „Applications of artificial intelligence and mechatronics in mining equipment development.” *Annals of the University of Petrosani Mechanical Engineering* 17.
- Antoniak, Jerzy. 1990. *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Katowice: Wydawnictwo „Śląsk”.
- Apanowicz, Jerzy. 2000. *Metodologiczne elementy procesu poznania naukowego w teorii organizacji i zarządzania*. Gdynia: Wyższa Szkoła Administracji i Biznesu.
- Awuah-Offei, Kwame. 2016. „Energy Efficiency in Mining: A Review with Emphasis on the Role of Operators in Loading and Hauling Operations”. *Journal of Cleaner Production* 117 (marzec), 89–97.
- Aydiner, Kerim. 2006. „A simulation model for mine production sequences”, 7.
- Baafi, Ernest, i Ian Porter. 2010. „Computer simulation of roadway development to support longwall mining”. *Faculty of Engineering - Papers (Archive)*, styczeń, 561–66.
- Balci, O. 2003. „Verification, Validation, and Certification of Modeling and Simulation Applications”. W *Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.03EX693)*, 150–58. New Orleans, LA, USA: IEEE.
- Banks, Jerry, i L Chwif. 2011. „Warnings about Simulation”. *Journal of Simulation* 5 (4), 279–91.
- Banks, Jerry. 1998. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons.
- . 2014. *Discrete-Event System Simulation*. 5. ed., new Internat. ed. Always Learning. Harlow: Pearson.
- Baral, Suresh C., Carlos Daganzo, i Michael Hood. 1987. „Optimum bunker size and location in underground coal mine conveyor systems”. *International Journal of Mining and Geological Engineering* 5 (4), 391–404.
- Basu, Arun J., i Ernest Y. Baafi. 1999. „Discrete Event Simulation of Mining Systems: Current Practice in Australia”. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 13 (2), 79–84.
- Béchar, Vincent, i Normand Côté. 2013. „Simulation of mixed discrete and continuous systems: an iron ore terminal example”. W *Simulation Conference (WSC), 2013 Winter*, 1167–78. IEEE.
- Bernardyn, Józefa, i Ryszard Bernardyn. 1978. *Symulacyjna metoda analizy procesu eksploatacji systemu z transportem ciągłym*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Bjørndal, T., I. Herrero, A. Newman, C. Romero, i A. Weintraub. 2012. „Operations Research in the Natural Resource Industry”. *International Transactions in Operational Research* 19 (1–2), 39–62.
- Blouin, Stéphane, Martin Guay, i Karen Rudie. 2001. „An application of discrete-event theory to truck dispatching”. W *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No. 01CH37148)*, 3:2315–20. IEEE.

- . 2007. „An application of discrete-event theory to truck dispatching”. *Central European Journal of Operations Research* 15 (4), 369–91.
- Bossel, Hartmut. 1994. *Modeling and Simulation*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Botha, J, i S Nichol. 2010. „Rapid underground development optimisation at cullinan diamond mine using computer simulation”, 14.
- Burt C, Caccetta L, i Welgama P. 2005. *Models for Mining Equipment Selection 1*.
- Burt, Christina N., i Louis Caccetta, red. 2018. *Equipment Selection for Mining: With Case Studies*. T. 150. Studies in Systems, Decision and Control. Cham: Springer International Publishing.
- Burý, Alois. 2004. „Application of simulation models for optimization of coal blends”. *Acta Montanistica Slovaca, Ročník* 9 (2).
- Cai, D., E. Baafi, i I. Porter. 2012. „Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software”.
- Chen, Wei, i Xin Li. 2016. „Model Predictive Control Based on Reduced Order Models Applied to Belt Conveyor System”. *ISA Transactions* 65 (listopad), 350–60.
- Chung, Christopher A. 2004. *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. Industrial and Manufacturing Engineering Series. Boca Raton: CRC Press.
- Czuba, W., P. Gospodarczyk, i P. Kulinowski. 2010. „Zastosowanie Metody Elementów Dyskretnych (DEM) do symulacji odstawy urobku przez ścianowy przenośnik zgrzeblowy”. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju* Vol. 1 (no. 3), 213–21.
- Delfmann, Werner, i Sascha Albers. 2000. „Supply chain management in the global context”. working paper.
- Doroszuk, B., R. Król, i L. Gładysiewicz. 2019. „Application of DEM-FEM methods in tests of loads on idlers”.
- Evans, George W., Graham F. Wallace, i Georgia L. Sutherland. 1967. „Simulation using digital computers.”
- F. R. Saayman, P. *. 2006. „Optimization of an Autonomous Vehicle Dispatch System in an Underground Mine”. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 106 (2), 77–86.
- Fioroni, Marcelo Moretti, Luiz Augusto G. Franzese, Caio Eduardo Zanin, Josh Furia, Luciano de Toledo Perfetti, Donizeti Leonardo, i Nilson Laudelino da Silva. 2007. „Simulation of continuous behavior using discrete tools: ore conveyor transport”. W *Simulation Conference, 2007 Winter*, 1655–1662.
- Fioroni, Marcelo Moretti, Letícia Cristina Alves dos Santos, Luiz Augusto G. Franzese, Josiane Cordeiro Seixas, Bruno Salomão Penna, i Gerson Mendes de Alkmim. 2014. „Logistic Evaluation of an Underground Mine Using Simulation”. *Rem: Revista Escola de Minas* 67 (4), 447–54.
- Firganek, Bolesław, i Erwin Pszczółka. 1969. „MINSK-22 w symulacji transportu urobku węgla kamiennego”. *Maszyny matematyczne*, nr 10/69.
- Fjellström, Nurnihal. 2011. „Simulation of an Underground Haulage System, Renström Mine, Boliden Mineral”. 2011.
- Franzese, Luiz Augusto G., Daniel de Oliveira Mota, Marcelo Moretti Fioroni, Yuri Amaral C. L. Mourao, Douglas Jose da Silva, Isac Reis Santana, Johanna Gomez Quevedo, i in. 2011. „Maintenance Framework to Address the Interaction of Components Using Simulation”. W *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, 728–40. Phoenix, AZ, USA: IEEE.
- Frimpong, Samuel, i Jerry M. Whiting. 1995. „Constrained Simulation of a Mine Production System”. *SIMULATION* 65 (5), 305–12.
- Frużyński, Adam. 2012. *Kopalnie węgla kamiennego w Polsce*. Księży Młyn-Dom Wydawniczy Michał Koliński.
- Fukui, Rui, Kouhei Kusaka, Masayuki Nakao, Yuichi Kodama, Masaaki Uetake, i Kazunari Kawai. 2016. „Production Analysis of Functionally Distributed Machines for Underground Mining”. *International Journal of Mining Science and Technology* 26 (3), 477–85.
- Galiyev, S Zh, A A Boyandinova, i Zh A Adilkhanova. 2010. „Information and Methodical Base of Simulation Modelling of Excavator-Truck-Conveyor Complex Operation”. W , 560–575.

- Gamache, Michel, Renaud Grimard, i Paul Cohen. 2005. „A Shortest-Path Algorithm for Solving the Fleet Management Problem in Underground Mines”. *European Journal of Operational Research* 166 (2), 497–506.
- Gleb, Chudinov, i E. B. Zamyatina. 2012. „Development experience of ore extraction and traffic simulation system in potash mines—bundled software “Рудопоток””. W *Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers’ Colloquium on Software Engineering*. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт системного программирования Российской академии наук.
- Gładysiewicz, Lech. 2003. *Przenośniki taśmowe: teoria i obliczenia*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Gołdys, Krzysztof, Rafał Polak, Andrzej Rudzki, Piotr Grzybowski, Piotr Orzeł, i Janusz Bojko. 2014. „Koncepcja Informatycznego Systemu Zarządzania Produkcją - Obszar Logistyka Produkcji”. materiał niepublikowany.
- Gonen, Alper, Tahir Malli, i Halil Kose. 2012. „Selection of Ore Transport System for a Metalliferous Underground Mine / Dobór Systemu Transportu Rud w Kopalni Podziemnej Rud Metalu”. *Archives of Mining Sciences* 57 (3), 779–785.
- Gonzalez, Andrea, Juan Ryo, i Juan Cmos. 2012. „Applications of Discrete-Event Simulation for Mining Process Plants in Chile.” W *The papers of this book comprise the proceedings of the conference mentioned on the title and the cover page. They reflect the authors’ opinions and, with the purpose of timely disseminations, are published as presented and without change. Their inclusion in these proceedings does not necessarily constitute endorsement by the editors.*, 120.
- Gray, G, E Baafi, I Porter, i O Rojas. 2009. „A Simulation Model for Roadway Development to Support Longwall Mining”, 2009.
- Greberg, Jenny, Abubakary Salama, Anna Gustafson, i Bartłomiej Skawina. 2016. „Alternative Process Flow for Underground Mining Operations: Analysis of Conceptual Transport Methods Using Discrete Event Simulation”. *Minerals* 6 (3), 65.
- Harmse, Marthi. 2007. „Capacity modelling of the coal value chain at sasol coal supply”, 6.
- Haviland, David, i Joshua Marshall. 2015. „Fundamental Behaviours of Production Traffic in Underground Mine Haulage Ramps”. *International Journal of Mining Science and Technology* 25 (1), 7–14.
- Hayashi, F, i D Robinson. 1981. „Computer simulation of mine rail haulage system”, 7.
- He, Qing, i Hong Li. 2011. „Review of Dynamic Modeling and Simulation of Large Scale Belt Conveyor System”. W *Intelligent Computing and Information Science*, zredagowane przez Ran Chen, 167–72. Springer Berlin Heidelberg.
- Hermann, Mario, Tobias Pentek, i Boris Otto. 2016. „Design principles for industrie 4.0 scenarios”. W *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 3928–37. IEEE.
- Hirschi, Joseph Christian. 2012. „A Dynamic Programming Approach to Identifying Optimal Mining Sequences for Continuous Miner Coal Production Systems”, 186.
- Horsley, D. A., i M. Splaine. 2003. „An easy to use simulation program for gold mine transport problems”. *ORiON* 2 (2).
- Iverson, S, S J Jung, i K Biswas. 2003. „Comparison of Ore Pass Computer Simulations for Designs Against Dynamic Load”, 11.
- Jahangirian, Mohsen, Tillal Eldabi, Aisha Naseer, Lampros K. Stergioulas, i Terry Young. 2010. „Simulation in Manufacturing and Business: A Review”. *European Journal of Operational Research* 203 (1), 1–13.
- Karkula, Marek. 2012. „Weryfikacja i walidacja dynamicznych modeli symulacyjnych procesów logistycznych”, 10.
- Karkula, Marek, i Lech Bukowski. 2012. „Computational Intelligence Methods — Joint Use in Discrete Event Simulation Model of Logistics Processes”. W *Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1–12. Berlin, Germany: IEEE.
- Kicki, Jerzy, Artur Dyczko, i Rafał Polak. 2009. „Rozszerzenie funkcjonalności systemu EKSPERT o obszar zarządzania dla Działów Energomechanicznych w kopalniach oraz Zakładów Przeróbczych «EKSPERT TM/ZWR» KGHM Polska Miedź S.A”. praca niepublikowana.

- . 2011a. „Koncepcja monitoringu i transmisji danych technologicznych dot. pracy samojezdnych maszyn górniczych KGHM PM S.A.” praca niepublikowana.
- . 2011b. „Opracowanie i wdrożenie zintegrowanego systemu ewidencji, kontroli i oceny pracy maszyn i urządzeń w Działach Energomechanicznych kopalń Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A.” praca niepublikowana.
- Kicki, Jerzy, i Rafał Polak. 2018. „Analiza pracy zmechanizowanych kompleksów ścianowych JSW S.A. w okresie 01.01.2018 -31.12.2018”. praca niepublikowana.
- Koman, Mirosław, i Zbigniew Laska. 2014. „Rozwiązania konstrukcyjne elementów systemu transportu taśmowego O/ZG Rudna, pozwalające na zmianę kierunku przesyłu urobku”. *Cuprum: czasopismo naukowo-techniczne górnictwa rud*.
- Kościelny, Mariusz. 2016. „Model optymalizacyjny odstawy urobku z robót przygotowawczych w kopalni «Lubin»”, 12.
- Kowalski, A., D. Kubiak, Ł. Szwancyber, J. Sobol-Wojciechowska, i P. Śliwiński. 2014. „Model symulacyjny odstawy urobku z robót przygotowawczych w kopalniach KGHM „Polska Miedź” SA”. *Wiadomości Górnicze* R. 65, nr 10.
- Kruczek, Piotr, Marta Polak, Agnieszka Wyłomańska, Witold Kawalec, i Radosław Zimroz. 2018. „Application of compound Poisson process for modelling of ore flow in a belt conveyor system with cyclic loading”. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 32 (6), 376–91.
- Krupa, K., i P. Kliś. 2011. „Symulacja systemu transportowego w kopalni węgla kamiennego”. *Logistyka* nr 3.
- Kulinowski, P. 2013. „Simulation Studies as the Part of an Integrated Design Process Dealing with Belt Conveyor Operations”. *Eksploatacja i Niezawodność* Vol. 15 (1), 83–88.
- Kulinowski, Piotr. 2014. „Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors”. *Archives of Mining Sciences* 59 (1), 123–38.
- Labrecque, Pierre, i Troy Newman. 2012. „The Use of ARENA® Simulation to Estimate Drawpoint Construction Rate, Production Rate and Costs for the Hugo North Lift 1 Panel Cave”, 9.
- Landau, Rubin H. 2008. *A Survey of Computational Physics: Introductory Computational Science*. Princeton: Princeton University Press.
- Lapčević, Veljko, i Slavko Torbica. 2017. „Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving”. *Minerals* 7 (4), 56.
- Lashgari, A, A R Yazdani, i A R Sayadi. 2010. „Methods for Equipments Selection in Surface Mining; Review”, 6.
- Lashgari, Ali, Abdolreza Yazdani–Chamzini, Mohammad Majid Fouladgar, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Shahriar Shafiee, i Nick Abbate. 2012. „Equipment Selection Using Fuzzy Multi Criteria Decision Making Model: Key Study of Gole Gohar Iron Min”. *Engineering Economics* 23 (2), 125–136.
- Law, Averill M. 2013. *Simulation Modeling and Analysis*. Fifth edition. McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management Science. Dubuque: McGraw-Hill Education.
- Lebedev, Alexander A., i Phillip Staples. 1998. „Simulation of Materials Handling Systems in the Mines: Two Case Studies”. *SIMULATION* 70 (3), 183–196.
- Leeuw, P, i N Mkhwanazi. 2017. „LHD-Inhibiting Factors in Southern African Underground Mines”, 13.
- Li, Zhen, i B Eng. 2012. „Application of simulation techniques in development planning for caving methods”, 199.
- Lisowski, A. 2015. „Elementarz ekonomizacji zarządzania i warunki osiągnięcia przełomu w tym zakresie w kopalniach węgla kamiennego. Polemiki–dyskusje”. *Przegląd Górniczy* 71 (6), 1–8.
- Liu, Zhixiang, Chunxue Xie, Miao Xie, i Jun Mao. 2017. „A New Simulation Method for Cargo Distribution on the Scraper Conveyor Used in Coal Plough Face” 32, 8.
- Łatuszyńska, Małgorzata. 2011. „Metody symulacji komputerowej – próba klasyfikacji logicznej”, 14.
- Mahieu, Pierre. 2018. „Evaluation and Optimization of an Underground Haulage System Using Discrete Event Simulation”, March.

- Mankge, Katlego. 2013. „A Simulation Approach to Constraints Management of an Underground Conveyor System”, 114.
- Manula, Charles Basil, i R. L. Sanford. 1967. „Planning belt conveyor networks using computer simulation”. Pennsylvania State Univ., University Park (USA). Dept. of Mining.
- Marasová, D., N. Husáková, i J. Gurecka. 2012. „Design of simulation model for integrated system of siderite transport”. *Transport and Logistics. Roč. 12 (2012)*, 1–10.
- Marcinkowski, Leszek. 2011. „Numeryczne rozwiązywanie równań różniczkowych”, 140.
- Mardani, Abbas, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Zainab Khalifah, Ahmad Jusoh, i Khalil MD Nor. 2015. „Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: a systematic review of the state of the art literature”. *TRANSPORT* 31 (3), 359–385.
- Mathaba, Tebello, i Xiaohua Xia. 2015. „A Parametric Energy Model for Energy Management of Long Belt Conveyors”. *Energies* 8 (12), 13590–608.
- Mazurkiewicz, Dariusz. 2011. *Studium wybranych aspektów diagnostyki eksploatacyjnej transportu taśmowego*. Politechnika Lubelska.
- Mcneary, Richard L., i Zhenshan Nie. 2000. „Simulation of a conveyor belt network at an underground coal mine”. *Mineral Resources Engineering* 9 (03): 343–55.
- Meng, Chao, Sai Srinivas Nageshwaraniyer, Amir Maghsoudi, Young-Jun Son, i Sean Dessureault. 2013. „Data-Driven Modeling and Simulation Framework for Material Handling Systems in Coal Mines”. *Computers & Industrial Engineering* 64 (3), 766–779.
- Michalakopoulo, T.N, A.D. Kouvardas, i G.N Panagiotou. 2004. „Discrete-Event Simulation of a Tunneling Haulage System”.
- Michalakopoulos, T. N., S. E. Arvaniti, i G. N. Panagiotou. 2005. „Simulation of a continuous lignite excavation system”.
- Michalakopoulos, Theodore N., Christos P. Roumpos, Michael J. Galetakis, i George N. Panagiotou. 2015. „Discrete-Event Simulation of Continuous Mining Systems in Multi-layer Lignite Deposits”. W *Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining - Aachen 2014*, zredagowane przez Christian Niemann-Delius, 225–39. Cham: Springer International Publishing.
- Michalakopoulos, Theodoros. 2017. „ARENA simulation of continuous lignite excavation systems”, luty.
- Mielczarek, Bożena. 2009. *Modelowanie symulacyjne w zarządzaniu: symulacja dyskretna*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Minkin, Andrey. 2012. „Analysis of transfer stations of belt conveyors with help of discrete element method (DEM) in the mining industry”. *Transp. Logist* 12, 1–6.
- Miwa, Kanna, i Soemon Takakuwa. 2011. „Operations Modeling and Analysis of an Underground Coal Mine”. W *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1680–90. Phoenix, AZ, USA: IEEE.
- Morin, Mario, Andrew Bamber, i Malcolm Scoble. 2004. „System Analysis and Simulation of Narrow Vein Mining Method with Underground Pre-Concentration”, 14.
- Mourtzis, D., M. Doukas, i D. Bernidaki. 2014. „Simulation in Manufacturing: Review and Challenges”. *Procedia CIRP* 25: 213–229.
- Myszkowski, M., i U. Paschedag. 2018. *Eksploatacja ścianowa w pokładach średniej miąższości. Kompleksowe porównanie kombajnu ze strugiem węglowym*.
- Nance, Richard E, i C Michael Overstreet. 2003. „Addendum to history of computer simulation software: an initial perspective”, 21.
- Nance, Richard E., i C. Michael Overstreet. 2017. „History of Computer Simulation Software: An Initial Perspective”. W *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, 243–61. Las Vegas, NV: IEEE.
- Naylor, Thomas H. 1975. *Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych*. Państwowe Wydaw. Naukowe.
- Negahban, Ashkan, i Jeffrey S. Smith. 2014. „Simulation for Manufacturing System Design and Operation: Literature Review and Analysis”. *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2), 241–261.

- Nehring, M., E. Topal, i P. Knights. 2010. „Dynamic Short Term Production Scheduling and Machine Allocation in Underground Mining Using Mathematical Programming”. *Mining Technology* 119 (4), 212–220.
- Nehring, M., E. Topal, i J. Little. 2010. „A new mathematical programming model for production schedule optimization in underground mining operations”. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 110 (8), 437–446.
- Newman, Alexandra M., Enrique Rubio, Rodrigo Caro, Andrés Weintraub, i Kelly Eurek. 2010. „A Review of Operations Research in Mine Planning”. *Interfaces* 40 (3), 222–245.
- Nikoukaran, Jalal, i Ray J Paul. 1999. „Software Selection for Simulation in Manufacturing: A Review”. *Simulation Practice and Theory* 7 (1), 1–14.
- Nowak, Stefan. 1985. *Metodologia badań społecznych*. Państwowe Wydawn. Naukowe.
- O’Connell, T., i J. Sturgul. 2010. „Simulation and Animation Model for the Millerton Coal Mine (New Zealand)”. W . Australian Institute of Mining & Metallurgy.
- Okolnishnikov, Victor, Sergey Rudometov, i Sergey Zhuravlev. 2012. „Using simulation for development of process control system in coal mining”. W *Proc. 3th Intern. Conf. on Appl. Inform. and Comp.(AICT’12), Barcelona, Spain*, 141–144.
- . 2013a. „Simulation environment for development of automated process control system in coal mining”. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development* 7 (5), 255–262.
- . 2013b. „Simulation of Technological Processes in Coal Mining”. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (9), 2173–78.
- . 2016. „Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine”. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 6 (3), 993–999.
- . 2017. „Using of Specialized Library for Simulation of Coal Mining in Flat-Lying Coal Seam”, February.
- Okolnishnikov, Victor, Sergey Rudometov, Sergey Zhuravlev, i Vasily Sinoviev. 2017. „Simulation of Coal Mining in Flat-Lying Coal Seam”, February.
- Panagiotou, George N. 1999. „Discrete Mine System Simulation in Europe”. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 13 (2), 43–46.
- . 2018. „Simulating the BWE-Conveyor-Stacker System in Python using Salabim”. W .
- Pascual, R, A Martínez, i R Giesen. 2013. „Joint Optimization of Fleet Size and Maintenance Capacity in a Fork-Join Cyclical Transportation System”. *Journal of the Operational Research Society* 64 (7), 982–994.
- Polak, Rafał. 2011. „Koszty cyklu życia urządzeń energomechanicznych w kontekście oceny efektywności ich pracy w podziemnych zakładach górniczych”. *Wiadomości Górnicze* 62 (10), 569–578.
- . 2014. „Adaptacja kluczowych miar efektywności strategii TPM w warunkach kopalni węgla kamiennego”. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, nr 87: 49–69.
- . 2015. „Dynamiczny szacunek kosztów cyklu życia maszyn i urządzeń górniczych-przykład zastosowania dla kompleksu ścianowego”. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, nr 89: 93–110.
- . 2016. „Karta miar efektywności jako narzędzie oceny pracy kompleksu ścianowego”. *Przegląd Górniczy* 72 (5), 79–85.
- Pop-Andonov, Goran, Dejan Mirakovski, i Zoran Despodov. 2012. „Simulation Modeling and Analyzing in Underground Haulage Systems with Arena Simulation Software”. *International Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry MTM (Machines, Tecnologies, Materials)*, 48–50.
- Que, Sisi, Kwame Awuah-Offei, i Samuel Frimpong. 2016. „Optimising Design Parameters of Continuous Mining Transport Systems Using Discrete Event Simulation”. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 30 (3), 217–230.
- Redziak, Z. 2013. „Niepewność w podejmowaniu decyzji”. *Zeszyty Naukowe AON*, nr 2 (91), 102–130.
- Ritter, Felix. 1998. „Mining Simulation - Multipurpose Models for Large-Scale Systems”, 61.

- Roberts, B. H. 2002. „Computer Simulation of Underground Truck Haulage Operations”. *Mining Technology* 111 (2), 123–128.
- Roberts, Stephen D., i Dennis Pegden. 2017. „The History of Simulation Modeling”. W *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, 308–23. Las Vegas, NV: IEEE.
- Robinson, Stewart. 1997. „Simulation Model Verification and Validation: Increasing the Users’ Confidence”. W *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation - WSC '97*, 53–59. Atlanta, Georgia, United States: ACM Press.
- . 2004. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd.
- , red. 2011. *Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation*. Boca Raton: CRC Press.
- Runciman, Neil. 1997. „Evaluation of underground mining equipment systems using discrete-event simulation with animation”, 178.
- Salama, A. 2017. „Financial Analysis of the Impact of Increasing Mining Rate in Underground Mining, Using Simulation and Mixed Integer Programming”. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 117 (4), 365–372.
- Salama, Abubakary. 2014. „Haulage System Optimization for Underground Mines: A Discrete Event Simulation and Mixed Integer Programming Approach”. Luleå: Luleå University of Technology.
- Salama, Abubakary, i Jenny Greberg. 2012. „Optimization of truck-loader haulage system in an underground mine: A simulation approach using SimMine”. W *International Conference & Exhibition on Mass Mining: 10/06/2012-14/06/2012*.
- Salama, Abubakary Juma. 2014. „The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection”.
- Salama, Abubakary, Micah Nehring, i Jenny Greberg. 2014. „Operating value optimisation using simulation and mixed integer programming”. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 28 (1), 25–46.
- . 2016. „Analysis of the impact of increasing mining rate in underground mining using simulation and mixed integer programming”. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Sandeman, Tom, Chris Fricke, Peter Bodon, i Chris Stanford. 2010. „Integrating optimization and simulation-A comparison of two case studies in mine planning”. W *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*, 1898–1910. IEEE.
- Sanford, R. L., i C. B. Manula. 1965. „Simulation Model on the Optimal Design of Belt Conveyor Systems”. SR-47. Pennsylvania State Univ., University Park (USA). Dept. of Mining.
- Schruben, Lee W., i Barry H. Margolin. 1978. „Pseudorandom number assignment in statistically designed simulation and distribution sampling experiments”. *Journal of the American Statistical Association* 73 (363), 504–520.
- Semini, Marco, Hakon Fauske, i Jan Strandhagen. 2006. „Applications of Discrete-Event Simulation to Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey”. W *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 1946–53. Monterey, CA, USA: IEEE.
- Shannon, R.E. 1998. „Introduction to the Art and Science of Simulation”. W *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36274)*, 1:7–14. Washington, DC, USA: IEEE.
- Shelswell, Kristopher John, John Fitzgerald, i Pierre O. Labrecque. 2013. „Discrete Event Simulation Modelling versus TKM Analysis of a Mine Operating with a Hybrid Material Movement Practice Consisting of Truck Haulage and Skipping”. W *Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum Annual Meeting, Toronto*.
- Shishvan, M, i J Benndorf. 2014. „Performance Optimization of Complex Continuous Mining System Using Stochastic Simulation”. W *Engineering Optimization 2014*, zredagowane przez Aurelio Araujo, 273–78. CRC Press.
- Shtele, V. I., i V. M. Abramov. 1981. „Modeling underground transportation systems in assessing alternatives of technological developments of coal mines”. *Soviet Mining* 17 (4), 363–70.
- Sitorus, Fernando, Jan J. Cilliers, i Pablo R. Brito-Parada. 2019. „Multi-Criteria Decision Making for the Choice Problem in Mining and Mineral Processing: Applications and Trends”. *Expert Systems with Applications* 121 (maj), 393–417.
- Sjödin, Erik. 2015. „Evaluation of Mining Automation with Production Simulation”.

- Skawina, Bartłomiej, Jenny Greberg, Max Astrand, Fredrik Sundqvist, i Abubkary Salama. 2019. „Automatic closed-loop scheduling in underground mining using DES”.
- Skawina, Bartłomiej, Jenny Greberg, Abubkary Salama, Oliver Langefeld, Luleå tekniska universitet, i Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser. 2019. *Load-Haul-Dump Operations in Underground Mines*.
- Skawina, Bartłomiej, Abubakary Salama, i Jenny Greberg. 2019. „Simulating the effect of LHD operations on production rates and ventilation costs in a sublevel cave underground mine”. *CIM Journal* 10 (3).
- Skawina, Bartłomiej, Abubakary Salama, Jenny Greberg, i Fredrik Sundqvist. 2019. „Selection of discrete event simulation software for simulating mining operations”.
- Stefaniak, P., P. Kruczek, P. Śliwiński, N. Gomolla, A. Wyłomańska, i R. Zimroz. 2019. „Bulk Material Volume Evaluation and Tracking in Belt Conveyor Network Based on Data from SCADA”. W *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018*, zredagowane przez Eleonora Widzyk-Capehart, Asieh Hekmat, i Raj Singhal, 335–44. Cham: Springer International Publishing.
- Sturgul, John R. 2001. „Modeling and Simulation in Mining - Its Time Has Finally Arrived”. *SIMULATION* 76 (5), 286–288.
- Sturgul, John R., i Zhongxue Li. 1997. „New Developments in Simulation Technology and Applications in the Minerals Industry”. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 11 (4), 159–162.
- Sturgul, J.R. 1999. „Discrete Mine System Simulation in the United States”. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 13 (2), 37–41.
- Tako, Antuela A., i Stewart Robinson. 2012. „The Application of Discrete Event Simulation and System Dynamics in the Logistics and Supply Chain Context”. *Decision Support Systems* 52 (4), 802–815.
- Tarnowski, Wojciech. 1987. *Model procesu wyboru w projektowaniu technicznym*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej
- Tarshizi, Ebrahim Karimi. 2014. „Multiple discrete-event simulation and animation models to assist modern mining operations”, 415.
- Tenorio, Victor Octavio. 2012. „Measurement of the Effectiveness of a Decision Support System for Blending Control of Large Scale Coal Mines”.
- Thiruvengadam, Magesh, Yi Zheng, i Jerry C. Tien. 2016. „DPM Simulation in an Underground Entry: Comparison between Particle and Species Models”. *International Journal of Mining Science and Technology* 26 (3), 487–494.
- Touwen, F. H., i N. C. Joughin. 1972. „The simulation of underground stoping and transport operations in gold mining”. *Application of computer methods in the mineral industry: proceedings of the tenth international symposium. Johannesburg–South Africa*, 10–14.
- Turner, R.J. 1999. „Simulation in the Mining Industry of South Africa”. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 13 (2), 47–56.
- Vagenas, Nikos. 1991. „Dispatch Control of a Fleet of Remote-Controlled/Automatic Load-Haul-Dump Vehicles in Underground Mines”. *International Journal of Production Research* 29 (11), 2347–2363.
- Vande Wouwer, Alain, Philippe Saucez, i Carlos Vilas. 2014. *Simulation of ODE/PDE Models with MATLAB®, OCTAVE and SCILAB*. Cham: Springer International Publishing.
- Vasquez, Oscar C., Juan M. Sepúlveda, i Felisa Córdova. 2011. „Modelagem e Otimização Da Operação de Veículos Na Mineração de Cobre Subterrânea”. *Rem: Revista Escola de Minas* 64 (3), 365–71.
- Vianen, T. van, J. Ottjes, i G. Lodewijks. 2016. „Belt conveyor network design using simulation”. *Journal of Simulation* 10 (3), 157–165.
- Wang, Shuang, Yong-Cun Guo, De-Yong Li, i Kun Hu. 2016. „Research of lateral force of pipe conveyor belt’s vertical transport section” 37 (1), 9.
- Wianecki, Augustyn. 1978. „Badania numeryczne wpływu niezawodności pracy elementów systemu maszynowego z transportem ciągłym na zdolność wydobywczą i przepustowość transportową kopalni”, 12.

- Wilhelm, Emmerich. 1987. „Determination of caloric quantities of dilute liquid solutions”. *Thermochimica Acta* 119 (1), 17–33.
- Xiao-ping, Bai, Zhao Yu-hong, i Liu Ya-nan. 2015. „A Novel Approach to Study Real-Time Dynamic Optimization Analysis and Simulation of Complex Mine Logistics Transportation Hybrid System with Belt and Surge Links”. *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015, 1–8.
- Xu, Lei, Sheng Ye, Guilin Lu, i Zhen Zhang. 2011. „Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System”. W *Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling*, 116–121. Springer.
- Yingling, J.C., Z. Luo, i J. Sottile. 1997. „On-line control strategies to minimize peak loads on mine conveyor networks using surge units with variable discharging capability”. *IEEE Transactions on Industry Applications* 33 (1), 90–99.
- Yun, Q. X., i T. M. Yegulalp. 1983. „Optimization of underground transportation systems using a network flows model”. *International Journal of Mining Engineering* 1 (3), 267–75.
- Yuriy, Greg M. 2005. *Discrete-event Simulation of Mine Equipment Systems Combined with a Reliability Assessment Model*. Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada.
- Zhang, Shirong, i Xiaohua Xia. 2010. „Optimal Control of Operation Efficiency of Belt Conveyor Systems”. *Applied Energy* 87 (6), 1929–1937.
- . 2011. „Modeling and Energy Efficiency Optimization of Belt Conveyors”. *Applied Energy* 88 (9), 3061–3071.
- Zhao, Guoyan, Changshou Hong, Xiangyang Li, Chunping Lin, i Penghua Hu. 2016. „Predictive Analysis of Shaft Station Radon Concentrations in Underground Uranium Mine: A Case Study”. *Journal of Environmental Radioactivity* 158–159 (lipiec), 129–137.
- Zheng, Yi, Magesh Thiruvengadam, Hai Lan, i Jerry C Tien. 2015. „Simulation of DPM Dispersion for Different Mining Operations Inside a Dead-End Entry”, 10.
- Zhou, Wang, Ji, i Cottrill. 2019. „Coordinated Control Strategy for Multi-Line Bus Bunching in Common Corridors”. *Sustainability* 11 (22), 6221.