



Sławomir Biruk

Metodyka planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego



MONOGRAFIE

Lublin 2018

Metodyka planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Sławomir Biruk

Metodyka planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2018

Recenzenci:

dr hab. inż. Włodzimierz Martinek

dr hab. inż. Mieczysław Połośński, prof. SGGW

Redakcja i skład: Łukasz Rzepecki

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2018

ISBN: 978-83-7947-317-5

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Wstęp.....	7
Geneza tematu	7
Cel i zakres pracy	9
1. Plan produkcyjny przedsiębiorstwa budowlanego	13
2. Analiza ryzyka w procesie budowlanym	21
3. Modelowanie przedsięwzięć budowlanych	27
3.1. Klasyczne metody planowania przedsięwzięć budowlanych.....	27
3.2. Rozwinięcia metody <i>CPM</i> i <i>PERT</i>	31
3.3. Reguły heurystyczne alokacji zasobów	35
3.4. Modelowanie graficzno-symulacyjne procesów budowlanych	39
4. Modelowanie czasu realizacji procesów budowlanych.....	45
4.1. Rozkłady czasu realizacji procesów budowlanych	45
4.2. Rozmyte modelowanie czasu realizacji procesów budowlanych	58
4.3. Metody estymacji dyspersji czasu realizacji procesów budowlanych w warunkach ryzyka	63
4.4. Przewidywanie czasu realizacji procesów budowlanych.....	72
4.5. Teoria uczenia się i zapominania	74
4.6. Korelacja zmiennych losowych czasu realizacji procesów budowlanych....	82
5. Mierniki krytyczności procesów	91
6. Prowadzenie badań symulacyjnych	99
7. Przykłady zastosowania modelowania symulacyjnego przedsięwzięć budowlanych	105
8. Propozycja autorskiej metodyki planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego.....	113
8.1. Wprowadzenie	113
8.2. Wspomaganie planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego	116
8.2.1. Proponowana metodyki planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego	116
8.2.2. Opis modelu symulacyjnego planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego	120
8.2.3. Przykład symulacyjnego ustalenia poziomu zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego.....	127
8.3. Wspomaganie planowania operatywnego realizacji zbioru zleceń.....	146

8.3.1. Proponowany system zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (<i>SZOZOPB</i>).....	146
8.3.2. Przykłady działania systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (<i>SZOZOPB</i>)	149
Podsumowanie.....	159
Bibliografia	163
Streszczenie.....	185
Abstract.....	187

Wstęp

Geneza tematu

Działalność wszelkiego rodzaju organizacji mających na celu oddanie do użytkowania systemów technicznych (obiektów budowlanych), jako wynik procesu realizacji budowy, określana jest mianem budowlanych systemów produkcyjnych (Cieszyński 1999). Działalność budowlaną z punktu widzenia planowania należy podzielić na działalność o charakterze przedsięwzięcia i działalność usługową (Marcinkowski 2007). Przedsięwzięcie budowlane to spójne działania obejmujące budowę, montaż lub remont, odbiór i przekazanie do eksploatacji obiektów budowlanych (Kasprowicz 2002). Jest to proces inwestycyjny, który jak każde złożone działanie zorganizowane, musi być dobrze przygotowany koncepcyjnie i organizacyjnie, by mógł być wykonywany efektywnie w danych warunkach realizacji, a także przy danym stanie nauki i techniki (Jaworski 1999, Kapliński 1997, Kasprowicz 2002). Metodyka projektowania jego realizacji jest ściśle powiązana z modelowaniem struktury techniczno-organizacyjnej wykonawcy robót budowlanych (Marcinkowski 2002). W przypadku harmonogramowania przedsięwzięć typu kompleks operacji, obejmujących procesy niecykliczne, nierytmiczne i niejednorodne, są stosowane powszechnie w budownictwie metody sieciowe (Jaworski 1999). Najpopularniejsze z nich to metoda decydujących ciągów działań (*Critical Path Method*) oraz *PERT (Program Evaluation and Review Technique)*.

Harmonogramowanie przedsięwzięć, stanowiące element planowania, projektowania i zarządzania realizacją budowy, jest i było przedmiotem badań w wielu ośrodkach zagranicznych, a także w Polsce m.in. w Politechnice Poznańskiej (Kapliński 1997), Politechnice Warszawskiej (Jaworski 1999, Kulejewski 2010), Wojskowej Akademii Technicznej (Kasprowicz 2002, Marcinkowski 2002), Politechnice Krakowskiej (Biernacki i Cyunel 1989), Wrocławskiej (Mrozowicz 1997, Hejducki i Rogalska 2011), SGGW (Połowski 1997) także Politechnice Lubelskiej (Biruk i Jaśkowski 2009, Jaśkowski 2008). Od kilkudziesięciu lat obserwuje się rozwój metod pozwalających na modelowanie rzeczywistych warunków realizacyjnych (w tym przede wszystkim ograniczeń w dostępności zasobów, a także warunków losowych). Zagadnienia te formułowane są zazwyczaj w postaci zadań optymalizacyjnych o dużym stopniu złożoności obliczeniowej, rozwiązywanych z wykorzystaniem różnych narzędzi i metod. Ponieważ metody dokładne (np. metoda podziału i ograniczeń, programowanie dynamiczne) pozwalają na rozwiązywanie zwykle problemów testowych o niewielkiej złożoności obliczeniowej, dla zagadnień praktycznych konieczne jest rozwijanie metod przybliżonych.

Realizacja przedsięwzięcia odbywa się często w warunkach ryzyka i niepewności (Bowers 1996, Elmagrahaby 2000, Fatemi Ghomi i Teimouri 2002, Hoła i Mrozowicz 2003, Jaworski 1999, Kapliński 2007, Kasprowicz

2002, Majid i McCaffer 1998, Skorupka 2007, Sobotka 2000). Proces projektowania realizacji przedsięwzięcia budowlanego na każdym etapie powinien uwzględniać istniejące warunki działania. Praktyka wskazuje, że rzeczywisty czas budowy rzadko jest zgodny z planowanym. Wynika to z wpływu warunków losowych. Współcześnie można wyróżnić dwa kierunki rozwoju metod sporządzania harmonogramu budowy w niedeterministycznych warunkach budowy. Pierwszy z nich bazuje na wykorzystaniu metod stochastycznych, drugi – teorii zbiorów rozmytych. W drugim przypadku czas wykonania procesów nie jest zmienną losową, lecz wielkością określaną nieprecyzyjnie (Kulejewski i Ibadov 2011). W obu podejściach przyjmuje się, że doświadczony planista jest w stanie przewidzieć przybliżony scenariusz wystąpienia określonych czynników oraz ich przybliżone skutki.

Modele symulacyjne są stosowane do opisu, planowania i badania złożonych przedsięwzięć budowlanych od kilkudziesięciu lat. Symulację można zdefiniować jako technikę rozwiązywania różnych problemów, polegającą na śledzeniu w czasie zmian zachodzących w dynamicznym modelu systemu (Gordon 1974). Metody symulacyjne są stosowane do analizy systemu w przypadku, gdy badany system jest tak skomplikowany, że nie można uzyskać rozwiązania metodami analitycznymi. Główną zaletą modeli symulacyjnych jest brak ograniczeń dotyczących struktury i stopnia skomplikowania badanego systemu oraz możliwość uwzględnienia procesów stochastycznych, co pozwala na modelowanie systemów rzeczywistych o wysokim stopniu złożoności i dużym udziale czynników losowych (Mielczarek 2009).

Eksperymenty symulacyjne sieci z czasami niedeterministycznymi mogą dostarczyć informacji o znaczeniu czynników ryzyka występujących podczas realizacji przedsięwzięcia i dotyczyć oceny wpływu zmienności czasu wykonania procesów na czas realizacji przedsięwzięcia (Elmaghraby 2000). Modele symulacyjne, poprzez syntezę możliwych do oszacowania wpływów losowych na czas realizacji pojedynczych procesów, pozwalają na oszacowanie przebiegu realizacji całego przedsięwzięcia i wykonania planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego.

Realizowane przez dane przedsiębiorstwo przedsięwzięcia budowlane są połączone poprzez wspólne zasoby przedsiębiorstwa. Na etapie planowania należy uwzględnić nie tylko jakość, koszt i termin realizacji pojedynczych przedsięwzięć, ale także konieczność racjonalnego wykorzystania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa. W literaturze przedmiotu opracowano niewiele metod mających na celu harmonizację planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego.

Każde przedsięwzięcie budowlane jest realizowane w innych warunkach otoczenia bliskiego i dalszego, podlega wpływom odmiennych czynników ryzyka. Efektywność działalności w budownictwie można zwiększyć poprzez: eliminację przestojów, wykonywanie procesów we właściwej kolejności (Dytczak i in. 2014), dostosowanie liczby zasobów do wielkości frontów roboczych i harmoni-

zając w obrębie przedsięwzięcia jak i z perspektywy przedsiębiorstwa. Osiągnąć można to poprzez właściwe planowanie działalności przedsiębiorstwa, podczas którego ustala się kryteria oceny i sposób osiągnięcia celu. Na etapie zarządzania operatywnego plany te są dostosowywane do aktualnych warunków realizacyjnych.

Cel i zakres pracy

Celem rozprawy jest opracowanie metodyki planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego. Plan produkcyjny przedsiębiorstwa (zbiór realizowanych zleceń) jest zmienny w czasie. Zmienność wynika z losowych terminów rozpoczynania nowych robót, losowego czasu realizacji procesów budowlanych oraz wcześniej podjętych decyzji o alokacji limitowanych zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego. Cel rozprawy zostanie osiągnięty poprzez opracowanie modelu symulacyjnego planu realizacji produkcyjnego przedsiębiorstwa oraz zaprojektowanie systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*).

Model symulacyjny umożliwi analizę wpływu poziomu dostępności zasobów odnawialnych na czas realizacji i opóźnienia terminów rozpoczynania oraz zakończenia poszczególnych przedsięwzięć budowlanych. Analiza wyników prowadzonych badań symulacyjnych daje możliwość ustalania poziomu dostępności zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego zapewniającego terminową realizację zleceń i jednocześnie zapewnienie wysokiego stopnia ich wykorzystania. Na etapie planowania strategicznego informacje te są niezbędne do dostosowania potencjału wykonawczego przedsiębiorstwa (poziomu zatrudnienia, liczby brygad roboczych i sprzętu budowlanego) do przewidywanego w warunkach rynkowych zbioru zleceń. Dodatkowo model symulacyjny umożliwia wyznaczenie rozkładu czasu realizacji przedsięwzięć przy uwzględnieniu ograniczeń w dostępności zasobów, wynikających nie tylko z założonych limitów ich dostępności, ale także z równoległej realizacji procesów budowlanych na wszystkich placach budów. Tak określona dystrybucja rozkładu czasu realizacji przedsięwzięcia może być podstawą ustalenia, na etapie planowania taktycznego, terminów dyrektywnych przedsięwzięć na określonym poziomie niezawodności, z większą dokładnością niż w metodach stosowanych obecnie, opartych na analizie czasu realizacji pojedynczego przedsięwzięcia.

Zweryfikowane symulacyjnie reguły alokacji zasobów do realizacji równoległe realizowanych zleceń, zaimplementowane w modelu symulacyjnym, mogą być wykorzystane w proponowanym systemie zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa (*SZOZOPB*), który ma na celu usprawnieniu prac służb dyspozytorskich w alokacji kluczowych zasobów do wykonania przedsięwzięć realizowanych przez przedsiębiorstwo na wszystkich placach budów.

W rozdziale pierwszym przedstawiono zasady tworzenia planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego, zapewniającego harmonizację procesów budowlanych na wszystkich placach budów realizowanych przez przedsiębiorstwo budowlane. Zwrócono szczególną uwagę na konieczność uzyskania kompromisowego rozwiązania między celami przedsięwzięcia a przedsiębiorstwa budowlanego.

W rozdziale drugim zidentyfikowano podstawowe determinanty ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych. Na podstawie przeglądu literatury, bezpośrednich wywiadów z uczestnikami procesu inwestycyjno-budowlanego oraz badań ankietowych pracowników przedsiębiorstw budowlanych ustalono listę czynników ryzyka oraz ich ważność ze względu na częstość ich występowania i wpływ na czas realizacji procesów budowlanych, a także zidentyfikowano najbardziej istotne warunki realizacyjne wpływające na poziom ryzyka czasu.

W rozdziale trzecim omówiono metody wspomagające planowanie realizacji procesów budowlanych w warunkach losowych, w szczególności metodę *PERT* oraz udoskonalone metody sieciowe: *GERT*, *VERT* oraz *GAAN*. Krytyce poddane zostały założenia metody *PERT*. Przedstawiono najczęściej stosowane reguły heurystyczne alokacji zasobów odnawialnych (głównie reguły priorytetowe), z których część została zaimplementowana w modelu symulacyjnym realizacji planu produkcyjnego oraz w systemie zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*). Opisano także alternatywne modele graficzno-matematyczne przedsięwzięć budowlanych: *CYCLONE*, grafy zdarzeń, grafy *QSG* oraz sieci *Petriego*, które zwiększają możliwości odwzorowywania przebiegu realizacji przedsięwzięć budowlanych i mogą być podstawą do tworzenia bardziej realistycznych modeli symulacyjnych.

Rozdział czwarty zawiera krytyczną analizę metodyki szacowania czasu realizacji procesów budowlanych według klasycznych reguł stosowanych w metodzie *PERT*. Przeprowadzono analizę możliwych błędów wynikających ze stosowania oszacowań czasu optymistycznego, najbardziej prawdopodobnego i pesymistycznego. Przedstawiono alternatywne metody szacowania czasu realizacji procesów budowlanych oraz omówiono inne typy rozkładów czasu ich trwania, które mogą być stosowane w analizie przedsięwzięć budowlanych realizowanych w warunkach losowych, w szczególności z wykorzystaniem metody symulacji komputerowej. Szczególną uwagę zwrócono na problem korelacji zmiennych losowych oraz wpływ zjawiska uczenia i zapominania na czasy realizacji procesów powtarzalnych, wykonywanych przez te same brygady robocze.

W rozdziale piątym omówiono koncepcję krytyczności procesów oraz przedstawiono różne mierniki ich oceny. Mierniki te implementowane są zazwyczaj w regułach priorytetowych rozdziału zasobów w warunkach losowych.

Rozdział szósty przedstawia etapy przeprowadzania badań symulacyjnych, a w siódmym przedstawiono modele symulacyjne przedsięwzięć budowlanych opisane w literaturze przedmiotu.

W rozdziale ósmym przedstawiono proponowaną metodykę planowania realizacji zbioru zleceń. Opisano opracowany na potrzeby niniejszej monografii model symulacyjny realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego, który pozwala na ustalenie poziomu zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa dostosowanego do planowanego zbioru zleceń. Przedstawiono także analizę symulacyjną realizacji planu produkcyjnego bazującego na danych pozyskanych z jednego z lubelskich przedsiębiorstw budowlanych, które świadczy usługi deweloperskie. Zaproponowano system zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*), który ma celu usprawnienie podejmowania decyzji na szczeblu operacyjnym o alokacji limitowanych zasobów odnawialnych i kolejności realizacji procesów budowlanych. Jego działanie zostało zilustrowane przykładami.

W ostatnim rozdziale podsumowano wyniki pracy oraz wskazano kierunki dalszych badań.

1. Plan produkcyjny przedsiębiorstwa budowlanego

Przedsiębiorstwo jest podstawowym podmiotem gospodarczym, odpowiednio zorganizowanym, wyodrębnionym ekonomicznie i prawnie (Bień 1989). Jego celem jest, poprzez wykorzystanie czynników produkcji, produkowanie dóbr rzeczowych (towarów) lub świadczenie usług i ich sprzedaż (Kaczmarek 2014). Warunkiem koniecznym istnienia przedsiębiorstwa są potrzeby klientów, zaspokajane przez jego produkty (usługi, wyroby). Przedsiębiorstwo musi przynosić zysk w określonym okresie prowadzenia działalności. W ramach struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa dokonuje się podziału pracy, władzy, prestiżu oraz delegowania uprawnień do podejmowania decyzji i dostępu do informacji. Struktura organizacyjna przedsiębiorstwa jest definiowana jako ogół zależności funkcjonalnych, hierarchicznych oraz technicznych między składnikami organizacji, zgrupowanymi w stanowiska, komórki i większe jednostki organizacyjne, umożliwiającymi zarządzanie organizacją. Tak rozumiana struktura pełni funkcję narzędzia zarządzania (Nalepka 2001).

Podstawowa działalność przedsiębiorstwa budowlanego polega na realizacji zadań (obiektów czy robót budowlanych) na placach budów (Marcinkowski 2007). Z punktu widzenia zarządzającego przedsiębiorstwem budowlanym, każdy proces budowy jest utożsamiany z przedsięwzięciem budowlanym (o określonym, skończonym czasie realizacji, ustalonym terminie rozpoczęcia i zakończenia oraz koszcie realizacji). Przedsięwzięcia są powiązane poprzez współdzielone zasoby przedsiębiorstwa budowlanego, angażowane do realizacji różnych zleceń.

Liczba przedsięwzięć, w realizacji których uczestniczy przedsiębiorstwo, jest zmienna w czasie. Również struktura systemu wykonawczego przedsięwzięcia podlega dynamicznym zmianom i odpowiada zbiorowi wykonawców realizujących w danym terminie procesy budowlane (Kasprowicz 1998, Jaśkowski 2008). Podczas realizacji budowy jest powszechnie stosowany system złożony z zasobów generalnego wykonawcy i podwykonawców realizujących procesy, których zakres nie jest objęty specjalizacją generalnego wykonawcy. Zazwyczaj podwykonawcy stanowią także rezerwę zasobów generalnego wykonawcy. Dobór poszczególnych podwykonawców powinien być dokonywany przede wszystkim na podstawie kryteriów decydujących o efektywności przedsięwzięcia budowlanego, w mniejszym stopniu o efektywności działalności przedsiębiorstwa (Plebaniewicz 2010, Jaśkowski i Tomczak 2017).

O ile w procesie planowania przedsięwzięć jest znany zakres robót i jest możliwe dokonanie oszacowań czasu i kosztu poszczególnych procesów budowlanych, jak i całego przedsięwzięcia, to planowanie programu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego jest procesem ciągłym o dynamicznie zmieniającym się horyzoncie czasu planowania i zakresie robót. W zbiorze zleceń przedsiębiorstwa pojawiają się nowe roboty (obiekty) do wykonania. Większość nowych zadań ma charakter addytywny, tzn. jest niezależna pod względem kolej-

ności wykonania od realizowanych lub już przyjętych do realizacji, ponieważ realizacja poszczególnych obiektów jest autonomiczna (pod względem technicznym) od siebie. Jednak przy realizacji każdego z nich należy zachować niezbędne zależności technologiczno-organizacyjne.

Przedsiębiorstwo ma określoną zdolność produkcyjną, definiowaną jako *maksymalna wielkość możliwej do wytworzenia produkcji, odpowiadającej normom jakościowym lub jako maksymalna wielkość produkcji o określonej strukturze, którą przedsiębiorstwo powinno wykonać w pewnym czasie przy optymalnym wykorzystaniu środków produkcji i czynnika ludzkiego* (Jerzak 1976). O zdolności produkcyjnej przedsiębiorstwa budowlanego decydują jego zasoby (przede wszystkim stan wyposażenia w maszyny i urządzenia budowlane oraz poziom zatrudnienia i kwalifikacje pracowników) oraz struktura i kultura organizacji.

Zasoby przedsiębiorstwa budowlanego można podzielić na dwie grupy: zasoby jednorodne i niejednorodne. Zasobami jednorodnymi są np. pracownicy o jednakowych kwalifikacjach czy wyroby budowlane o określonych właściwościach fizycznych (Biernacki i Cyunel 1989), natomiast niejednorodnymi np. brygady robocze, zestawy maszyn. Zasoby mogą być podzielne lub niepodzielne. Zasób podzielny może być wykorzystywany jednocześnie przy realizacji wielu procesów. Ze względu na możliwość zamiany, można wyróżnić zasoby substytucyjne, które dzięki podobnym właściwościom mogą być stosowane zamiennie i niesubstytucyjne (Jaśkowski i in. 2014). Zasoby są często klasyfikowane również na odnawialne (czynne) i nieodnawialne (bierne). Zasoby odnawialne nie zużywają się w pojedynczych procesach budowlanych, a więc mogą być wykorzystywane wielokrotnie na jednym placu budowy bądź wielu budowach (Jaworski 1999). Na szczeblu pojedynczej budowy najczęściej mamy do czynienia ze zbiorem zasobów niejednorodnych i niepodzielnych (Biernacki i Cyunel 1989).

Analizy własnych zasobów pod względem ich stanu i dostępności oraz ich przydziału do poszczególnych zadań, a także konieczności pozyskania nowych ze źródeł zewnętrznych, przeprowadza się na każdym szczeblu zarządzania przedsiębiorstwem i przedsięwzięciem budowlanym. Podczas planowania budowy lub sporządzania planu produkcyjnego przedsiębiorstwa należy brać pod uwagę możliwość podzlecenia części lub całości robót, dzierżawę sprzętu czy wynajem maszyn budowlanych – pozyskiwanie zasobów z zewnątrz na zasadach rynkowych. Celem kadry zarządzającej przedsiębiorstwem budowlanym jest zapewnienie maksymalnego wykorzystania zasobów własnych, ale w warunkach rynkowych jest bardzo trudno zachować równowagę między zdolnością produkcyjną przedsiębiorstwa a realizowanym zbiorem zleceń (Shi i Halpin 2003). Równowaga ta może być osiągnięta np. poprzez właściwą strategię przetargową w celu pozyskiwania odpowiedniej liczby zleceń (Biruk i in. 2017) lub wynajmowanie własnych zasobów (brygad roboczych i maszyn budowlanych) innym przedsiębiorstwom.

Maksymalizację zysku przedsiębiorstwa osiąga się stosując zasadę gospodarności, która określa racjonalne sposoby przydziału ograniczonych środków między konkurencyjne cele (Paczkowski i Kaszyńska 1993). W celu racjonalnego zarządzania zasobami własnymi przedsiębiorstwa, w złożonych warunkach prowadzenia działalności gospodarczej, jest konieczne wdrożenie systemów komputerowych wspomagających podejmowanie optymalnych decyzji kierowniczych (Hejducki 2003, Kasprawicz 2002, Jaśkowski i Sobotka 2006). Zarządzanie rozdziałem zasobów w połączeniu z pozyskiwaniem odpowiedniej liczby zleceń jest jednym z głównych problemów planowania produkcji w przedsiębiorstwie budowlanym.

Harmonogram i budżet przedsięwzięcia mogą być analizowane z dwóch odrębnych punktów widzenia. Celem inwestora jest minimalizacja czasu i kosztów realizacji przedsięwzięcia, natomiast celem wykonawcy budowlanego (przedsiębiorstwa budowlanego) jest poszukiwanie takiego scenariusza działań (alokacji zasobów), aby całkowite koszty poniesione przez niego były jak najniższe (Sekunda 2001).

Marcinkowski (2002a) uważa, że na etapie planowania należy ustalić niezbędną liczbę zasobów kierowanych na fronty robót, aby poszczególne procesy lub zlecenia były realizowane w dyrektywnie określonych terminach. Rozproszenie ograniczonych zasobów na wiele placów budów powoduje wydłużenie cykli realizacji oraz zwiększenie kosztów przerzutu środków produkcji, również nadmierna koncentracja zasobów na pewnych budowach pociąga za sobą nieuzasadnione koszty i straty (Olędzka 1988). Wykonawca nie zawsze ma wpływ na uzgadnianie z inwestorem, dyrektywne terminy rozpoczęcia i zakończenia przedsięwzięć lub ich etapów oraz zwykle jest zobowiązany do zapłaty kar umownych za ich przekroczenie. W warunkach rynkowych istnieje zawsze luka pomiędzy zdolnością produkcyjną przedsiębiorstwa budowlanego a liczbą realizowanych zleceń. Istnieje konieczność dostosowywania potencjału wykonawczego przedsiębiorstwa do planowanego zbioru zleceń lub liczby i zakresu realizowanych robót do aktualnej zdolności produkcyjnej, w celu redukcji kosztów jego funkcjonowania i zwiększenia stopnia wykorzystania własnych zasobów.

Wymagania rynku jak również wysokie koszty pracy funkcjonowania dużych organizacji powodują zmiany w strukturach organizacyjnych przedsiębiorstw budowlanych. W ich wyniku organizacje ewoluują w kierunku modeli organicznych (Sobotka i in. 2000), elastycznych i mobilnych, a struktury ich przyjmują formę sieciową. Efektem tego jest obniżenie kosztów stałych przedsiębiorstwa. Negatywnym następstwem tego procesu może być brak zdolności realizacji dużych kontraktów własnym systemem wykonawczym. Zlecenie robót podwykonawcom może skutkować obniżeniem jakości robót i utrudnia zarządzanie procesem inwestycyjno-budowlanym ze względu na współpracę dużej liczby podmiotów gospodarczych połączonych, na czas wykonania zadań, stosunkami umownymi. Ograniczony poziom dostępności zasobów własnych uniemożliwia również realizację przedsięwzięcia w minimalnym czasie wyznaczonym na pod-

stawie analizy modelu sieciowego planowania budowy, bez uwzględnienia ograniczeń w ich dostępności. Wydłużanie czasu realizacji przedsięwzięcia oraz mały potencjał produkcyjny prowadzą do obniżenia pozycji przetargowej przedsiębiorstw wykonawczych.

Przedsiębiorstwo może osiągnąć sukces przy racjonalnym zaangażowaniu swoich zasobów w wykonanie zleconych zadań, które zapewnią mu nadwyżkę przychodów nad kosztami pracy własnego systemu roboczego, dostosowując się do wymagań rynku i stosując zasady zarządzania marketingowego (Jaśkowski 2008, Lidelów i Simu 2015). Czas realizacji przedsięwzięcia i jakość są w warunkach ostrej konkurencji na rynku jednym z czynników konkurencyjności.

Większość prac naukowych z zakresu optymalizacji wykorzystania zasobów przedsiębiorstw budowlanych dotyczy metod harmonogramowania pojedynczych przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem ograniczeń w dostępności zasobów. Zaprojektowanie optymalnego harmonogramu dla pojedynczego obiektu (np. z minimalnym cyklem budowy) i jego realizacja zgodnie z planem nie gwarantuje efektywności funkcjonowania całego przedsiębiorstwa budowlanego (Marcinkowski 2005), ale może decydować o możliwości przystąpienia do realizacji kolejnego zlecenia w krótkim horyzoncie czasu. Analiza wykresów zatrudnienia brygad roboczych (wykresów sprawdzających dla wszystkich grup pracowników) zaangażowanych do realizacji pojedynczego przedsięwzięcia pozwala ocenić, czy planowane terminy rozpoczynania procesów budowlanych zostały określone prawidłowo. Dążenie do maksymalnego wyrównania harmonogramów zatrudnienia i zapotrzebowania na poszczególne rodzaje środków produkcji może jednak prowadzić do zwiększenia kosztów realizacji przedsięwzięcia budowlanego (Jaworski 2000).

Na konieczność bilansowania środków produkcji przedsiębiorstwa budowlanego realizującego wiele zleceń w określonym horyzoncie planowania zwrócił uwagę również Smaga (1992). Plan produkcyjny przedsiębiorstwa budowlanego jest opracowywany na podstawie zbioru zleceń przyjętych do realizacji. Celem sporządzania planów produkcyjnych przedsiębiorstwa jest harmonizacja robót prowadzonych na wszystkich placach budów. Są one podstawą opracowania planów zapotrzebowania na wyroby budowlane, pracy sprzętu, zatrudnienia i planów finansowych. Plany takie są najczęściej opracowywane okresowo, a w każdym z nich plan ten jest modyfikowany ze względu na pojawiające się nowe zlecenia. Losowy charakter produkcji budowlanej może powodować konieczność doraźnej ich aktualizacji.

Czas realizacji przedsięwzięcia i skuteczność metod jego predykcji rzadko bywa tematem badań w Polsce. Dane dotyczące wielkości wydłużenia lub skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć nie są powszechnie dostępne, co znacznie utrudnia oszacowanie ryzyka czasu i kosztu planowanych przedsięwzięć (Czarnigowska i Sobotka 2010).

Program produkcyjny ma na celu przede wszystkim zapewnienie ciągłości pracy zasobów czynnych przy jednoczesnym zapewnieniu terminowej realizacji

robót. W wielu przypadkach cele te są sprzeczne ze sobą. Niewiele jest prac dotyczących sporządzania planów produkcyjnych i harmonizacji zasobów systemu roboczego przedsiębiorstwa budowlanego. Marcinkowski (2005) przedstawił w sposób ogólny metodykę opracowywania planów produkcyjnych przedsiębiorstwa budowlanego oraz koncepcję implementacji praktycznej w programach do zarządzania przedsięwzięciami, w której harmonogramy produkcyjne są oceniane za pomocą ważonego kosztu przestoju środków produkcji oraz wskaźnika oceny harmonizacji prac. Ze względu na stopień trudności zagadnienia i złożoność obliczeniową problemu, w większości przypadków nie można ustalić optymalnego programu produkcyjnego, a programy komputerowe do planowania i kontroli realizacji przedsięwzięć nie są dostosowane do harmonogramowania zasobów.

W procesie planowania kolejnego przedsięwzięcia budowlanego (nowego zlecenia w programie produkcji przedsiębiorstwa) pojawia się również problem określenia struktury organizacyjnej powstającego, tymczasowego podmiotu przeznaczonego do jego realizacji. Jest on tworzony z części zasobów istniejącej struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa budowlanego oraz ewentualnie ze współpracujących podwykonawców. W procesie planowania dąży się do takiej alokacji zasobów, aby zachować podstawowy układ struktury organizacyjnej wykonawcy, co może prowadzić do niewykorzystania części potencjału produkcyjnego większych jednostek i w konsekwencji do wydłużenia czasu realizacji zlecenia. Harmonogram przedsięwzięcia jest zatem kompromisem między sprawnością wykonania przedsięwzięcia a nienaruszalnością struktur organizacyjnych przedsiębiorstwa (Marcinkowski 1996).

Podatność planów produkcyjnych na dezaktualizację powoduje, że te o krótszym okresie planowania powinny zapewniać wyższy stopień harmonizacji robót, przede wszystkim wysoki stopień wykorzystania potencjału wykonawczego przedsiębiorstwa budowlanego, a plany długoterminowe mogą dopuszczać nieciągłości w pracy brygad roboczych (Marcinkowski 2005). Koncepcja Marcinkowskiego jest zgodna z zasadami „odchudzonego” zarządzania w budownictwie (ang. *lean construction*). W przedsiębiorstwie budowlanym jest opracowywany harmonogram ogólny budowy, który jest uszczegółowiany i uaktualniany w trakcie realizacji budowy. Szczegółowe planowanie powinno obejmować okres od 2 do kilku tygodni i powinno być procesem cyklicznym. Zapewnia to przede wszystkim równomierność wykorzystania zasobów i redukuje stopień niepewności przy realizacji procesów budowlanych. Harmonogramy te są niezbędne nie tylko do zarządzania pracą brygad roboczych, ale są także wykorzystywane przez inspektorów nadzoru i dostawców wyrobów budowlanych. Są one ustalane na cotygodniowych naradach organizowanych przez kierownika budowy (Rowiński 1982, Ballard 1997). Na naradach ustala się przede wszystkim stopień realizacji rozpoczętych procesów, definiuje dostępne zasoby oraz – na podstawie oceny stopnia osiągnięcia celu przedsięwzięcia –

wybiera się procesy kierowane do realizacji. Wynikiem analiz jest rozdział zasobów i projektowany, zaktualizowany harmonogram budowy (Howell 1999).

Sporządzanie planu produkcyjnego można przedstawić jako ciąg decyzji dotyczących alokacji zasobów w celu uzyskania maksymalnego efektu (Olędzka 1988, Knauff i Olędzka 1999), np. zdyskontowanego zysku wykonawcy czy minimalizacji opóźnień w oddawaniu do użytkowania obiektów budowlanych. Jednocześnie często zakłada się, że ograniczone zasoby wykonawcy nie pozwalają na realizację wszystkich zleceń, a ich alokacji dokonuje się w terminach rozpoczynania i ukończenia procesów (zwalniania zasobów odnawialnych) z zachowaniem ograniczeń kolejnościowych wynikających z organizacji i technologii przedsięwzięć budowlanych (Háp i Cais 1997).

W przypadku, gdy znany jest plan produkcyjny (zakres robót) i można założyć, że jest on niezmienny, wówczas problem optymalizacji planu można przedstawić jako (Jaworski 1999):

- zagadnienie szeregowania zadań, zwane także zagadnieniem kolejnościowym, gdy liczba zasobów odnawialnych tego samego typu jest równa 1,
- zagadnienie rozdziału zadań do równoległego wykonania, gdy liczba zasobów jest większa niż liczba obiektów (działek roboczych),
- zagadnienie rozdziału zasobów w przypadku, gdy liczba zasobów jednego typu jest mniejsza niż liczba obiektów (lub działek roboczych), a prace mogą być równolegle prowadzone na maksymalnej liczbie obiektów równej liczbie zasobów tego samego rodzaju.

Knauff i Olędzka (1999) przedstawiły problem określania wielkości „frontu inwestycyjnego” przedsiębiorstwa budowlanego, który należy w warunkach gospodarki rynkowej interpretować jako program produkcyjny, w formie modelu programowania dynamicznego. Przy ocenie różnych wariantów programu produkcyjnego stosowano trzy kryteria: zysk wykonawcy, stopień niewykorzystania zasobów i liczba procesów realizowanych równolegle (wielkość frontu inwestycyjnego), przy dążeniu do maksymalizacji kryterium pierwszego i przy jednoczesnej minimalizacji dwóch pozostałych.

W pracy Olędzkiej (1988) są rozpatrywane dwa problemy:

- sporządzenie planu realizacji zadań w przypadku, gdy posiadane zasoby pozwalają na podjęcie kolejnych zleceń przy jednoczesnym kontynuowaniu rozpoczętych,
- aktualizacji istniejącego planu realizacji zleceń na skutek zmian w ograniczeniach, gdy dopuszcza się możliwość wstrzymania realizacji niektórych z nich.

W obu przypadkach założono, że procesy są jednorodne i wykonywane przez specjalizowane brygady. Proponowana w pracy metoda sporządzania planu produkcyjnego może być uogólniona na procesy niejednorodne, poprzez podział procesu na procesy jednorodne i wprowadzenie zależności kolejnościowych między nimi.

W prezentowanych modelach przez Olędzką (1988) oraz Knauff i Olędzką (1999) nie jest rozpatrywany problem zlecenia robót podwykonawcom, zwiększenia potencjału własnego wykonawcy oraz nie uwzględniono kosztów „przerzutów” brygad na różne place budów.

Problem harmonogramowania pracy zasobów przedsiębiorstwa budowlanego polega zatem na optymalnym przydziale zasobów do realizacji procesów wykonywanych w ramach niezależnych inwestycji. Zasoby te są zwykle organizowane w większe jednostki – zespoły lub brygady robocze czy zestawy maszyn (często o składzie niezmiennym lub dobieranym w sposób optymalny). Głównym kryterium optymalizacji są koszty ponoszone przez wykonawcę. Są to koszty stałe, które wykonawca ponosi nawet wtedy, gdy zasób jest niewykorzystywany, oraz obciążenia finansowe dodatkowe, wynikające z konieczności przeniesienia zasobów na różne place budowy (np. demontaż, transport i montaż oraz przebrojenie sprzętu budowlanego). Sekunda (2001) opracował model harmonogramowania wieloobektowych przedsięwzięć realizowanych metodami potokowymi zapewniający uzyskanie przez wykonawcę maksymalnego zysku (i minimalizację kosztów). Model łączy zagadnienie projektowania składu brygad roboczych, problem kolejności zajmowania działek roboczych oraz dostępności zasobów, przy czym założono, że znany jest cały zakres robót na wszystkich placach budów. W rzeczywistości, w planowanym okresie mogą pojawić się dodatkowe zlecenia w zbiorze zleceń przedsiębiorstwa i opracowany harmonogram ulega dezaktualizacji.

Podobny model został opracowany przez Lenkiewicza i Olędzką (1994) w celu ustalenia liczebności załogi pracującej na budowie przy ustalonym kryterium optymalizacji, np. minimum czasu wykonania robót, minimum kosztów robocizny bezpośredniej lub maksymalnego zysku wykonawcy. W pracy proponowano zastosowanie tych kryteriów jednocześnie oraz sposób wyznaczenia zbioru rozwiązań niezdominowanych dla problemów przydziału ograniczonej liczby wykonawców jednej specjalności zawodowej lub kilku do wykonywania pojedynczej roboty lub grupy robót realizowanych w przyjętym horyzoncie planowania. Problemy te opisano modelami programowania dynamicznego.

Dopuszczalne warianty planów produkcyjnych przedsiębiorstwa budowlanego z uwzględnieniem zmian kolejności realizacji obiektów i ograniczeń w poziomie dostępności potencjału wykonawczego mogą być generowane z wykorzystaniem metody symulacji cyfrowej. W pracy Winklera i Sławeckiego (1988) zbiór wygenerowanych harmonogramów był oceniany na podstawie kryterium czasu lub stopnia wykorzystania zasobów odnawialnych, co w konsekwencji, ze względu na brak możliwości oceny wszystkich rozwiązań dopuszczalnych, pozwoliło jedynie na znalezienie rozwiązania suboptymalnego. W pracy nie uwzględniono problemu związanego z ewentualnymi kosztownymi „przerzutami” zasobów z jednego placu budowy na drugi.

Analizując nieliczne publikacje z zakresu optymalizacji wykorzystania zasobów przedsiębiorstwa budowlanego można sformułować następujące wnioski:

1. Optymalizacja wykorzystania zasobów przedsiębiorstwa do realizacji pojedynczych przedsięwzięć nie gwarantuje uzyskania optymalnego harmonogramu realizacji wszystkich zleceń przedsiębiorstwa oraz optymalizacji wykorzystania zasobów w skali całego przedsiębiorstwa (w ujęciu holistycznym).
2. Program produkcji przedsiębiorstwa budowlanego – ze względu na funkcjonowanie na rynku konkurencyjnym – nie może być określony w sposób deterministyczny. Dokładność prognoz w zakresie określenia liczby i wielkości zleceń maleje wraz z wydłużaniem horyzontu czasu.
3. Nawet przy ustalonym zbiorze zleceń przedsiębiorstwa realizacja poszczególnych zadań przebiega w warunkach ryzyka i niepewności, co wpływa na efektywność wykorzystania zasobów własnych przedsiębiorstwa.
4. Opracowywane modele i metody alokacji zasobów, określania planu produkcji czy potencjału produkcyjnego powinny uwzględniać charakterystyczne dla budownictwa warunki realizacji (ryzyko czasu, koszty przerzutu sił i środków, brygadowy system pracy, przetargowy system pozyskiwania zleceń itp.).

2. Analiza ryzyka w procesie budowlanym

Proces budowy nie jest pozbawiony ryzyka. Ryzykiem można zarządzać, można je minimalizować, współdzielić, transferować lub akceptować. Nie może być jednak ignorowane (Taroun i in. 2011). Budownictwo jest narażone na oddziaływanie czynników ryzyka i niepewność bardziej niż inne działy gospodarki narodowej (Flanagan i Norman 1993). Duża liczba uczestników procesu inwestycyjno-budowlanego, długie cykle realizacji i zmienne fronty robót zwiększają siłę oddziaływania czynników środowiska zewnętrznego na realizację procesów budowlanych. Im przedsięwzięcie jest bardziej złożone i im dłużej jest ono realizowane, tym większy jest wpływ czynników ryzyka, ponieważ trudniej jest ocenić prawdopodobieństwo ich wystąpienia i przewidzieć skutki ich oddziaływania (Zou i in. 2007).

Analiza ryzyka jest procesem polegającym na ocenie (oszacowaniu) wartości czynników wpływających na skutki decyzji podejmowanej w warunkach ryzyka. Ryzyko jest tożsame z możliwością wystąpienia niepożądanego rezultatu (straty) i jest często określane na podstawie oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia wywołującego go zdarzenia w rozważanym okresie (Edwards i Bowen 2000). Zarządzanie ryzykiem obejmuje, oprócz analizy i oceny ryzyka, także projektowanie i wdrażanie zmian (usprawnień), wpływających na siłę oddziaływania i prawdopodobieństwo wystąpienia niekorzystnych zdarzeń, w celu zmniejszenia lub utrzymania ryzyka na założonym poziomie. Ocena ryzyka jest procesem ustalania profilu ryzyka z uwzględnieniem zmienności oddziaływania czynników ryzyka. Profil ryzyka w sposób jednoznaczny opisuje funkcja gęstości (lub dystrybuanta) rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia różnych wartości czasu lub kosztu realizacji przedsięwzięcia, ewentualnie innych parametrów, które są stosowane przy pomiarze wielkości straty.

Na każdym etapie zarządzania ryzykiem jest istotne dokładne i jednoznaczne ustalenie zbioru czynników ryzyka odpowiadających specyfice i rozmiarom konkretnego przedsięwzięcia budowlanego (Dziadosz 2009). Istnieje wiele źródeł ryzyka w działalności inwestycyjno-budowlanej. Mają one charakter techniczny, organizacyjny, ekonomiczny, polityczny, finansowy i prawny. Negatywnie na przebieg realizacji może oddziaływać zarówno otoczenie bliższe jak i dalsze, ale również źródłem zjawisk niekorzystnych są czynniki wewnętrzne, charakteryzujące dane przedsięwzięcie. Podczas realizacji każdego przedsięwzięcia należy poddać szczegółowej analizie czynniki mogące wpływać na przebieg jego realizacji. Identyfikację czynników ryzyka ułatwia analiza dokumentacji oraz bezpośrednie obserwacje przebiegu realizacji przedsięwzięć o podobnym charakterze (Rybka i in. 2014). Należy postępować zgodnie z prawem Pareto i skupić uwagę na zarządzaniu tymi, których przewidywany wpływ jest znaczący. Dytczak i in. (2011) przedstawiają możliwość zastosowania metody *DEMATEL* do identyfikacji przyczyn opóźnień realizacji złożonych przedsięwzięć budowlanych.

Ranking czynników na podstawie wartości wskaźnika ważności pozwala analizować subiektywne opinie ekspertów (uzyskane np. w wyniku ankietyzacji czy również informacje uzyskane bezpośrednio na placach budów), dotyczące wpływu (siły oddziaływania) czynników ryzyka na różne mierniki pracy i częstotliwości ich występowania (prawdopodobieństwa wystąpienia). Opinie są najczęściej wyrażane w skali punktowej lub opisowej. Wskaźnik ważności jest obliczany jako iloczyn siły oddziaływania i częstotliwości występowania. Ranking ważności czynników, dokonany na podstawie wartości wskaźników, jest podstawą do planowania strategii reakcji na ryzyko. Ranking czynników dostarcza informacji o najbardziej istotnych przyczynach zakłóceń i umożliwia formułowane hipotez wyjaśniających prawdopodobne źródła odchyień (Li 2009).

Badania ankietowe czynników ryzyka przeprowadzono m.in. w Indonezji (Andi 2006), Kuwejcie (Kartam i Kartam 2001), Malezji (Kadir i in. 2005), Strefie Gazy (Enshassi in. 2007), Republice Południowej Afryki (Mbachu i Nkado 2007), Zjednoczonych Emiratach Arabskich (Faridi i El-Sayegh 2006), Arabii Saudyjskiej (Al-Khalil i Al-Ghafly 1999), Libanie (Mezher i Tawil 1994), Ghanie (Frimpong i Oluwoye 2003).

W Polsce badania ankietowe, mające na celu identyfikację czynników ryzyka w przedsięwzięciach budowlanych, prowadził Skorupka (2008b). Wyodrębnił on listę potencjalnych ryzyk występujących na różnych etapach procesu inwestycyjnego: projekt wstępny, przetarg, projekt wykonawczy, prace budowlane i rozliczenie płatności. W ankiecie zostały zamieszczone pytania dotyczące częstotliwości występowania zakłóceń (zależnych od rodzaju ryzyka w poszczególnych etapach przedsięwzięcia budowlanego) oraz ich wpływu, określanego na podstawie 5 progów zagrożenia dla procesu budowlanego, przyjmowanych jako: bardzo niski, niski, średni, wysoki i bardzo wysoki. Badania przeprowadzono na próbie 78 małych przedsiębiorstw budowlanych. Czynniki najbardziej istotnymi w poszczególnych grupach były: ryzyko źle rozpoznanej konkurencji (średni poziom zagrożenia), ryzyko korupcji (wysoki poziom zagrożenia), ryzyko złego doboru zespołu projektantów (średni poziom zagrożenia), ryzyko protestów (bardzo wysoki poziom zagrożenia) oraz ryzyko wiarygodności zleceniodawcy (wysoki poziom zagrożenia). Należy zwrócić uwagę, że wszystkie ryzyka związane z realizacją robót budowlanych miały średni i wysoki stopień zagrożenia. Są to między innymi: ryzyka źle rozpoznanej struktury gruntu, awarii sprzętu, absencji pracowników, niskich kwalifikacji pracowników, złego zarządzania zasobami materiałowymi, eksploatacyjnymi i ludzkimi, braku terminowości dostarczania wyrobów budowlanych i eksploatacyjnych, złej jakości materiałów budowlanych, złej jakości robót, rozszerzenia zakresu prac oraz złej organizacji prac. Skorupka (2008a) zwrócił uwagę, że przy ocenie ryzyka należy uwzględnić czynniki charakterystyczne dla danego przedsięwzięcia np. możliwość wystąpienia protestów ekologów czy trudność transportu dużych elementów konstrukcji. Mimo, że mogą one występować sporadycznie, to ich wpływ na czas realizacji może być istotny. Na nieprzestrzeganie zasad BHP i wynikające z tego

wypadki na budowie, jako jedną z ważnych przyczyn opóźnień robót budowlanych, wskazuje Hoła (2008). Opóźnienia w realizacji przedsięwzięć budowlanych mogą być także spowodowane zmianami istniejących bądź wprowadzeniem nowych regulacji prawnych (Rybka i Bondar-Nowakowska 2017).

W celu identyfikacji źródeł ryzyka czasu i najważniejszych czynników, które mogą wpływać na czas realizacji procesów budowlanych w warunkach polskich, badania ankietowe prowadzone były przez Jaśkowskiego i Biruka w ramach projektu badawczego „Projektowanie odpornych harmonogramów budowlanych w oparciu o wieloatrybutową ocenę warunków realizacyjnych” (Jaśkowski i Biruk 2011). Na podstawie badań literaturowych oraz wywiadów bezpośrednich z różnymi uczestnikami procesu inwestycyjnego w budownictwie opracowano listę pytań obejmującą zestaw 63 czynników ryzyka. Wartości wskaźników ważności czynników obliczono jako iloczyn wartości średnich z udzielonych ocen siły oddziaływania i częstotliwości występowania. Wyniki dla 22 czynników o średniej wartości wskaźnika co najmniej równej 8 przedstawiono w tabeli 2.1. Czynniki uszeregowano według średniej wartości wskaźnika ważności od najmniej do najbardziej istotnego. Zauważono, że nie istnieje niewielka liczebnie grupa czynników ryzyka o znaczącym wpływie na czas realizacji przedsięwzięcia (nie obowiązuje również w tym zakresie zasada Pareto). Ocena ryzyka czasu realizacji przedsięwzięcia nie może być zatem ograniczona tylko do analizy oddziaływania czynników najważniejszych, co zwiększa stopień trudności oceny wpływu warunków ryzyka na czas realizacji i koszt procesów budowlanych.

Rivas i in. (2011) przeprowadzili badania czynników ryzyka w Chile na 47 osobowej próbie pracowników nadzoru technicznego średniego i niskiego szczebla. Według badanych przez nich respondentów przyczynami wspólnymi opóźnień procesów budowlanych dla wszystkich przedsięwzięć są: opóźnienia w dostawach wyrobów budowlanych, niewystarczające wyposażenia pracowników w narzędzia i sprzęt oraz niewłaściwe zarządzanie operatywne budową. Pozostałe przyczyny zależą od specyfiki realizowanego przedsięwzięcia. Są to te same przyczyny, na jakie wskazują analizy badań przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych w latach 70-tych ubiegłego wieku (Garner i in. 1979), jak i w czasach obecnych (Dai i in. 2009).

Listy krytycznych czynników, wpływające na poszczególne mierniki wyników, są w wielu badaniach odmienne. Jedną z przyczyn tych różnic są na pewno inne warunki realizacji przedsięwzięć występujące w różnych krajach, ale także brak zgodności w zakresie stosowanych definicji i pojęć. Prezentowane wartości ważności poszczególnych czynników, określanych najczęściej jako iloczyn częstości występowania i siły ich oddziaływania w przypadku zaistnienia niekorzystnego zjawiska, są różne w różnych krajach i badaniach. Można jednak zauważyć pewne podobieństwa w przypadku państw o podobnym poziomie rozwoju (Toor i Ogunlana 2008).

Tab. 2.1. Ranking 22 najważniejszych czynników ryzyka ze względu na wartość wskaźnika ważności (wyniki badań ankietowych)

Lp.	Czynnik ryzyka	Wartość średnia wskaźnika ważności (skala ocen 1–25)	Odchylenie standardowe
1	Realizacja robót w okresie zimowym – roboty zewnętrzne i stan surowy	11,89	4,363
2	Opady atmosferyczne – roboty zewnętrzne i stan surowy	11,29	4,166
3	Nieterminowe przekazywanie frontów robót	10,91	5,090
4	Trudność w pozyskaniu kwalifikowanych pracowników	10,33	5,394
5	Błędy w dokumentacji technicznej	10,20	4,564
6	Opóźnienia inwestora w podejmowaniu decyzji	10,13	4,981
7	Rozszerzenie zakresu / ilości robót na skutek zmian projektowych	10,01	5,400
8	Niemotywacyjny system płac	9,91	5,370
9	Zmiany wymagań inwestora	9,89	4,791
10	Trudność w pozyskaniu specjalizowanych brygad / podwykonawców	9,49	5,005
11	Opóźnienia w wykonywaniu projektów wykonawczych (w przypadku dokumentacji etapowej)	9,30	4,420
12	Brak doświadczenia, nierzetelność podwykonawców (błędny wybór podwykonawcy)	9,23	4,297
13	Nieterminowe płatności na rzecz generalnego wykonawcy	8,96	4,577
14	Wydłużenie czasu dostawy materiałów budowlanych	8,90	5,273
15	Konieczność wykonywania prac poprawkowych	8,71	3,787
16	Nieskuteczne kierowanie operatywne budową	8,59	4,544
17	Zbyt mały plac budowy utrudniający składowanie materiałów budowlanych lub transport pionowy	8,51	4,254

18	Utrata płynności finansowej wykonawcy	8,47	4,217
19	Nieskuteczna koordynacja pracami podwykonawców	8,46	4,029
20	Nierozpoznane warunki gruntowe zmieniające zakres i rodzaj robót fundamentowych	8,29	3,862
21	Brak kar umownych/nagród za terminowość	8,02	5,252
22	Wysoka fluktuacja kadr ze względu na niskie stawki robocizny i złe warunki pracy	8,00	3,981

Analiza stanu badań w zakresie identyfikacji czynników ryzyka pozwala na wyłonienie następujących wniosków:

1. Niezależnie od miernika, stosowanego do opisu sprawności czy efektywności realizacji przedsięwzięć i procesów budowlanych, liczba czynników wpływających na jego wartość jest duża. W literaturze brak jest zgodności w zakresie identyfikacji czynników najbardziej istotnych. Fakt ten potwierdzono również w pracach Chan i in. (2004), Fortune i White (2006), Li (2009) i Korde i in. (2005).
2. Różne określenia są stosowane do opisu tych samych czynników, ale również taka sama terminologia jest używana do opisu różnych czynników.
3. Zakres wielu badań jest ograniczony jedynie do identyfikacji czynników, bez analizy ich możliwych stanów (wartości zmiennych niezależnych) i wskazania podstaw do dokonywania ocen.
4. W przypadku dokonywania ilościowej oceny ważności czynników (np. na podstawie częstości ich występowania i siły oddziaływania) oraz przy opisie ich stanów są stosowane skale punktowe o różnym zakresie. Dane niezbędne do oceny zazwyczaj nie odpowiadają informacjom gromadzonym w procesie zarządzania (w tym kontroli) realizacją produkcji budowlanej.

3. Modelowanie przedsięwzięć budowlanych

3.1. Klasyczne metody planowania przedsięwzięć budowlanych

Przedsięwzięcie budowlane to spójne działania obejmujące przygotowanie, realizację robót budowlanych (budowy, przebudowy, montażu, remontu lub rozbiórki), odbiór i przekazanie do eksploatacji obiektów budowlanych (Kasprowicz 2002). Z uwagi na odmienny sposób modelowania struktury organizacyjnej przedsięwzięć budowlanych, klasyfikuje się je na dwa podstawowe rodzaje: przedsięwzięcia typu kompleks operacji i przedsięwzięcia, które mogą być zorganizowane potokowymi metodami organizacji pracy (Jaworski 1999). Przedsięwzięcia typu kompleks operacji obejmują niejednorodny pod względem technologicznym procesy, które nie charakteryzują się cyklicznością i rytmicznością realizacji.

W metodach potokowych te same brygady robocze (w niezmiennym składzie) wykonują procesy budowlane na kolejnych obiektach lub ich częściach (działkach roboczych) w tej samej kolejności (cyklicznie, równomiernie i równolegle). Następny proces może być rozpoczęty po zakończeniu pracy poprzedniej brygady na danym obiekcie lub działce roboczej. Zasady projektowania realizacji przedsięwzięć zgodnie z metodą pracy równomiernej – klasyczną wersją metody potokowej – przedstawił w Polsce Dyżewski (1965), a następnie rozwijał Rowiński (1982). Mrozowicz (1997) i Hejducki (2000) zaproponowali klasyfikację potokowych metod organizacji ze względu na występujące sprzężenia czasowe i opracowali dla nich algorytmy szeregowania działek roboczych. W literaturze angielskojęzycznej nie jest stosowana spójna klasyfikacja oraz nomenklatura metod potokowych. Przy harmonogramowaniu procesów powtarzalnych stosuje się metodę *LOB – Line of Balance* oraz jej rozwinięcia: *Linear Scheduling Method (LSM)* (Johnston 1981), *Productivity Scheduling Method (PSM)* (Lucko 2008), *Vertical Production Method (VPM)* (O'Brien 1975), *Repetitive Scheduling Method (RSM)* (Harris i Ioannou 1998), *Horizontal and Vertical Logic Scheduling (HVLS)* – Thabet i Beliveau (1994a). Bazują one na modelowaniu graficznym, metodach optymalizacyjnych, a przede wszystkim na analizie zależności pomiędzy pracą brygad na różnych działkach roboczych.

Harris i Ioannou (1998) na podstawie analizy sprzężeń pomiędzy procesami realizowanymi na kolejnych działkach roboczych ustalili ciąg procesów (ang. *controlling sequence*) wpływający na termin realizacji całego przedsięwzięcia, który ma takie samo znaczenie praktyczne jak ścieżka krytyczna w metodzie *CPM*.

W przypadku modelowania przedsięwzięcia typu kompleks operacji wykorzystuje się modele sieciowe dwu- i jednopunktowe. W metodzie *CPM* i *PERT* były wykorzystywane sieci dwupunktowe. W sieciach zdarzeń, sporządzanych techniką dwupunktową, wierzchołki modelu (węzły) odwzorowują zdarzenia (rozpoczęcie i zakończenie), natomiast łuki (krawędzie) – procesy.

Za pomocą sieci sporządzonej w konwencji wierzchołkowej (sieć jednopunktowa) uwarunkowania technologiczne i organizacyjne przedsięwzięcia budowlanego (relacje kolejnościowe pomiędzy procesami budowlanymi) można opisać za pomocą unigrafu $G = \langle V, E \rangle$ skierowanego, spójnego i acyklicznego, z jednym wierzchołkiem początkowym i jednym końcowym, w którym $V = \{1, 2, \dots, n\}$ jest zbiorem procesów budowlanych (czynności w sieci), $E \subset V \times V$ dwuargumentową relacją opisującą zależności kolejnościowe pomiędzy procesami. Funkcja $T: V \rightarrow R^+$ przyporządkowuje procesom $i \in V$ czas ich wykonania t_i .

W warunkach deterministycznych przy założeniu pełnej dostępności zasobów (zasoby nie decydują o kolejności wykonywania procesów) jest najczęściej wykorzystywana metoda ścieżki krytycznej *CPM* (*Critical Path Method*). Pozwala ona jedynie na ustalenie najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczynania procesów, zapasu czasu na ich wykonanie i określenie najdłuższej (pod względem czasu realizacji) drogi w sieci, która decyduje o czasie wykonania przedsięwzięcia. W warunkach losowych przy pełnej dostępności zasobów zakłada się, że czasy realizacji procesów są zmiennymi losowymi o znanych rozkładach. Najpopularniejszą metodą analizy przedsięwzięć w takim wypadku jest metoda *PERT* (*Program Evaluation and Review Technique*).

Metoda planowania sieciowego *PERT* została opracowana w 1958 r. i od tego czasu jest powszechnie stosowanym narzędziem wspomagającym planowanie przedsięwzięć budowlanych w warunkach losowych. Jej popularność wynika z tego, że przyjęte założenia umożliwiły uproszczenie analizy modeli sieciowych dla warunków niedeterministycznych. Drugą zaletą metody jest prosty sposób estymacji parametrów zmiennych losowych czasu realizacji procesów budowlanych, bazujący zazwyczaj na doświadczeniu uczestników przedsięwzięć (ekspertów). W metodzie *PERT* przyjęto, że czas realizacji przedsięwzięcia jest zmienną losową o rozkładzie normalnym, jako suma niezależnych zmiennych losowych czasu realizacji procesów krytycznych o rozkładzie *PERT-beta*. Założenie to bazuje na centralnym twierdzeniu granicznym (twierdzenie Lindeberga-Fellera): jeżeli $E(T_1), E(T_2), \dots, E(T_n)$ są wartościami oczekiwanymi, a $D^2(T_1), D^2(T_2), \dots, D^2(T_n)$ wariancjami zmiennych losowych T_1, T_2, \dots, T_n o różnych rozkładach prawdopodobieństwa f_1, f_2, \dots, f_n , to rozkład zmiennej losowej $T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$ dąży przy $n \rightarrow \infty$ do rozkładu normalnego o wartości oczekiwanej: $E(T) = E(T_1) + E(T_2) + \dots + E(T_n)$ i wariancji: $D^2(T) = D^2(T_1) + D^2(T_2) + \dots + D^2(T_n)$.

W praktyce dobre przybliżenie rzeczywistego rozkładu terminu końcowego przedsięwzięcia do teoretycznego rozkładu normalnego można uzyskać, gdy ścieżkę krytyczną tworzy ponad 30 procesów, w ostateczności 20 lub nawet 10.

Dokładność oszacowania terminu zakończenia realizacji przedsięwzięcia w dużej mierze zależy będzie od liczby procesów krytycznych, a także od podobieństw rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych czasu realizacji procesów należących do ścieżki krytycznej.

Założenie o typie rozkładu czasu realizacji całego przedsięwzięcia jest prawdziwe w przypadku niezależności sumowanych zmiennych losowych i pod warunkiem, że termin rozpoczęcia dowolnego procesu następuje w momencie zakończenia dokładnie jednego procesu poprzedzającego. W konsekwencji nie uwzględnia się wpływu dróg zbiegających się w węzłach sieci – o terminie zaistnienia zdarzenia decyduje droga dochodząca do węzła złożona z procesów (czynności modelu sieciowego) należących do ścieżki o największej sumie wartości oczekiwanej czasu realizacji procesów, a pomijane są drogi pozostałe. Wpływ tych dróg może być duży, szczególnie w przypadku, gdy ich długości nie różnią się istotnie od drogi najdłuższej (dla wartości średnich czasów), a wariancje ich zmiennych losowych są większe od wariancji czasu dla drogi uwzględnianej w obliczeniach. Termin wyznaczony w sposób dokładny może być nawet o 25% dłuższy od obliczonego zgodnie z metodą *PERT* (Jaworski 1999).

Analiza sieci *PERT* polega na ustaleniu dystrybuanty terminów zaistnienia zdarzeń w sieci (przede wszystkim zdarzenia oznaczającego moment zakończenia realizacji całego przedsięwzięcia) w postaci formuły matematycznej. W warunkach losowych trudno jest ustalić dystrybuantę zakończenia czasu przedsięwzięcia ze względu na to, że drogi w sieci mogą być ze sobą skorelowane oraz ze względu na problem ustalenia dystrybuanty rozkładu czasu będącego wartością maksymalną zmiennych losowych czasu realizacji procesów dochodzących do tego węzła. Korelacja między zmiennymi losowymi wynika z prostego faktu, że procesy tego samego rodzaju mogą należeć do różnych dróg w sieci oraz że na różne procesy budowlane mogą oddziaływać te same czynniki ryzyka. W metodzie *PERT* zagadnienia te nie są uwzględnione.

Dystrybuantę rozkładu czasu realizacji przedsięwzięcia określa się stosując trzy podejścia:

1. Poszukiwanie rozwiązań dokładnych (np. Hagstrom 1990, Milian 2010). Ze względu na przyjęte założenia upraszczające; np. że zmienne losowe są dyskretne lub funkcja ich gęstości jest wielomianem, podejście to ma ograniczone zastosowanie w praktyce.
2. Zastosowanie analitycznych metod aproksymujących dystrybuantę rozkładu i jej momenty (np. Kamburowski 1985, Kleindorfer 1971).
3. Zastosowanie metod symulacyjnych; np. Burt i Garman (1971).

Przy planowaniu przedsięwzięć oprócz ograniczeń kolejnościowych należy brać także pod uwagę: terminy dyrektywne ustalone dla etapów przedsięwzięcia lub poszczególnych procesów.

Skutkiem przyjętego założenia w metodzie *PERT*, że procesy muszą rozpoczynać się zaraz po zakończeniu poprzedników, jest brak możliwości uwzględ-

niania innych strategii rozpoczynania procesów. Nie można na przykład ująć w modelu ograniczenia, że proces nie może rozpocząć się wcześniej od ustalonego terminu (jeśli jego zapas czasu jest niezerowy). W praktyce często termin rozpoczęcia procesu jest uzgadniany z kooperantami, np. moment dostarczenia na plac budowy specjalistycznych maszyn budowlanych czy montażu wyposażenia technologicznego przez specjalizowanych podwykonawców.

Obecnie przy projektowaniu realizacji przedsięwzięć w warunkach losowych można wyróżnić dwa kierunki praktyczne: projektowanie harmonogramów odpornych na wystąpienie nieprzewidzianych zakłóceń, mogących wystąpić w trakcie realizacji, oraz podejście reaktywne, które zakłada w przypadku dezaktualizacji harmonogramu podjęcie działań naprawczych, których zakres jest ustalany na podstawie informacji uzyskiwanych w trakcie realizacji przedsięwzięcia (Janczura i Kuchta 2012). Podejście zmierzające do opracowania harmonogramów odpornych na zakłócenia (stabilnych), określane mianem proaktywnego, jest oceniane w literaturze przedmiotu jako bardziej efektywne od postępowania reaktywnego, polegającego na aktualizacji harmonogramów.

Koncepcja łańcuchów krytycznych Goldratta (1997) jest jedną z pierwszych metod projektowania harmonogramów odpornych, w której termin zakończenia przedsięwzięcia jest chroniony przed dezaktualizacją poprzez wprowadzenie buforów czasu. Wprowadzenie tzw. bufora projektu może jednak prowadzić do zbędnego wydłużenia planowanego terminu zakończenia, natomiast tzw. bufory zasilające nie chronią wystarczająco przed propagacją zakłóceń (Van de Vonder i in. 2005). Istotnym problemem jest określenie wielkości buforów czasu i ich lokalizacji w harmonogramie (Połoński i Pruszyński 2013). Dotychczasowe sposoby alokacji buforów, stosowane w praktyce zarządzania przedsięwzięciami, są przez wielu naukowców i praktyków krytykowane.

Paślawski (2009) zaproponował metodykę poprawy efektywności podejścia reaktywnego poprzez zwiększenie elastyczności projektów organizacji przedsięwzięć. Zaleca opracowywanie wielu wariantów rozwiązań technologiczno-organizacyjnych procesów, w celu ułatwienia aktualizacji planów przy zmianie warunków realizacyjnych.

Największą wadą metody *CPM* oraz *PERT* jest założenie o nieograniczonej dostępności zasobów. W procesie planowania należy uwzględnić limitowane ilości jednostek zasobów, wpływające one mogą na czas realizacji procesów, przebieg ścieżki krytycznej, a nawet czas realizacji całego przedsięwzięcia. Z punktu widzenia przedsiębiorstwa budowlanego przy alokacji zasobów należy brać pod uwagę wszystkie jednocześnie realizowane przez to przedsiębiorstwo przedsięwzięcia, do wykonania których są zaangażowane te same zasoby. Przy ustalaniu terminów rozpoczynania procesów muszą być uwzględniane nie tylko ograniczenia kolejnościowe (konieczność zakończenia wszystkich procesów poprzedzających), wynikające z technologii i przyjętej koncepcji organizacji robót, ale także ograniczenia w dostępności współdzielonych zasobów. Sposób wykorzystania zasobów pracy decyduje o efektywności przedsięwzięcia budowlanego

zarówno z punktu widzenia inwestora jak i przedsiębiorstwa budowlanego. Harmonogram wstępny realizacji przedsięwzięcia bez uwzględnienia ograniczeń kolejnościowych i przy założeniu pełnego wykorzystania potencjału wykonawczego realizatora inwestycji powinien być projektowany jedynie w początkowych fazach budowlanego procesu inwestycyjnego, np. w celu oceny wykonalności przedsięwzięcia budowlanego (Marcinkowski 1996).

Problem harmonogramowania z uwzględnieniem dostępności zasobów (ang. *The Resource Constrained Project Scheduling Problem – RCPSP*) obejmuje dwa główne zagadnienia: problem alokacji i wyrównania zasobów. Pierwszy z nich dotyczy rozdziału ograniczonej liczby zasobów w celu maksymalnego skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia. W drugim terminy procesów są ustalane w taki sposób, aby przy ustalonym terminie zakończenia realizacji przedsięwzięcia uzyskać równomierne zatrudnienie. Wówczas zakłada się, że poziom dostępności zasobów jest równy ustalonej wielkości. Jakość harmonogramu jest oceniana za pomocą różnych funkcji kryterialnych, np.: minimalizacja maksymalnego poziomu zatrudnienia, minimalizacja sumy kwadratów odchyłeń poziomu zatrudnienia dziennego od poziomu średniego lub sumy wartości bezwzględnych odchyłeń, minimalizacja momentu wykresu zatrudnienia względem osi czasu, minimalizacja wartości bezwzględnych różnic między zapotrzebowaniem dziennym w kolejnych dniach realizacji przedsięwzięcia itd. (Jaśkowski 2013). Połoński (2011) wyrównując poziom wykorzystania zasobu minimalizuje łączny koszt przekroczenia wymaganego zapotrzebowania i zmiany poziomu zatrudnienia. Kryterium kosztowe w algorytmie wyrównywania wykorzystania zasobów stosował także Jaworski (algorytm bazujący na technice programowania dynamicznego i przykład jego wykorzystania został zawarty w pracy Biruk i in. 2007).

Przegląd modeli i algorytmów stosowanych w problemie *RCPSP* zawierają np. prace: Demeulemeester i Herroelen (2002) i Hartmann i Briskorn (2012).

Przy opracowywaniu planu produkcyjnego należy dążyć do tego, aby zapotrzebowanie na zasoby było równe ich dostępności, ograniczyć ich fluktuację i wyeliminować szczyty w ich zatrudnieniu. Czas realizacji całego przedsięwzięcia (a także poszczególnych procesów) jest zależny od dostępności zasobów. Zazwyczaj zwiększenie dostępnej liczby jednostek zasobów wiąże się ze wzrostem kosztów realizacji przedsięwzięcia. Wyrównanie wykresów zatrudnienia można także uzyskać poprzez zmienną w czasie intensywność wykonania procesów niekrytycznych (Jaśkowski 2013).

3.2. Rozwinięcia metody CPM i PERT

Sieci metody *CPM/PERT* mają zdefiniowaną strukturę (do zakończenia przedsięwzięcia jest potrzebna realizacja wszystkich procesów; zakres zadań jest ustalony). Eisner (1962) wprowadził do sieci węzły decyzyjne (wierzchołki „lub”) umożliwiające odwzorowanie alternatywnego przebiegu przedsięwzięcia.

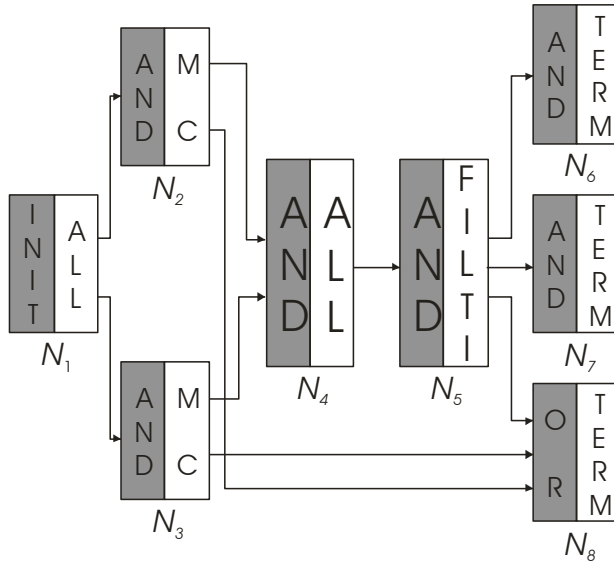
Elmaghraby (1964) wprowadził logikę i algebrę takich sieci, a model ten nazwał sieciami *GAN* (*Generalized Activity Network*). Algebra sieci została ograniczona do łuków którym są przypisane czasy deterministyczne. Następnie Pritsker i Happ (1966), Pritsker i Whitehouse (1966) wprowadzili metodę *GERT* (*Graphical Evaluation and Review Technique*), dla której analityczny sposób obliczania opracował Whitehouse (1973). Stała się ona wraz z jej symulacyjną odmianą *GERTS* (*Graphical Evaluation and Review Technique Simulation*) podstawową metodą analizy sieci stochastycznych, w której parametry są zmiennymi losowymi o danej gęstości prawdopodobieństwa.

Metoda *GERT* pozwala uwzględnić wszystkie alternatywne ciągi (możliwe warianty działań), a więc wszystkie procesy, nawet te o małym prawdopodobieństwie zaistnienia (Połoński i Pruszyński 2006). Możliwe jest to dzięki stosowaniu węzłów typu: wyłącznie-lub (*EXCLUSIVE-OR*), włącznie-lub (*INCLUSIVE-OR*) oraz i (*AND*), a także wieloparametrowych łuków sieci. Cechą charakterystyczną modeli *GERT* są sprzężenia zwrotne. Wybrane procesy mogą być wykonywane więcej niż jeden raz – możliwe jest zdefiniowanie liczby powtórzeń procesów. Udogodnienie to pozwala na modelowanie skomplikowanych zależności między procesami. Więckowski (2000), bazując na metodzie *GERT*, przedstawił własną koncepcję modelowania złożonych zależności pomiędzy procesami, oraz różne sposoby aktywacji węzłów, jak i metodę obliczania sieci.

W budownictwie sieci *GERT* mają zastosowanie do modelowania zmienności warunków gruntowych, analizy wariantów wykonania robót remontowych, czy konieczności wykonywania robót poprawkowych (sprzężenia zwrotne). Metoda *GERT* jest jednak bardzo pracochłonna zarówno na etapie budowy sieci zależności, jak i obliczeń (Połoński i Pruszyński 2006).

Metodę *Venture Evaluation and Review Technique* (*VERT*) (Moeller 1981, Moeller i Digman 1981) opracowano w celu oszacowania ryzyka realizacji przedsięwzięcia podczas wyboru różnych wariantów technologiczno-organizacyjnych za pomocą stochastycznego drzewa decyzyjnego. Jest ona oparta na modelowaniu sieciowym oraz symulacji cyfrowej. Bazuje ona na prostych zrozumiałych operatorach, z których można łatwo zbudować model za pomocą ograniczonego zestawu symboli graficznych (rys. 3.1). Jej stosowanie jest zalecane do oceny ryzyka realizacji przedsięwzięcia w przypadku posiadania niekompletnych informacji o wariantach jego przebiegu. *VERT* koncentruje się na trzech aspektach: czasie realizacji, kosztach i ryzyku, stąd jest bardziej efektywnym narzędziem planowania przedsięwzięć niż *GERT*. Każdemu procesowi przypisany jest czas, koszt oraz inne parametry (np. ilość robót, stopa zwrotu z zainwestowanego kapitału) w postaci rozkładów prawdopodobieństwa, histogramów lub zależności matematycznych. Wartość tych parametrów może zależeć od stanu innych węzłów lub łuków sieci, które zostały zakończone przed tym procesem. W sieci są zdefiniowane logiczne łuki wejściowe (*Initial*, *AND*, *Partial AND* i *OR*) i wyjściowe (*Terminal*, *ALL*, *Monte Carlo* oraz *Filter 1*, *Filter 2* i *Filter 3*). Ponadto sieć *VERT* składa się z dwóch typów węzłów: *split*

logic nodes (*Compare, Preferred, Queue i Sort*) oraz *single unit-logic nodes* (Lee i in. 1982).



Rys. 3.1. Przykładowa sieć metody VERT

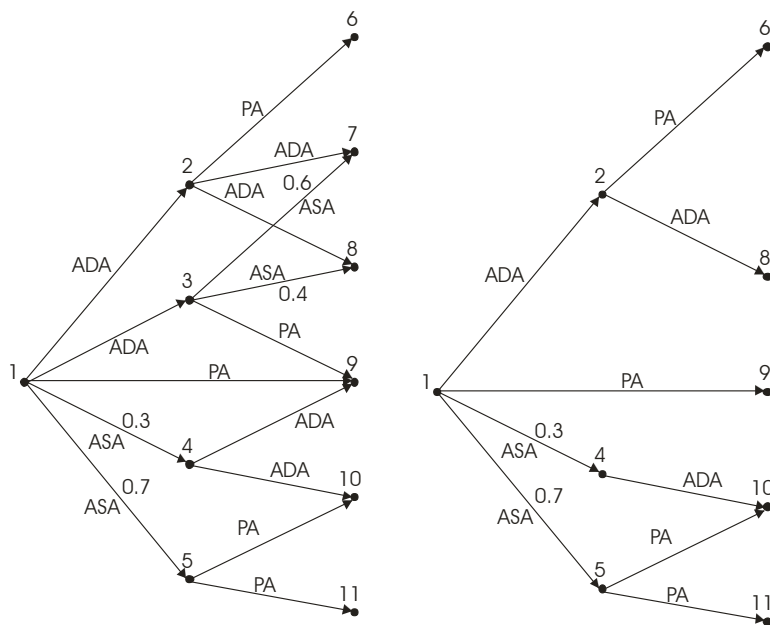
Innowacją metody VERT jest wprowadzenie zależności matematycznych między łukami i węzłami w aspekcie czasu, kosztu i innych parametrów. Kidd (1987) uważa, że proces przygotowania danych jest pracochłonny, ale przeprowadzenie analiz „*what - if*” pozwala na dokładne oszacowanie czasu i kosztów przedsięwzięcia. Metoda ta z powodzeniem była wykorzystana w przemyśle energetycznym i wojskowym, niestety nie w budownictwie.

Sieci GAAN (*Generalized Alternative Activity Network*) opracowane przez Golenko-Ginzburga i Blokha (1997) uogólniają modele sieciowe Eisnera, GERT i VERT. Model GAAN jest skończoną, zorientowaną, acykliczną siecią dwupunktową o następujących właściwościach:

- Posiada jeden węzeł początkowy i nie mniej niż dwa końcowe.
- Istnieją trzy rodzaje procesów:
 1. PA (*PERT activity*) – z emiterem „musi nastąpić” oraz receptorem „AND”.
 2. ASA (*alternative stochastic activity*) – z emiterem stochastycznym „EXCLUSIVEOR”. Każdemu procesowi wychodzącemu z tego emitera jest przypisane prawdopodobieństwo realizacji, przy czym zostanie zrealizowany tylko jeden z nich (warunek ciągłości drogi w grafie).
 3. ADA (*alternative deterministic activity*) – z emiterem, w którym następuje deterministyczny wybór procesu do realizacji.
- Procesy różnego typu mogą mieć początek w tym samym węźle.

- Procesy różnego typu mogą dochodzić do tego samego węzła.

W węzłach mogą być wprowadzone dodatkowe reguły logiczne ustalone dla receptorów i emiterów. Aby rozwiązać model *GANN* (Golenko-Ginzburg i Blokh 1997) wprowadzili koncepcję łączenia wariantów (ang. *joint variant*) – rys. 3.2.



Rys. 3.2. Sieć *GANN*; a) sieć bazowa b) sieć po redukcji (Golenko-Ginzburg 2011)

Planista musi ustalić politykę podejmowania decyzji w każdym węzle decyzyjnym sieci w zakresie ustalenia wariantu tak, aby osiągnąć w najwyższym stopniu planowane cele przedsięwzięcia przy uwzględnieniu przyjętych ograniczeń. W przypadku, gdy głównym celem optymalizacji jest czas realizacji przedsięwzięcia, najczęściej uwzględnia się ograniczenia w dostępności zasobów. Autorzy opracowali algorytm optymalizacji sieci *GANN* z zastosowaniem metod leksykograficznych porządkowania zbioru najdłuższych dróg w sieci i metod optymalizacji dyskretnej. W przypadku złożonych przedsięwzięć, w szczególności z dużą liczbą wariantów, opracowany algorytm dokładny jest nieefektywny – w tym przypadku zaleca się stosowanie algorytmów heurystycznych.

Sieci *GANN* były zastosowane z powodzeniem do planowania i kontroli złożonych prac rozwojowo-badawczych (Golenko-Ginzburg i Blokh 1997), lecz niestety brak doniesień naukowych o ich implementacji w budownictwie.

3.3. Reguły heurystyczne alokacji zasobów

Przedsięwzięcia inwestycyjne wieloobiektywne (np. budowa osiedla mieszkaniowego) lub zbiór zleceń przedsiębiorstwa budowlanego (wszystkie budowy przez nie realizowane) można analizować stosując dwa ujęcia: przedsięwzięcia są powiązane jedynie poprzez wspólne zasoby lub jest projektowany jeden model sieciowy dla wszystkich przedsięwzięć. Model taki tworzy się wprowadzając dodatkowe węzły, reprezentujące rozpoczęcie i zakończenie całego przedsięwzięcia, oraz dodatkowe procesy pozorne, imitujące zależności technologiczno-organizacyjne między przedsięwzięciami.

Ze względu na trudność zagadnienia alokacji zasobów odnawialnych przy realizacji planu produkcyjnego o zmiennym zakresie robót, przydział ograniczonej liczby jednostek zasobów do realizacji zadań jest zazwyczaj dokonywany na podstawie reguł heurystycznych, określających wartości priorytetów przypisanych do zadań. Stosowane reguły priorytetowe stosowane przy rozdziale zasobów powinny być zrozumiałe i łatwe w stosowaniu. Najczęściej reguły te bazują na czasie realizacji lub terminie zakończenia procesów, kosztach lub karach za opóźnienia. Najpopularniejsze reguły priorytetowe stosowane przy rozdziale zasobów w algorytmach heurystycznych to (Kanagasabapathi i Ananthanarayanan 2005, Davis i Patterson 1975, Demeulemeester i Herroelen 2002):

- Minimalnego czasu realizacji procesu (ang. *Shortest Processing Time – SPT*). Reguła wykorzystuje jedynie informacje o czasie realizacji procesów, pomijając powiązania pomiędzy nimi. Szybkie zwolnienie przypisanego zasobu skraca kolejkę procesów oczekujących na rozpoczęcie i maksymalizuje liczbę procesów realizowanych w dowolnym przedziale czasu.
- Maksymalnego czasu realizacji procesu (ang. *Longest Processing Time – LPT*). W przeciwieństwie do poprzedniej reguły, w pierwszej kolejności zasoby są przypisywane procesom o najdłuższym czasie wykonania.
- Minimalnego terminu najwcześniejszego lub najpóźniejszego rozpoczęcia procesu (ang. *Earliest/Latest Start Time*). Największy priorytet przydzielany jest procesom o najbliższym terminie rozpoczęcia. Priorytet ten może być obliczany na podstawie analizy sieci zależności bez uwzględnienia dostępności zasobów, jak i w sposób dynamiczny, na każdym etapie alokacji zasobów przy ustalonym częściowo harmonogramie.
- Maksymalnej liczby następników (ang. *Most Total Successors*). O wartości priorytetu procesu decyduje liczba wszystkich procesów, dla których jest on poprzednikiem.
- Maksymalnej liczby bezpośrednich następników (ang. *Most Immediate Successors*). Reguła ta różni się od poprzedniej tym, że przy ustalaniu wartości priorytetu jest brana pod uwagę liczba jedynie bezpośrednich następników.

- Maksymalnej liczby krytycznych następników (ang. *Most Critical Successors*). W przeciwieństwie do reguły poprzedniej, pod uwagę jest brana liczba następników krytycznych. Rozpoczęcie procesu warunkującego rozpoczęcie wielu procesów krytycznych zwiększa szansę wcześniejszego zakończenia realizacji przedsięwzięcia.
- Minimalnego najwcześniejszego lub najpóźniejszego terminu zakończenia procesu (ang. *Minimum Earliest/Late Finish Time*). Terminy zakończenia procesów są określane zazwyczaj jako najpóźniejsze, a spośród procesów możliwych do rozpoczęcia ze względu na ograniczenia kolejnościowe jest wybierany w pierwszej kolejności ten o najmniejszej wartości terminu zakończenia. Wartość priorytetu może być ustalana jednorazowo dla modelu sieciowego analizowanego bez dostępności zasobów lub dynamicznie przy rozdziale zasobów na kolejnych etapach – przy częściowo ustalonej kolejności realizacji procesów.
- Rangi procesu (ang. *Greatest Rank Positional Weight – GRPW*). Priorytet jest obliczany jako suma czasów realizacji analizowanego procesu i wszystkich lub jedynie bezpośrednich następników. W ten sposób w pierwszej kolejności są kierowane do realizacji procesy o większym wpływie na czas realizacji całego przedsięwzięcia.
- Minimalnego zapasu czasu (ang. *Minimum Slack Rule – MSLK*). Reguła ta prowadzi do minimalizacji czasu realizacji całego przedsięwzięcia. Zapas czasu może być obliczony na podstawie modelu sieciowego w funkcji czasu bez analizy dostępności zasobów lub po każdym przydziale zasobów, bowiem opóźnione procesy (ze względu na oczekiwanie na zasoby) wykorzystują dostępne zapasy czasu. Reguła jest trudna w stosowaniu. Jest często wykorzystywana przy porównywaniu skuteczności innych zasad szeregowania. Jest skuteczna przy analizie przedsięwzięć złożonych z wielu zadań (obiektów budowlanych realizowanych równoległe).
- Maksymalnego czasu oczekiwania (ang. *First Come First Served*). Procesy gotowe do rozpoczęcia oczekują we wspólnej kolejce na zasoby. W pierwszej kolejności jest wybierany proces najdłużej oczekujący. Reguła ta jest często stosowana, bowiem minimalizuje opóźnienie całego przedsięwzięcia, jak i średnią opóźnień procesów.
- Minimalnego wydłużenia czasu realizacji (ang. *Resource Scheduling Method – RSM*). Reguła ta daje pierwszeństwo procesom o najmniejszej potencjalnej wartości wydłużenia czasu realizacji przedsięwzięcia:

$$d_{ij} = \max \left\{ 0, \left(t_i^{0k} - t_j^{1s} \right) \right\}$$
 spowodowanym tym, że wykonanie procesu i będzie poprzedzało rozpoczęcie j (zasoby są w pierwszej kolejności przypisywane do i); j to wszystkie procesy, do których nie zostały jeszcze przypisane zasoby i mogą być opóźnione poprzez rozpoczęcie i , a t_i^{0k} – najwcześniejszy

termin zakończenia procesu i oraz t_j^{1s} – najpóźniejszy termin rozpoczęcia procesu j . Reguła ta powinna dawać podobne wyniki, jak w przypadku reguły minimalnego terminu zakończenia procesu.

- Minimalnego wskaźnika krytyczności (ang. *Critical Ratio – CR*). Wskaźnik CR dla procesu i jest obliczany następująco: $CR_i = (t_i^d - t) / t_i$, gdzie t_i^d – termin dyrektywny określony dla procesu i , t – kalendarzowy moment rozdziału zasobów, a t_i to czas realizacji procesu i . Jeżeli $CR_i > 1$, to proces i potencjalnie nie będzie opóźniony, gdy $CR_i = 1$, to proces i potencjalnie będzie zrealizowany terminowo, a jeżeli $CR_i < 1$, to proces i zakończy się po terminie dyrektywnym. Zasoby są przypisywane do procesów z najmniejszą wartością wskaźnika krytyczności.

- Największego zapotrzebowania na zasoby (ang. *Greatest Resource Demand – GRD*). Wartość priorytetu procesu i można obliczyć w następujący sposób:

$$P_i = t_i \cdot \sum_{j=1}^m r_{ij}, \text{ gdzie } t_i \text{ – czas realizacji procesu, } r_{ij} \text{ – zapotrzebowanie procesu}$$

i na zasób j , a m to liczba zasobów. Ze względu na różne typy zasobów, aby można było stosować tę regułę zapotrzebowanie na zasoby należy wyrazić we wspólnych jednostkach np. pieniężnych. W pierwszej kolejności zasoby są przydzielane procesom o największej wartości priorytetu. Zasobom można przypisać także wagi i wówczas reguła ta jest nazywana *Resource Equivalent Duration (RED)*.

- Skumulowanego największego zapotrzebowania na zasoby (ang. *Greatest Cumulative Resource Demand – GCUMRD*). Reguła ta jest podobna do GRD , ale przy obliczaniu wartości priorytetu procesu bierze się także pod uwagę procesy będące jego bezpośrednimi następnikami.
- Maksymalnego zapotrzebowania na zasób (ang. *Most Resources First*). Regułę tę stosuje się wówczas, gdy można wyróżnić zasoby kluczowe, niezbędne do realizacji wielu procesów.
- Losowej wartości priorytetu procesu (ang. *Select Jobs Randomly – RAN*). Wartości priorytetów procesów są ustalane losowo. Reguła ta jest często stosowana w celu oceny skuteczności innych reguł rozdziału zasobów lub jako pomocnicza, przy braku możliwości rozstrzygnięcia sposobu przypisania zasobów w przypadku stosowania innych reguł (te same wartości priorytetów).

Poza regułami priorytetowymi, najbardziej znane reguły heurystyczne alokacji zasobów to:

- Największego stopnia wykorzystania zasobów (ang. *Greatest Resource Utilization – GRU*). Zasoby do procesów są przydzielane w taki sposób, aby w każdym przedziale czasu ich wykorzystanie było jak największe (celem

jest minimalizacja czasu przestoju zasobów). Wyboru zbioru procesów dokonuje się stosując binarne programowanie liniowe. Stosowanie tej zasady daje dobre rezultaty w przypadku jednoczesnej realizacji wielu przedsięwzięć, gdy głównym kryterium optymalizacji jest minimalizacja czasu ich wykonania.

- Największej liczby procesów realizowanych (ang. *Most Jobs Possible – MJP*). Stosowanie tej reguły zapewnia równoległą realizację wielu procesów. Nie wynika ona z konieczności zapewnienia jak największego stopnia wykorzystania zasobów, lecz z dążenia do redukcji czasu realizacji przedsięwzięcia. Przy różnych typach zasobów wybór zbioru procesów kierowanych do realizacji może być dokonany z zastosowaniem binarnego programowania liniowego.

Reguły heurystyczne są stosowane przy rozdziale zasobów w warunkach deterministycznych oraz w warunkach ryzyka. W drugim przypadku obliczenia wartości priorytetów są dokonywane na podstawie wartości średnich czasu realizacji procesów, bądź wartości generowanych w kolejnych przebiegach symulacji komputerowej.

W wielu przypadkach wybrana reguła priorytetowa nie rozstrzyga konfliktu dostępu do zasobów – wartości priorytetów kilku procesów mogą przyjmować takie same wartości. Należy ustalić hierarchię stosowania reguł alokacji zasobów (Połoński 1997). Wybór losowy zawsze rozstrzyga konflikty zasobowe.

Alokacja zasobów w warunkach ryzyka może być uważana za wieloetapowy stochastyczny proces podejmowania decyzji (Demeulemeester i Herroelen 2002). Decyzje te podejmowane są na kolejnych etapach realizacji przedsięwzięcia l i podejmowane są w losowych terminach l_g na podstawie dostępnych na tym etapie informacji o dotychczasowym i przyszłym, planowanym przebiegu przedsięwzięcia (zależności kolejnościowe, dostępność i zapotrzebowanie na zasoby, rozkłady czasu procesów jeszcze nierozpoczętych itp.).

Do oceny różnych reguł rozdziału zasobów stosują się najczęściej badania symulacyjne. W metodzie symulacji przebieg przedsięwzięcia jest powtarzany wielokrotnie dla poszczególnych reguł alokacji zasobów, w celu ustalenia postępowania zapewniającego osiągnięcie głównego celu realizacji przedsięwzięcia, np. skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia, maksymalizacji stopnia wykorzystania zasobów, zapewnienia równomierności zapotrzebowania na nie lub minimalizacji wartości aktualnej netto przedsięwzięcia (*NPV*). W przypadku zadania inwestycyjnego złożonego z wielu przedsięwzięć bierze się także pod uwagę: minimalizację sumy czasu realizacji wszystkich przedsięwzięć czy sumy opóźnień lub kar za przekroczenie terminów dyrektywnych zakończenia ich realizacji. Z punktu widzenia przedsiębiorstwa istotna jest także liczba zrealizowanych przedsięwzięć w określonym okresie czasu, ich wartość, zysk oraz stopień wykorzystania zasobów własnych. W przypadku dążenia do skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć, możliwe jest podzleceni robót i wówczas funkcja kryterial-

na powinna uwzględniać koszty robót wykonywanych przez podmioty zewnętrzne.

3.4. Modelowanie graficzno-symulacyjne procesów budowlanych

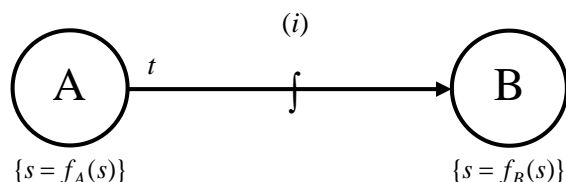
Znaną techniką modelowania graficzno-symulacyjnego w budownictwie jest metoda *CYCLONE* (ang. *Cycle Operation Network*) (Halpin i Riggs 1992). Łączy ona teorię kolejek z modelowaniem sieciowym. Jak sama nazwa wskazuje, koncentruje się ona głównie na modelowaniu procesów powtarzalnych (modele masowej obsługi) i z tego względu najczęściej jest stosowana na poziomie operacyjnym (np. przy tworzeniu harmonogramów szczegółowych realizacji poszczególnych etapów lub procesów przedsięwzięcia). Nie daje ona możliwości stosowania reguł alokacji różnego typu zasobów, przez co trudno jest modelować zależności kolejnościowe pomiędzy procesami.

Z powodu tej niedogodności metody *CYCLONE*, Martinez i Ioannou (1999) opracowali *STROBOSCOPE* (*State and Resource Based Simulation of Construction Processes*) – język symulacyjny ogólnego przeznaczenia (ang. *General Purpose Simulation Language*) do stosowania w budownictwie. Modelowanie graficzne bazuje na metodzie *CYCLONE*, ale wprowadzono pięć nowych elementów sieci (węzłów) i cztery typy połączeń (łuków w sieci) o różnym przeznaczeniu. Elementom zostały przypisane różne atrybuty, np. typ i parametry czasu realizacji procesu, liczba i rodzaj zasobów niezbędnych do realizacji procesu, priorytety dostępu do zasobów. Przede wszystkim można modelować zasoby różnych typów o indywidualnych parametrach. Atrybuty mogą być wielkościami stałymi lub zmiennymi (również wyrażeniami arytmetycznymi), których argumentami są wartości parametrów modelu, co w połączeniu z metodami obsługi zdarzeń deklarowanymi przez projektanta pozwala na modelowanie bardzo złożonych systemów produkcyjnych. *STROBOSCOPE*, podobnie jak *CYCLONE*, jest stosowany głównie do analizy powtarzalnych procesów budowlanych.

Został również stworzony dodatek (*CPM Add-on*) przeznaczony do analizy sieci *PERT* (Ioannou i Martinez 1998). W wyniku badań symulacyjnych modelu sieciowego przedsięwzięcia jest wyznaczana empiryczna dystrybucja czasu realizacji przedsięwzięcia oraz wskaźnik krytyczności procesów. Wyniki są prezentowane w postaci harmonogramu belkowego z uwzględnieniem losowych terminów rozpoczynania procesów (ang. *statistical bar chart*). Możliwe jest także stosowanie liczb antytetycznych w celu redukcji wariancji, a przez to zmniejszenie liczby koniecznych replikacji eksperymentu symulacyjnego. W programie dopuszcza się korelację zmiennych losowych czasu realizacji procesów.

Podczas analizy przedsięwzięć budowlanych najczęściej są rejestrowane terminy zdarzeń (rozpoczynania i zakończenia realizacji procesów), będące jednocześnie terminami podejmowania decyzji o alokacji zasobów. Przedsięwzięcie

może być zatem modelowane jako system zdarzeń dyskretnych (zmiany stanu systemu zachodzą w określonych terminach). Systemy dyskretne są często opisywane za pomocą sieci zdarzeń (ang. *event graphs*) (Schruben 1983). Ich największą zaletą jest ograniczony zestaw symboli do jednego typu wierzchołków i łuków. Łuki mogą być opcjonalnie opisane warunkami logicznymi oraz może być im przypisany czas realizacji (Savage i in. 2005). Na rysunku 3.3 przedstawiono podstawowy element sieci zdarzeń. Wystąpienie zdarzenia A powoduje zmianę stanu systemu s na $f_A(s)$. Jeżeli jest spełniony warunek i , to wystąpi zdarzenie B po czasie t i system osiągnie stan $f_B(s)$. Za pomocą sieci zdarzeń jest możliwe modelowanie przedsięwzięć o dowolnej złożoności i odwzorowanie złożonej logiki przejścia obiektów od stanu do stanu.

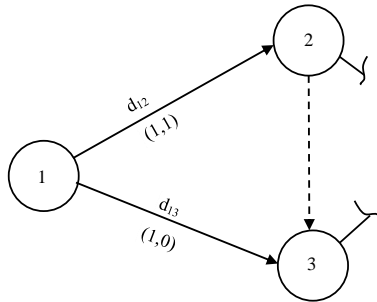


Rys. 3.3. Podstawowa konstrukcja sieci zdarzeń

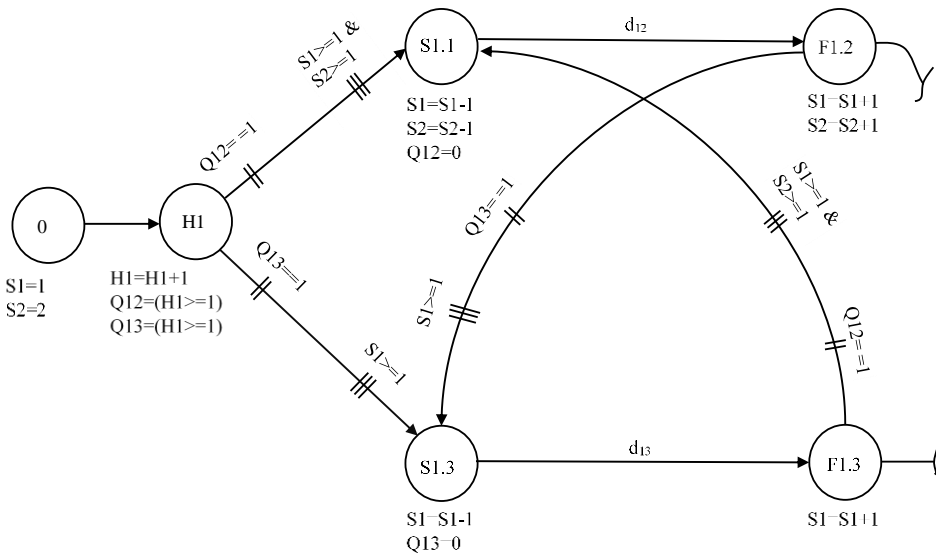
Sieci zdarzeń w sposób bezpośredni odwzorowują kolejność zaistnienia zdarzeń (listę zawiadomień o zdarzeniach), co jest wykorzystywane w metodzie planowania zdarzeń (ang. *event scheduling approach*), stosowanej przy sterowaniu przebiegiem symulacji.

Sieci zdarzeń stały się podstawą modeli zwanych *Simulation Graph Models (SGMs)* (Yücesan i Schruben 1992) oraz *Qualitative Simulation Graphs* (Ingalls in. 2003), dostarczających podstaw modelowania logiki złożonych systemów dyskretnych. Ingalls i Morrice (2000) opisali sposób transformacji modelu sieci *PERT* z uwzględnieniem dostępności zasobów odnawialnych w model *QSG*. W tym celu wprowadzony został dodatkowy węzeł, zwany węzłem „0”, pozwalający na inicjację zasobów. Przed każdym procesem (węzłem sieci *PERT*) jest umieszczany także dodatkowy węzeł, który jest licznikiem zakończonych procesów niezbędnych do rozpoczęcia danego procesu. Na rysunku 3.4 węzeł ten jest oznaczony jako Hx , gdzie x to numer węzła sieci *PERT*. Dla każdego łuku sieci *PERT* są przypisywane dwa dodatkowe węzły reprezentujące rozpoczęcie i zakończenie tego procesu, oznaczone odpowiednio $S_{x,y}$ i $F_{x,y}$. Krawędź dochodząca do węzła rozpoczynającego proces zawiera warunki dostępności zasobów (ang. *execution condition*) oraz liczbę procesów poprzedzających, które zostały zakończone (ang. *scheduling condition*) – nie wszystkie procesy poprzedzające muszą być wykonane, aby rozpocząć realizację danego procesu. Z węzła typu F wychodzą łuki zwalniające zasoby.

a)



b)



Rys. 3.4. Alternatywne modele przedsięwzięcia; a) sieć *CPM*, b) odpowiadający jej model grafu *QSG* – Ingalls i Morrice (2000)

Model zawiera warunki logiczne obejmujące: liczniki H_x oraz warunki związane z dostępnością zasobów $Q_{x,y}$, których spełnienie decyduje o rozpoczęciu procesu. Na rysunku 3.4 zapis d_{xy} nad krawędzią oznacza czas realizacji procesu, natomiast (a, b) poniżej krawędzi oznacza zapotrzebowanie na zasoby odpowiednio pierwszego i drugiego typu.

W metodzie *QSG* model sieci *PERT* z zasobami ma formę grafu acyklicznego, który reprezentuje wszystkie dopuszczalne uszeregowania, bez względu na przyjętą strategię rozdziału zasobów i losowość czasu realizacji procesów.

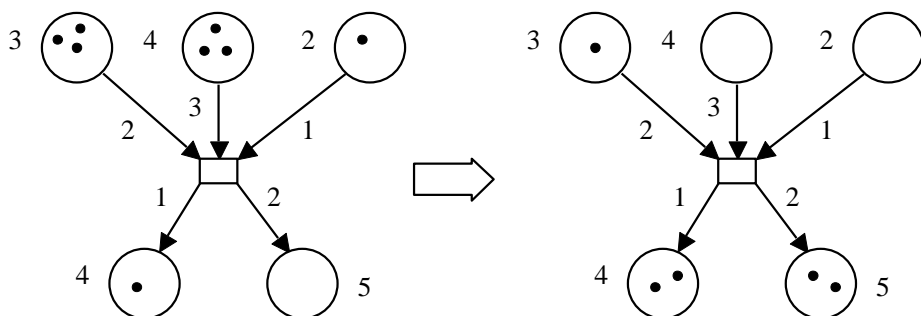
W modelu symulacyjnym należy zaimplementować strategię rozdziału zasobów (sposób rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych), która decyduje o dalszym, alternatywnym przebiegu przedsięwzięcia.

Sieci *Petriego* ze względu na to, że są efektywnym narzędziem modelowania systemów dyskretnych, znalazły zastosowanie w planowaniu złożonych procesów budowlanych (Biruk 2002, Biruk i Jaśkowski 2008, Chen i Shan 2012, Chung (2011), Hoła i Mrozowicz 2003, Jaworski i Biruk 2000, Körner i Franz 1989, Sawhney i in. 1999, Wakefield i Sears 1997).

Do modelowania procesów są stosowane głównie sieci *Petriego* złożone z miejsc i tranzycji (*P/T*-nets). Każda sieć sporządzona według klasycznej metody *CPM/PERT* może zostać przedstawiona w postaci sieci *P/T* (Dicesare i in. 1993, Peterson 1984).

Obrazem graficznym sieci *Petriego* (*P/T*-net) jest dwudzielny zorientowany graf z dwoma typami wierzchołków (Dicesare i in. 1993, Reisig 1997). Elementy typu $p \in P$ – nazywane miejscami (ang. *places*) lub pozycjami – są oznaczane kółkami. Elementy typu $t \in T$ – nazywane tranzycjami lub przejściami (ang. *transition*) – są reprezentowane za pomocą prostokątów lub pogrubionych odcinków. Relacja przepływu jest przedstawiana za pomocą łuków łączących odpowiednie kółka i prostokąty. Pozycje mogą być utożsamiane z wystąpieniem zdarzenia (rozpoczęciem lub zakończeniem procesu) lub zasobami niezbędnymi do wykonania procesów. Pojemność miejsca p symbolizuje zapis $x = K(p)$. W sieciach *P/T* w jednym miejscu mogą znajdować się tylko znaczniki jednego rodzaju (jednostki tego samego zasobu). W przypadku nieskończonej pojemności zapis ten może być pominięty. Łuki mogą posiadać wagi a ich wartość, jeżeli jest większa od jedności, jest oznaczana przez $w(f)$.

Dynamika systemu (przebieg realizacji przedsięwzięcia) jest opisana zmiennym w czasie rozkładem znaczników (reprezentowanych jako czarne kółka) $M(p)$, który ulega zmianie podczas wzbudzania tzw. przejść przygotowanych (rys. 3.5). Przejście $t \in T$ jest przygotowane (możliwe do wzbudzenia), gdy liczba znaczników na pozycjach wejściowych jest nie mniejsza od wartości wag odpowiednich łuków oraz jeżeli po wzbudzeniu przejścia nie zostaną przekroczone pojemności miejsc wyjściowych. Wzbudzenie przejścia polega na usunięciu odpowiedniej liczby znaczników na pozycjach wejściowych i zwiększeniu liczby znaczników na pozycjach wyjściowych o odpowiadające im wartości wag łuków, łączących przejście z tymi miejscami. W czasowych sieciach *Petriego* wzbudzanie tranzycji odbywa się dwuetapowo: w pierwszym etapie są usuwane znaczniki na miejscach wejściowych i rezerwowane pojemności miejsc wyjściowych. Czas wzbudzania przejścia może być deterministyczny lub opisany dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa.



Rys. 3.5. Zmiana znakowania sieci po wzbudzeniu przejścia przygotowanego

Modelowanie różnych typów przedsięwzięć oraz różnych warunków realizacji umożliwiając wprowadzone modyfikacje do sieci *Petriego*, przede wszystkim łuki wzbraniające, łuki probabilistyczne (podobnie jak w sieciach *GAN*) oraz możliwość definiowania priorytetu dostępności do zasobów. Łuki wzbraniające umożliwiają wprowadzenie dodatkowych reguł wzbudzania transycji w zależności od bieżącego znakowania sieci.

Do odwzorowania bardzo złożonych systemów z dużą liczbą ograniczeń i powiązań logicznych pomiędzy elementami systemu, a przede wszystkim z dużą liczbą zasobów różnego typu, są stosowane sieci z indywidualnymi znacznikami, np. *Coloured Petri Nets*, oraz sieci predykatowe. Każda sieć tego typu może być także odwzorowana w postaci sieci *P/T*.

Należy też wspomnieć o *Metodzie Zintegrowanego Modelowania Graficznego (ZMG)* opracowanej przez Michnowskiego (1985), która pozwala na modelowanie procesów na wszystkich etapach procesu inwestycyjnego. W metodzie przewiduje się trzy formy modeli:

- rozwiniętą, która ma na celu eliminację opisów werbalnych,
- ideową – do rozpoznania problemu przez projektanta,
- syntetyczną – do przeprowadzenia analizy matematycznej.

Niestety metoda *ZMG* nie jest obecnie rozwijana i nie doczekała się implementacji komputerowej, co utrudniło jej wdrożenie do praktyki budowlanej.

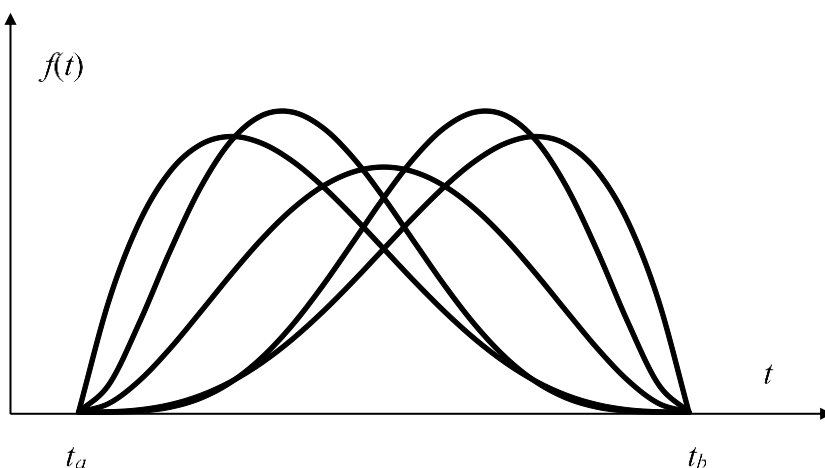
Wybór odpowiedniego modelu graficzno-analitycznego przedsięwzięcia zależy głównie od złożoności analizowanego problemu, doświadczeń planisty w modelowaniu symulacyjnym, a przede wszystkim od wykorzystywanego oprogramowania – bowiem ten sam problem można modelować za pomocą różnych metod.

4. Modelowanie czasu realizacji procesów budowlanych

4.1. Rozkłady czasu realizacji procesów budowlanych

Wiarygodność modelu przedsięwzięcia zależy od poprawności ustaleń w zakresie typów rozkładów prawdopodobieństwa czasu wykonania procesów oraz dokładności oszacowania ich parametrów. Normy pracochłonności, często stosowane jako podstawa do określenia czasu wykonania procesów, są ustalane w procesie normowania pracy na podstawie analizy statystycznej wyników badań chronometrażowych (Hoła i Mrozowicz 2003). Normy opracowywane dla całej branży są ustalane dla przeciętnych warunków realizacyjnych, nie uwzględniają stanu warunków techniczno-organizacyjnych w danym przedsiębiorstwie i warunków realizacji przedsięwzięcia, np. lokalizacji budowy, zmiennej wydajności pracy brygad, spowodowanej różnymi kwalifikacjami i doświadczeniem pracowników lub wpływem stanu pogody itd. Przede wszystkim nie są publikowane informacje o zmienności obserwowanych na etapie normowania nakładów (typ i parametry rozkładu), stąd ich przydatność w metodzie symulacji jest ograniczona.

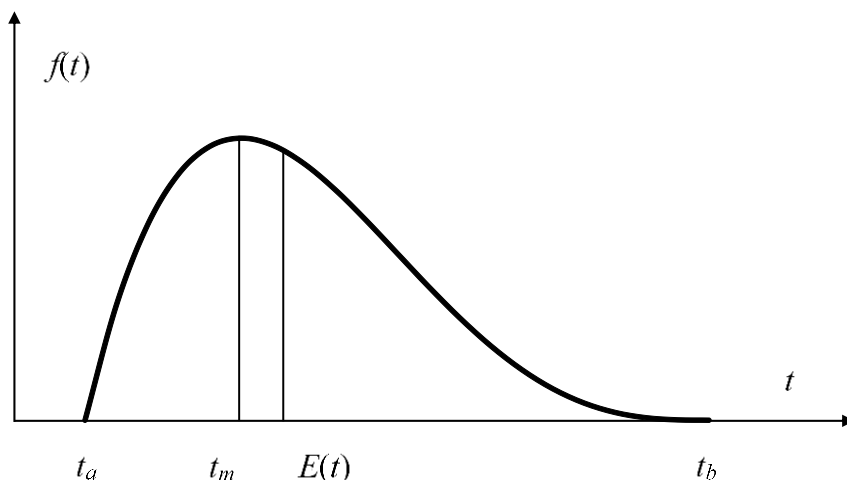
Analizując przedsięwzięcie budowlane w warunkach losowych, często zakłada się, że czasy realizacji procesów (czynności modelu sieciowego) są zmiennymi losowymi o rozkładzie $beta(t_a, t_b, \alpha, \beta)$. Rozkład ten jest definiowany poprzez dwie wartości skrajne czasu t_a i t_b (czas optymistyczny i pesymistyczny) oraz parametry kształtu α i β .



Rys. 4.1. Przykładowe kształty rozkładu $beta$

Rozkład *beta* poprzez zmianę parametrów umożliwia uzyskiwanie różnych kształtów funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Przykładowe kształty rozkładu *beta* pokazano na rys. 4.1.

Na podstawie obserwacji zrealizowanych przedsięwzięć przyjmuje się, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji procesów budowlanych jest niesymetryczna i prawoskośna (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Przyjmowany kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji procesów budowlanych

Rozkład *beta* na przedziale (t_a, t_b) (niektóre źródła podają przedział domknięty $[t_a, t_b]$) ma funkcję gęstości prawdopodobieństwa w postaci (Jaworski 1999, Law i Kelton 1999):

$$f(t) = \frac{(t-t_a)^{\alpha-1} (t_b-t)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta) \cdot (t_b-t_a)^{\alpha+\beta-1}}; \quad t_a < t < t_b; \alpha, \beta > 0, \quad (4.1)$$

a funkcja $B(\alpha, \beta)$, określana mianem funkcji *beta*, dana jest wzorem:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 s^{\alpha-1} (1-s)^{\beta-1} ds. \quad (4.2)$$

Wartość oczekiwana μ i wariancja σ^2 rozkładu *beta* wynoszą odpowiednio:

$$\mu = \frac{\alpha \cdot t_b + \beta \cdot t_a}{\alpha + \beta}, \quad (4.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (t_b - t_a)^2}{(\alpha + \beta + 1) \cdot (\alpha + \beta)^2}, \quad (4.4)$$

natomiast moda jest równa:

$$\sigma^2 = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (t_b - t_a)^2}{(\alpha + \beta + 1) \cdot (\alpha + \beta)^2}, \quad (4.5)$$

W metodzie *PERT* zakłada się, że średnia i odchylenie standardowe zmiennej losowej czasu realizacji procesu mogą być ustalone na podstawie następujących zależności (Hillier i Lieberman 2001, Jaworski 1999, Malcolm i in. 1959):

$$\mu = \frac{t_a + 4t_m + t_b}{6}, \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = \frac{(t_b - t_a)^2}{36}, \quad (4.7)$$

gdzie: t_a – czas optymistyczny, t_b – czas pesymistyczny, t_m – czas najbardziej prawdopodobny realizacji procesu ($t_a < t_m < t_b$).

Przyjęty w metodzie *PERT* rozkład czasu realizacji procesów jest określany mianem rozkładu *PERT-beta*, rzadziej *beta PERT*.

W praktyce typy i parametry rozkładów czasu wykonania procesów są ustalane przede wszystkim na podstawie: danych historycznych i oszacowań dokonanych przez ekspertów (Ravindran 2009).

Dane historyczne, ze względu na jednostkowy charakter przedsięwzięć budowlanych, mają ograniczone zastosowanie. Zebranie danych z wcześniej realizowanych przedsięwzięć o podobnym charakterze i zbliżonych warunkach może być czasochłonne i kosztowne, a czasem i niemożliwe. Wyniki stają się niewiarygodne przy zmianie warunków techniczno-organizacyjnych, a stosowanie metod prognozowania statystycznego jest ryzykowne w szczególności, gdy wartości prognozowanych parametrów wykraczają poza zakres dostępnych danych.

W przypadku posiadania wiarygodnych danych historycznych można przyjąć, że oszacowania czasu wykonania procesu w metodzie *PERT* mogą być dokonane na podstawie następujących zależności (Badiru 2011, Ravindran 2009):

$$t_a = \bar{t} - kR, \quad (4.8)$$

$$t_m = \bar{t}, \quad (4.9)$$

$$t_b = \bar{t} + kR, \quad (4.10)$$

gdzie: \bar{t} – średni czas obliczony na podstawie próby, R – zakres zmienności danych, natomiast $k = 3/d_2$.

Współczynnik d_2 szacuje standardowe odchylenie próby, a jego przykładowe wartości przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Wartości współczynnika d_2 estymującego odchylenie standardowe próby

n	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
d_2	2,326	3,078	3,472	3,735	3,931	4,086	4,322	4,498	4,806	5,015

W przypadku korzystania z wiedzy ekspertów należy pamiętać, że duży wpływ na błąd oszacowania parametrów rozkładu *beta* ma jakość ich opinii przy określaniu czasu pesymistycznego, optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego. Jakość oszacowań ekspertów zależy od ich indywidualnych doświadczeń. Eksperci ze strony inwestora mogą mieć tendencję do zbyt optymistycznych oszacowań, natomiast wykonawca stara się uwzględnić w oszacowaniach czasu jak największy poziom ryzyka i jego oszacowanie może być zawyżone. Przy ustalaniu typu i parametrów rozkładu wykorzystuje się często grupowe metody podejmowania decyzji. Problem jest analizowany zespołowo przez doświadczonych kierowników budów i projektantów na specjalnych spotkaniach roboczych (Demeulemeester i Herroelen 2002). W celu zmniejszenia błędów oszacowań, jako wiarygodny pogląd grupy ekspertów – w przypadku niejednorodności tej zbiorowości – zaleca się przyjmować wartość mediany a nie mody zmiennej losowej wyrażanych opinii (Cieślak 2005).

Próbie opracowania metodyki ustalania czasu wykonania procesów i innych wielkości stosowanych przy planowaniu w budownictwie oraz weryfikacji statystycznej poprawności tych oszacowań podjęli Głowacz i Kołton (1991). Opisana przez autorów metodyka polega na iteracyjnej procedurze pozyskiwania informacji od ekspertów. Uzyskane dane są testowane pod względem zgodności opinii ekspertów w celu wykluczenia opinii skrajnie subiektywnych, a następnie są określane estymatory szacowanych wielkości za pomocą metod statystycznych. Biruk (1991) zaproponował metodę określania rozkładów dyskretnych czasu realizacji procesów budowlanych na podstawie opinii ekspertów. Wiarygodność eksperta jest tym wyższa, im podane przez niego oszacowanie jest bliższe czasowi określonymu na podstawie norm pracochłonności lub średniej ze wszystkich opinii. Prawdopodobieństwo wystąpienia czasu określonego przez każdego z ekspertów jest obliczane na podstawie teorii prawdopodobieństwa subiektywnego.

Przy szacowaniu czasu optymistycznego zakłada się, że wystąpią tylko niewielkie zakłócenia realizacyjne. Czas pesymistyczny jest szacowany przy wystąpieniu dużych przeszkód w prowadzeniu robót budowlanych. Zakłada się, że przeciętne warunki wykonania robót występują przy oszacowaniach najbardziej prawdopodobnych czasu realizacji (Kerzner 2003). Dodatkowo, czas minimalny określa się wychodząc z założenia pełnego wykorzystania frontu robót oraz

maksymalnego nasycenia maszynami budowlanymi (Rybalski 1970). Oszacowanie parametrów rozkładu czasu realizacji danego procesu powinno być dokonane niezależnie od oszacowań dla pozostałych procesów, bez uwzględnienia wystąpienia potencjalnych konfliktów dostępu do zasobów. Przyjęty, zbyt mały limit dostępnych zasobów może powodować opóźnienia terminów rozpoczęcia procesów, ale to powinno być uwzględniane na etapie projektowania harmonogramów. Oszacowania nie powinny uwzględniać takich czynników losowych, jak: pożary lub strajk. Terminy dostaw wyrobów i sprzętu budowlanego powinny być planowane w drugiej kolejności. Szczególnie trudno jest ekspertom oszacować parametry rozkładów silnie prawoskośnych (Demeulemeester i Herroelen 2002).

Greenberg i Golenko-Ginzburg (2010) uzasadnili poprawność przyjmowania rozkładu *beta* do odwzorowania zmienności czasu wykonania procesów w warunkach losowych. W tym celu przedział planowanego czasu wykonania został podzielony na n okresów i przyjęto założenie, że w dowolnym z nich realizacja procesu może zostać przerwana z pewnym określonym prawdopodobieństwem. Spowoduje to opóźnienie terminu zakończenia procesu o długość tego okresu. Autorzy wykazali, że określony w ten sposób czas realizacji procesu ma rozkład *beta*.

Aby wyznaczyć jednoznacznie parametry α i β rozkładu *PERT-beta* należy poczynić dodatkowe założenia. Można przyjąć, że wartość średnia określona zgodnie z wyrażeniem (4.3) jest równa wartości średniej obliczanej zgodnie z założeniami metody *PERT* – wyrażenie (4.6) – oraz wariancje (4.4) i (4.7) są sobie równe. W ogólnym przypadku obliczenie wartości α i β wymaga rozwiązania równania trzeciego stopnia. Davis (2008) wykazał, że dla rozkładu *PERT-beta* poprawne jest stosowanie następujących zależności:

$$\alpha = \left(\frac{\mu - t_a}{t_b - t_a} \right) \left[\left(\frac{(\mu - t_a) \cdot (t_b - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \right], \quad (4.11)$$

$$\beta = \left(\frac{t_b - \mu}{t_b - t_a} \right) \left[\left(\frac{(\mu - t_a) \cdot (t_b - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \right]. \quad (4.12)$$

W celu jednoznacznego ustalenia kształtu krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, często przyjmuje się, że $\alpha + \beta = 6$ (Gallagher 1986). Gallagher wyszedł z założenia, że rozkład *beta* powinien być zbliżony kształtem do normalnego. Uzasadnienie tego założenia podano np. w pracy Kamburowski (1997). Parametry kształtu rozkładu *PERT-beta* można wówczas wyznaczyć z następujących wzorów (Gallagher 1986):

$$\beta = 6 \frac{(t_b - \mu)}{(t_b - t_a)}. \quad (4.13)$$

$$\beta = 6 \frac{(t_b - \mu)}{(t_b - t_a)}. \quad (4.14)$$

Grubbs (1962) zauważył, że przyjmując: $\alpha = 2 + \sqrt{2}$ i $\beta = 2 - \sqrt{2}$ lub $\alpha = 2 - \sqrt{2}$ oraz $\beta = 2 + \sqrt{2}$ czy $\alpha = \beta = 3$ dla rozkładu symetrycznego mamy spełnione założenia (4.6) i (4.7) metody *PERT*. Propozycja ta jest silnie krytykowana ze względu na narzucenie jednego, zdeterminowanego kształtu rozkładu czasu realizacji procesów.

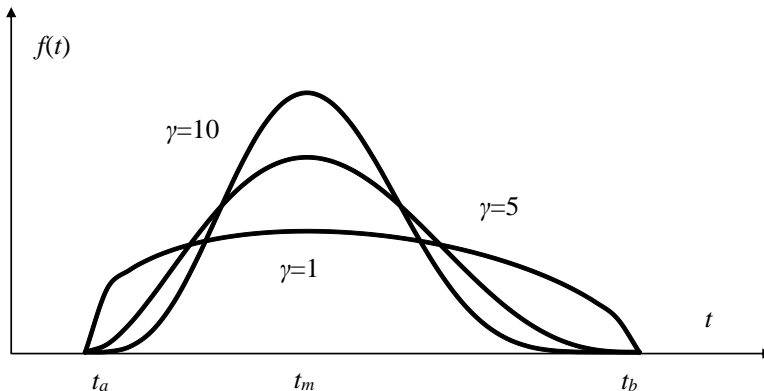
Planista może także stosować zmodyfikowany rozkład *PERT-beta*, dla którego (Vose 2008):

$$\mu = \frac{t_a + \gamma \cdot t_m + t_b}{\gamma + 2}, \quad (4.15)$$

$$\sigma^2 = \frac{(\mu - t_a) \cdot (t_b - \mu)}{\gamma + 3}, \quad (4.16)$$

gdzie γ – waga czasu najbardziej prawdopodobnego.

Korzystanie ze zmodyfikowanego rozkładu *PERT-beta* pozwala na modelowanie warunków niepewności poprzez zmianę wartości wagi γ (rys. 4.3). Wartość tą szacuje ekspert, bazując na doświadczeniu uzyskanym podczas realizacji innych przedsięwzięć.



Rys. 4.3. Przykładowe kształty zmodyfikowanego rozkładu *PERT-beta* dla różnych wartości γ

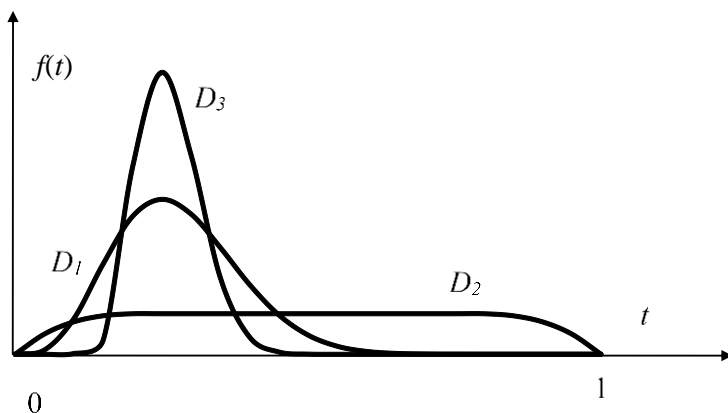
Niepoprawnie dobrany kształt rozkładu *PERT-beta* może prowadzić do dużych błędów w analizie czasowej przedsięwzięcia. Na rys. 4.4 przedstawiono trzy ciągłe funkcje gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych prawoskośnych o jednakowej wartości mody z przedziału (0, 1), lecz skrajnie różnych

odchyleniach standardowych, mogących hipotetycznie aproksymować rzeczywisty rozkład czasu realizacji procesu (MacCrimmon i Ryavec 1964). Krzywa D_1 odpowiada rozkładowi przyjętemu w metodzie *PERT*. Wartość oczekiwana tej zmiennej losowej wynosi $\mu_1 = \frac{1}{6}(4t_m + 1)$, a odchylenie standardowe $\sigma_1 = \frac{1}{6}$. Rozkład D_2 zbliżony jest do rozkładu równomiernego ($\mu_2 \approx 0,5$, $\sigma_2 \approx \sqrt{1/12}$). Dla rozkładu normalnego D_3 przyjęto w przybliżeniu $\mu_3 \approx m$ i $\sigma_3 \approx 0$. Maksymalny bezwzględny błąd średniej (w stosunku do oszacowania w metodzie *PERT*) wyniesie (MacCrimmon i Ryavec 1964):

$$\max \left\{ \left| \frac{1}{6}(4t_m + 1) - \frac{1}{2} \right|, \left| \frac{1}{6}(4t_m + 1) - t_m \right| \right\} = \frac{1}{3}(1 - 2t_m), \quad (4.17)$$

natomiast dla odchylenia standardowego:

$$\max \left\{ \left| \sqrt{\frac{1}{12}} - \frac{1}{6} \right|, \left| 0 - \frac{1}{6} \right| \right\} = \frac{1}{6}. \quad (4.18)$$



Rys. 4.4. Przykłady funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładów określonych na przedziale $[0, 1]$

Ze względu, że rzeczywisty rozkład czasu realizacji procesu może znacznie odbiegać od przyjętego w metodzie *PERT*, błędy założeń propagują się wzdłuż ścieżki krytycznej. Mogą się dodawać lub częściowo niwelować. Wylimitowanie błędów określenia wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego można osiągnąć poprzez większą liczbę oszacowań, stanowiących wartości z góry określonych kwantyli rozkładu czasu realizacji procesu. Najczęściej przyjmuje się 7 kwantyli np. $t_{0,01}, t_{0,125}, t_{0,25}, t_{0,50}, t_{0,75}, t_{0,875}, t_{0,99}$, które przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów, pozwalają na jednoznaczne określenie kształtu

(wartości parametrów α i β) rozkładu. Jest to podejście bardziej dokładne nie tylko ze względu na wykorzystanie większej liczby danych, ale także ze względu na fakt, że eksperci zwykle dużo dokładniej podają wartości zbliżone do mody lub wartości oczekiwanej, a źle szacują wielkości ekstremalne (Lichtenstein i in. 1982).

Do jednoznacznego wyznaczenia rozkładu *beta* wystarcza podanie wartości trzech kwantyli np.: $t_{0,05}, t_{0,50}, t_{0,95}$ (Hon-Siang i Somarajan 1995). Takie podejście umożliwia wyeliminowanie konieczności – trudnego dla ekspertów – oszacowania wartości skrajnych przedziału zmienności. Również Moder i Rodegrs (1968) uważają, że szacowanie ostrych wartości końców przedziału jest niemożliwe i dlatego uważają, że czasy t_a i t_b powinno się szacować jako odpowiednio kwantyle rzędu 0,05 i 0,95. Wówczas odchylenie standardowe można określić z następującej zależności:

$$\sigma = \frac{(t_{0,95} - t_{0,05})}{3,2}. \quad (4.19)$$

Perry i Greig (1975) twierdzą, że mianownik w równaniu (4.19) powinien być równy 3,25, bowiem empiryczna funkcja gęstości ma kształt bardziej zbliżony do „dzwonu”.

Keefe i Verdini (1993) wykazali numerycznie, że – dla większości przypadków – dobre oszacowania wartości średniej i odchylenia standardowego rozkładu *beta* można określić z następujących zależności:

$$\mu = 0,630 \cdot t_{0,05} + 0,185 \cdot (t_{0,05} + t_{0,95}), \quad (4.20)$$

$$\sigma^2 = 0,630 \cdot (t_{0,5} - \mu)^2 + 0,185 \cdot (t_{0,05} - \mu)^2 + (t_{0,95} - \mu)^2. \quad (4.21)$$

Oszacowania (4.20) i (4.21) – autorstwa Pearsona i Tukeya (1965) – są źródłem mniejszych błędów niż wyrażenia (4.6) i (4.7) stosowane w klasycznej metodzie *PERT*.

Od lat trwają prace nad dokładniejszym oszacowaniem parametrów rozkładu czasu realizacji procesów w metodzie *PERT* (Farnum i Stanton 1987, Golenko-Ginzburg 1988, Shankar i Siresha 2009), szczególnie w przypadku silnie skośnych rozkładów (tzn. dla których $\frac{t_b - t_m}{t_m - t_a} > 1$), a takie najczęściej przyjmowane są podczas analizy przedsięwzięć budowlanych. Wariancja w takich przypadkach jest mniejsza od 1/6.

Golenko-Ginzburg (1988), zakładając $\alpha + \beta \cong Z = \text{const}$, wykazał, że:

$$\mu = \frac{2t_a + 9t_m + 2t_b}{13}, \quad (4.22)$$

$$\sigma^2 = \frac{(t_b - t_a)^2}{1268} \left[22 + 81 \frac{t_m - t_a}{t_b - t_a} - 81 \left(\frac{t_m - t_a}{t_b - t_a} \right)^2 \right]. \quad (4.23)$$

Zauważył też, że szacowanie czasu najbardziej prawdopodobnego nie jest konieczne w przypadku, gdy moda leży w „ogonie rozkładu”. Przy założeniu, że $p = 1$ i $q = 1$ (przyjmując popularne w literaturze dotyczącej metody *PERT* podstawienie $\alpha - 1 = p$; $\beta - 1 = q$), zaproponował, aby przyjmować wartość średnią dla każdego procesu równą $\mu = \frac{2t_a + t_b}{3}$ i wykazał, że wartość ta nie różni się statystycznie od wartości czasu oczekiwanego, obliczanego jak w klasycznej metodzie *PERT*. Ułatwia to praktykom, szczególnie gdy nie posiadają odpowiedniej wiedzy ze statystyki matematycznej, szacowanie parametrów rozkładu czasu realizacji procesów. W takich przypadkach można przyjmować:

$$\mu = 0,2 \cdot (3t_a + 2t_b), \quad (4.24)$$

$$\sigma^2 = 0,04 \cdot (t_b - t_a)^2. \quad (4.25)$$

Założenie co do kształtu rozkładu ($p = 1$ i $q = 1$) zostało uzasadnione na podstawie analizy czasu realizacji różnych procesów w ramach wielu przedsięwzięć o różnym charakterze.

Shankar i Sireesha (2009) zaproponowali nowy sposób szacowania parametrów rozkładu *beta* bez wprowadzania dodatkowych ograniczeń dotyczących wartości α i β . Zaproponowali oni, aby wartość średniej i wariancji rozkładu obliczać następująco:

$$\mu = \frac{5t_a + 17t_m + 5t_b}{27}, \quad (4.26)$$

$$\sigma^2 = \frac{(17t_m - 27t_a + 10t_b) \cdot (27t_b - 10t_a - 17t_m)}{2300}. \quad (4.27)$$

Zakładając, tak jak Golenko-Ginzburg (1988), że $\mu = \frac{2t_a + t_b}{3}$, Shankar i Sireesha (2009) otrzymali następującą zależność do określania wariancji rozkładu:

$$\sigma^2 = \frac{(t_b - t_a)^2}{35}. \quad (4.28)$$

Cottrell (1999) zaproponował uproszczoną wersję metody *PERT*, w której czasy realizacji procesów są określane za pomocą tylko dwóch parametrów t_b

i t_m . Założenie to jest poprawne w przypadku rozkładów prawoskośnych. Zaleca on, aby przyjmować:

$$\mu = t_m, \quad (4.29)$$

$$\sigma = \left[\frac{(t_b - t_m)}{z} \right]^2. \quad (4.30)$$

Zakładając, że czas pesymistyczny jest szacowany jako kwantyl rzędu 0,95, wówczas – zgodnie ze standaryzowanym rozkładem normalnym – $z=1,645$, natomiast – w przypadku szacowania czasu pesymistycznego w sposób klasyczny (kwantyl rzędu 1,00) – należy przyjmować $z=3,43$.

Niestety zarówno Golenko-Ginzburg (1988), Shankar i Sireesha (2009), jak i Contrell (1999) nie podali zależności do wyznaczenia wartości parametrów α i β rozkładu *beta*.

Lu (2002) przedstawił prostą i efektywną metodę określania parametrów rozkładu *PERT-beta* z stosowaniem sieci neuronowych. Sieć taka składa się z dwóch węzłów wejściowych, odpowiadających dolnemu i górnemu kwantylowi oszacowania czasu realizacji procesu, i dwóch wyjściowych, reprezentujących parametry α i β rozkładu *beta*, oraz jednej warstwy ukrytych neuronów. W proponowanej metodzie wykorzystano sposób uczenia wielowarstwowej sieci neuronowej z użyciem algorytmu wstecznej propagacji błędów (ang. *backpropagation*). Model był testowany, walidowany a następnie jego działanie było porównywane z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem komercyjnych pakietów do analiz statystycznych. Autor proponuje, aby prezentowany model był łączony z metodą symulacji cyfrowej modeli *PERT*.

Jednym z większych problemów w metodzie *PERT* jest ustalenie rozkładu prawdopodobieństwa zaistnienia terminu zdarzenia (węzła sieci), do którego dochodzi więcej niż jeden proces, tzn. wyznaczenie dystrybuanty zmiennej losowej: $F(t) = \max_{i \in I} \{F(t_i)\}$, gdzie I – zbiór procesów dochodzących do węzła.

Golenko-Ginzburg (2011) zaleca w tym celu stosowanie rozkładów zachowawczych ze względu na maksymalizację, których dystrybuanta dana jest wzorem:

$$F_v(t_i) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{\theta}{t_i - a} \right)^v \right] & \text{dla } t_i > a > 0 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach,} \end{cases} \quad (4.31)$$

gdzie: $v, \theta > 0$ to parametry rozkładu.

Rozkład ten ma tę własność, że dla każdych wartości $a_1, a_2 > 0$ zawsze istnieje $a_3 > 0$ takie, że: $F(a_1 \cdot x) \cdot F(a_2 \cdot x) = F(a_3 \cdot x)$. Jednocześnie Golenko-Ginzburg (2011) wykazał, że przy sumowaniu zmiennych losowych o rozkładzie

posiadającym dystrybuantę wyrażoną równaniem (4.31) popełnia się mniejsze błędy niż zakładając – tak jak w metodzie *PERT* – że suma zmiennych losowych o rozkładach *PERT-beta* jest zmienną losową o rozkładzie normalnym.

Golenko-Ginzburg zaleca przyjmować wartość parametru v jako równą 2 (należy go interpretować jako poziom niepewności przedsięwzięcia jako całości), natomiast wartość parametru θ ustalać dla każdego procesu. Na podstawie analizy wartości różnych kwantyli, wartości średniej, wariancji i wartości najbardziej prawdopodobnej Golenko-Ginzburg wykazał, że rozkład o dystrybuancie (4.31) jest bardzo podobny do rozkładu *PERT-beta*.

Alternatywny sposób szacowania wartości oczekiwanej czasu przedstawili Mohan i in. (2007). Wymaga on dokonania dwóch oszacowań $\{t_a, t_m\}$ lub $\{t_b, t_m\}$ przy założeniu logarytmiczno-normalnego rozkładu czasu. Autorzy uważają, że rozkład logarytmiczno-normalny dobrze aproksymuje zmienną losową czasu realizacji procesów, szczególnie w przypadku, gdy rozkłady są prawoskośne.

Do modelowania zmienności czasu realizacji procesów w warunkach ryzyka może być stosowany także rozkład *Weibulla* (McCombs i in. 2009). Wiorkowski (2013) uważa, że ekspertom najłatwiej jest subiektywnie oszacować wartość najbardziej prawdopodobną i wykazał, że jednoparametrowe rozkłady zmienności np. *BetaMax* lub *Burr Type XI* są dobrym przybliżeniem rozkładu czasu realizacji procesów, szczególnie gdy eksperci nie posiadają wiedzy z zakresu rachunku prawdopodobieństwa.

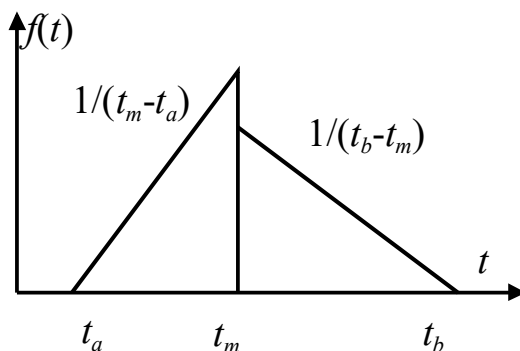
Rozkład trójkątny, oparty o oszacowania czasu optymistycznego t_a , pesymistycznego t_b i czasu najbardziej prawdopodobnego t_m , o gęstości prawdopodobieństwa:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{2(t-t_a)}{(t_m-t_a) \cdot (t_b-t_a)} & \text{dla } t_a \leq t \leq t_m \\ \frac{2(t_b-t)}{(t_b-t_m) \cdot (t_b-t_a)} & \text{dla } t_m \leq t \leq t_b \end{cases}, \quad (4.32)$$

może być również stosowany do opisu czasu realizacji procesów w warunkach ryzyka. Jest on łatwy do interpretacji, nawet dla osób niezwiązanych z modelowaniem procesów budowlanych (Williams 1992, Kotz i van Dorp 2004, Vose 2008). Według Johnsona (1997) rozkład trójkątny – opisany za pomocą prostych zależności analitycznych zrozumiałych dla praktyków – stanowi dobre przybliżenie rozkładu *beta*, stosowanego w metodzie *PERT*, a różnice w ocenie ryzyka przy stosowaniu obu rozkładów są mało znaczące.

Najczęściej popełnianym błędem jest brak oceny przydatności rozkładu trójkątnego po oszacowaniu jego parametrów. Kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa zostaje jednoznacznie narzucony. Po analizie rozkładu może się oka-

zać, że prawdopodobieństwo wystąpienia wartości mniejszych od t_m w stosunku do $P(T > t_m)$ jest nie do zaakceptowania i należy rozważyć założenie, że czas realizacji procesu ma rozkład złożony z dwóch rozkładów trójkątnych jak na rys. 4.5, dla których moda jest równa medianie rozkładu. Niestety w komercyjnych programach do badań symulacyjnych przedsięwzięć ten typ rozkładu nie jest zaimplementowany.



Rys. 4.5. Funkcja gęstości czasu realizacji procesu złożona z dwóch rozkładów trójkątnych

Prawdopodobieństwo, że zmienna losowa czasu realizacji procesu o rozkładzie trójkątnym przyjmie wartość t_a lub t_b jest równe zero. Fakt ten stanowi pewne utrudnienie dla ekspertów przy szacowaniu parametrów zmiennej rozkładu trójkątnego. Z tego powodu wielu autorów (m.in. Johnson 1997, Kotz i van Dorp 2004) zaleca, aby parametry rozkładu trójkątnego czasu realizacji procesów określać na podstawie oszacowań – oprócz wartości modalnej – kwantyli $t_{a,p}$ i $t_{b,r}$ rzędu p i r (najczęściej przyjmuje się $p=0,10$, $q=0,90$ lub $p=0,05$, $q=0,95$). Procedurę obliczania wartości czasów t_a i t_b na podstawie oszacowań wartości kwantyli $t_{a,p}$ i $t_{b,r}$ opracowali Kotz i van Dorp (2004). W pierwszym etapie jest poszukiwane rozwiązanie q^* równania:

$$q = g(q), \quad (4.33)$$

gdzie:

$$g(q) = \frac{(t_m - t_{a,p}) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1-r}{1-q}}\right)}{(t_{b,r} - t_m) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{p}{q}}\right) + (t_m - t_{a,p}) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1-r}{1-q}}\right)}. \quad (4.34)$$

Czasy t_a lub t_b można obliczyć z następujących wzorów:

$$t_a = \frac{t_{a,p} - t_m \sqrt{\frac{p}{q^*}}}{1 - \sqrt{\frac{p}{q^*}}}, \quad (4.35)$$

$$t_b = \frac{t_{b,r} - t_m \sqrt{\frac{1-r}{1-q^*}}}{1 - \sqrt{\frac{1-r}{1-q^*}}}. \quad (4.36)$$

Wartość mody t_m (oszacowanie czasu dla przeciętnych warunków realizacyjnych) może być oszacowana przez ekspertów; można ją również obliczyć na podstawie oszacowań wartości oczekiwanej μ lub mediany m_e w następujący sposób:

$$t_m = 3\mu - t_a - t_b, \quad (4.37)$$

$$t_m = \begin{cases} \frac{2m_e^2 - 4m_e \cdot t_a + t_a^2 + t_a t_b}{t_b - t_a}, & t_m \geq \frac{t_b - t_a}{2} \\ \frac{2m_e^2 - 4m_e \cdot t_b + t_b^2 + t_a t_b}{t_a - t_b}, & t_m \leq \frac{t_b - t_a}{2} \end{cases}. \quad (4.38)$$

Wartość mody (lub wartość oczekiwana) mogą być ustalone na podstawie np. norm pracochłonności. Ponieważ normy pracy są ustalane dla przeciętnych warunków realizacji, w taki sposób ustalona funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa modeluje zmienność czasu wykonania procesu przy przeciętnym stanie warunków realizacyjnych.

W przypadkach, gdy łatwo jest oszacować jedynie wartości skrajne, natomiast trudno jest oszacować modę, może być stosowany – przy braku innych, lepszych danych – rozkład równomierny. Wymaga on oszacowania tylko dwóch wartości. Funkcja gęstości rozkładu równomiernego na przedziale $[t_a, t_b]$ ma postać:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_b - t_a} & \text{dla } t_a \leq t \leq t_b \\ 0 & \text{dla } t < t_a \text{ lub } t > t_b \end{cases}, \quad (4.39)$$

natomiast wartość oczekiwana i wariancja wynoszą odpowiednio:

$$\mu = \frac{1}{2}(t_a + t_b), \quad (4.40)$$

$$\sigma = \frac{1}{12}(t_b - t_a)^2. \quad (4.41)$$

Rozkład równomierny jest stosowany najczęściej w przypadku losowego wyboru jednego z możliwych wariantów, np. w sieciach typu *GERT*, lub do opisu wpływu niektórych czynników ryzyka, np. niekompletności dokumentacji projektowej na czas realizacji procesu.

Dawood (1998) uważa, że przydatnym do modelowania czasu realizacji procesów jest także rozkład trapezowy, np. przy modelowaniu wpływu warunków atmosferycznych lub trudności pozyskania podwykonawców na przebieg ich realizacji.

4.2. Rozmyte modelowanie czasu realizacji procesów budowlanych

Teoria zbiorów rozmytych, zaproponowana przez Zadeha (1965), stanowi alternatywne podejście w stosunku do metod probabilistycznych, mające na celu uwzględnienie warunków ryzyka i niepewności w planowaniu przedsięwzięć. Pozwala ona na wykorzystanie nieprecyzyjnych danych w zarządzaniu przedsięwzięciami (Kuchta 2001, Ibadow i Kulejewski 2010). Pionierską pracę w zakresie wykorzystania logiki rozmytej do planowania przedsięwzięć opublikowali Chanas i Kamburowski (1981).

Zbiór rozmyty A w przestrzeni X jest definiowany jako zbiór uporządkowanych par $A = \{(x, \mu_A) : x \in X\}$, gdzie $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ nosi nazwę stopnia przynależności (uczestnictwa) w zbiorze rozmytym. Liczbą rozmytą jest określany zbiór rozmyty $A \subseteq R$, którego funkcja przynależności $\mu_A(x)$ spełnia następujące warunki (Rutkowska i in. 1997):

1. zbiór jest normalny, czyli istnieje przynajmniej jeden element x^* , taki że $\mu_A(x^*) = 1$,
2. zbiór jest wypukły, tzn.
 $\forall x_1, x_2 \in X \quad \forall \lambda \in [0, 1] : \mu_A(\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$,
3. jest przedziałami ciągła.

Te własności liczby rozmytej powodują, że są one szczególnie przydatne do modelowania nieprecyzyjnych określeń opisanych przez zmienne lingwistyczne.

Jeżeli dane są dwie liczby rozmyte A oraz B , to operacja arytmetyczna $(*)$ – taka jak dodawanie $(+)$, odejmowanie $(-)$, mnożenie (\cdot) , dzielenie $(/)$ – może być realizowana za pomocą zasady rozszerzania (Ross 1995):

$$\mu_{A*B}(z) = \sup_{\substack{x, y \\ z=x*y}} \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4.42)$$

W praktyce zazwyczaj wykorzystuje się liczby rozmyte trójkątne, trapezowe lub ogólnie – liczby typu L - R (Kuchta 2001). Liczba rozmyta A jest typu L - R , jeżeli jej funkcja przynależności ma następującą postać (Dubois i Prade 1978):

$$\mu_A = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha_A}\right) & \text{gd } x \leq m \\ R\left(\frac{x-m}{\beta_A}\right) & \text{gd } x \geq m \end{cases}, \quad (4.43)$$

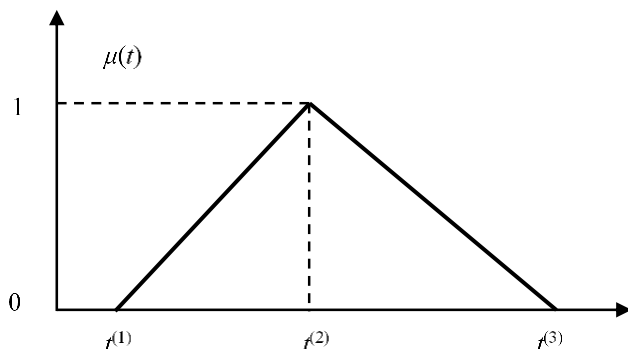
gdzie: m jest liczbą rzeczywistą nazywaną wartością średnią ($\mu_A(m) = 1$), natomiast $\alpha_A > 0$ i $\beta_A > 0$ są liczbami rzeczywistymi nazywanymi rozrzutem odpowiednio lewo- i prawoskośnym.

L i R , nazywane funkcjami bazowymi, są nierosnącymi funkcjami na przedziale $[0, \infty)$, spełniającymi następujące warunki: $L(-x) = L(x)$, $R(-x) = R(x)$, $L(0) = 1$, $R(0) = 1$.

Liczbę rozmytą typu L - R można zapisać również w postaci $A = (\mu_A, \alpha_A, \beta_A)$, a podstawowe operacje na liczbach rozmytych tego typu prowadzą się do operacji na trzech parametrach: μ_A , α_A i β_A . Parametry te są najczęściej ustalane są na podstawie opinii ekspertów, poprzez przypisanie możliwym argumentom stopnia przynależności $\mu_A \in [0, 1]$.

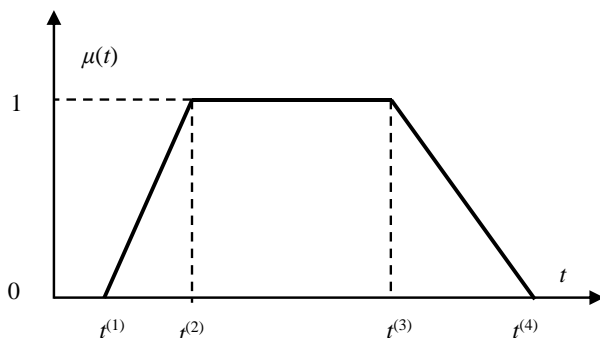
Sposób konstruowania funkcji przynależności na podstawie posiadanych oszacowań nie jest jednoznaczny i zależy od subiektywnych uwarunkowań, którymi kieruje się modelujący (Chanas i Radosiński 1976). Pewne reguły ustalenia parametrów liczb rozmytych, które mogą mieć zastosowanie w najbardziej powtarzalnych przypadkach, np. do modelowania czasu realizacji procesu, zostały przedstawione m.in. przez Kulejewskiego i in. (2011) oraz Chanasa i Kambrurowskiego (1981). Rommelfanger (1990), w celu określenia funkcji przynależności czasu wykonania procesów, proponuje pozyskiwanie od ekspertów wartości optymistycznej i pesymistycznej na trzech poziomach przynależności, przez co liczba rozmyta jest określana na podstawie sześciu oszacowań.

Trójkątna liczba rozmyta, modelująca czas realizacji procesu (rys. 4.6), określa czas wykonania procesu jako „około” $t^{(2)}$, przy czym jest możliwy czas między $t^{(1)}$ a $t^{(3)}$, a najbardziej możliwy jest czas $t^{(2)}$.



Rys.4.6. Czas wykonania procesu będący trójkątną liczbą rozmytą

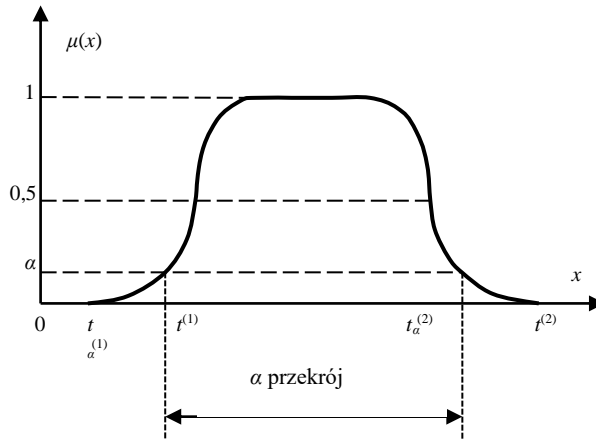
Czas realizacji procesu jest określany mniej precyzyjnie za pomocą trapezowych liczb rozmytych, zapisywanych w notacji wielopunktowej jako czwórka liczb rzeczywistych $(t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, t^{(4)})$ (rys. 4.7). Czas wykonania procesu można określić w przybliżeniu między $t^{(2)}$ i $t^{(3)}$. Czas w przedziale $(t^{(2)}, t^{(3)})$ jest najbardziej możliwy. Czasy krótsze od $t^{(1)}$ i dłuższe od $t^{(4)}$ są niemożliwe, a czasy zawarte między $t^{(3)}$ i $t^{(4)}$ oraz $t^{(1)}$ i $t^{(2)}$ są mniej możliwe od tych zawartych w przedziale $(t^{(2)}, t^{(3)})$ (Ibadov i Kulejewski 2010).



Rys.4.7. Czas wykonania procesu będący trapezową liczbą rozmytą

Przez α przekrój liczby rozmytej A rozumie się zbiór nierozmyty (ostrzy) A_α , do którego należą wszystkie elementy, których stopień przynależności do A jest większy od α (Rutkowska i in. 1997) – rysunek 4.8:

$$A_\alpha = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \forall \alpha \in [0, 1], \quad (4.44)$$



Rys. 4.8. Rozmyty czas wykonania procesu określony przez α przekroje

Analiza modelu sieciowego, w którym czasy wykonania procesów są liczbami rozmytymi, prowadzi do ustalenia terminów rozpoczynania i ukończenia, zapasów czasu procesów oraz długości dróg w sieci w postaci rozmytej (Chanas i Zieliński 2001, Chen i Huang 2007).

Kuchta (2001) uważa, że podejście probabilistyczne i rozmyte się wzajemnie uzupełniają. Czasy wykonania procesów budowlanych mają charakter losowy, ale ze względu na niepowtarzalność warunków ich wykonania, wybór rozkładu prawdopodobieństwa dokonywany jest arbitralnie, co w wielu przypadkach może prowadzić do niewiarygodnych wyników. Decydent może mieć jednak pewien pogląd na temat stopnia możliwości wystąpienia określonych wartości. Dlatego jest konieczne wykorzystywanie dwóch grup danych o charakterze: probabilistycznym i posybilistycznym. Ujęcie posybilistyczne jest ściśle związane z teorią możliwości (Zadeh 1978).

Funkcja π , zwana rozkładem możliwości, reprezentuje wiedzę decydenta o możliwych wartościach danej wielkości np. czasu realizacji procesu budowlanego. Rozkład możliwości jest utożsamiany z liczbą rozmytą taką, że $\pi_A = \mu_A$, co sprawia, że w analizie niepewności możemy wykorzystać metodologię teorii zbiorów rozmytych. Z drugiej jednak strony, teoria możliwości podlega takiej samej krytyce, jak teoria zbiorów rozmytych. Przede wszystkim nie ma powszechnie przyjętego sposobu pomiaru miary możliwości (Hryniewicz 2004).

Szansa zdarzenia T jest określana poprzez miarę możliwości *Pos* (ang. *possibility*):

$$Pos(T) = \sup_{s \in T} \pi(s), \quad (4.45)$$

i dualną do niej miarę konieczności *Nec* (ang. *necessity*):

$$Nec(T) = 1 - Pos(\bar{T}), \quad (4.46)$$

a \bar{T} to zdarzenie „nie T ”.

Często miary konieczności i możliwości zdarzenia interpretuje się jako granice przedziału prawdopodobieństwa wystąpienia tego zdarzenia (Kuchta 2001).

Problem transformacji możliwość \rightarrow prawdopodobieństwo lub prawdopodobieństwo \rightarrow możliwość został po raz pierwszy przedstawiony przez Zadeha (1978) wraz z powstaniem teorii możliwości i był przedmiotem zainteresowania wielu badaczy np. Dubois i in. 2004, Klir (1990), Geer i Klir (1992), Leung 1980, Yamada 2001. W wyniku transformacji prawdopodobieństwo \rightarrow możliwość część informacji jest tracona. Transformacja odwrotna wymaga dodatkowych, często arbitralnych informacji. W pracach Dubois i in. 1993, Dubois i in. 2004 przedstawiono najbardziej znany sposób transformacji.

Transformacja prawdopodobieństwo \rightarrow możliwość, (Dubois i in. 2004), bazuje na zależności:

$$\pi^*(x) = \sup \left\{ 1 - P(L_\alpha^*), x \in L_\alpha^* \right\}, \quad (4.47)$$

gdzie: π^* jest funkcją poszukiwanego rozkładu możliwości, L_α^* to przedział ufności dla punktowego estymatora x^* pewnej „realnej” wartości, natomiast α to poziom istotności, tzn. $P(L_\alpha^*) = \alpha$.

Funkcję π^* rozkładu możliwości można wyznaczyć poprzez α przekroje takie, że $\alpha = 1 - P(L_\alpha^*)$.

Transformację możliwość \rightarrow prawdopodobieństwo można wykonać metodą symulacji, powtarzając następujące kroki (Dubois i in. 1993):

- wylosuj zgodnie z rozkładem równomiernym wartość α^* z przedziału $(0, 1]$ i określ α przekrój taki, że $L_{\alpha^*} = \{x : \pi(x) \geq \alpha^*\}$,
- wylosuj wartość x^* z L_{α^*} .

W przypadku ciągłej funkcji rozkładu możliwości, transformacji można dokonać w sposób następujący (Dubois 1993):

$$f \left(x = \int_0^{\pi(x)} \frac{d\alpha}{|L_\alpha|} \right), \quad (4.48)$$

gdzie: $|L_\alpha|$ długość α przekroju funkcji π .

Zagadnieniem otwartym pozostaje użyteczność rozmytego modelu jako podstawy w planowaniu i zarządzaniu przedsięwzięciem (Chanas i Radosiński 1976). Brak jest dowodów, że wykorzystanie rozmytych modeli czasu wykonania procesów zwiększa niezawodność planowania przedsięwzięć. Literatura przedmiotu pomija całkowicie etap kontroli realizacji przedsięwzięć i brak jest sprawozdań z realizacji przedsięwzięć planowanych metodami „rozmytymi” (Kuchta 2001). Wśród części praktyków istnieje przekonanie, że ujęcie to jest zbyt teoretyczne i trudne do implementacji. Widoczny jest wyraźny rozdźwięk między nauką a praktyką w kontekście metod zarządzania przedsięwzięciami (Zoła 2014).

4.3. Metody estymacji dyspersji czasu realizacji procesów budowlanych w warunkach ryzyka

W modelach probabilistycznych przedsięwzięć zakłada się znajomość typu i parametrów rozkładu czasu realizacji procesów. W ostatnich latach badacze i praktycy podejmują próby uwzględnienia występowania potencjalnych czynników ryzyka przy prognozowaniu czasu realizacji procesów. W tym celu jest konieczne oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia czynnika ryzyka i jego wpływu na czas realizacji.

Ganame i Chaudhari (2015) zaproponowali, aby oceny prawdopodobieństwa wystąpienia oraz siły wpływu czynników ryzyka dokonywali wspólnie inżynierowie ze strony wykonawcy, inwestora i niezależni konsultanci. Przy ocenie siły oddziaływania czynników może być stosowana trójstopniowa skala, która wyróżnia czynniki o niskim, średnim i silnym oddziaływaniu. Ww. autorzy wpływ wystąpienia czynnika ryzyka o niskiej sile oddziaływania uwzględniają poprzez zmniejszenie oszacowanej wartości czasu optymistycznego o 5% i zwiększenie wartości czasu pesymistycznego o 20%, o średniej sile – poprzez zmniejszenie wartości czasu optymistycznego o 15% i zwiększenie wartości czasu pesymistycznego o 50%, natomiast o wysokiej sile oddziaływania – odpowiednio o 20 i 100%.

Dawood (1998) opracował metodę umożliwiającą zwiększenie dokładności oszacowań czasu realizacji przedsięwzięć poprzez zastosowanie modelowania symulacyjnego. Zaproponowana przez Dawooda (1998) metoda obejmuje następujące etapy: identyfikacja czynników ryzyka, modelowanie czynników ryzyka i ich wpływu na zmienność czasu wykonania procesów, opracowanie modelu symulacyjnego i badania symulacyjne z zastosowaniem zmodyfikowanej metody *Monte Carlo*. Zarówno przy modelowaniu czynników ryzyka, jak ich wpływu na czas realizacji procesów, jest wykorzystywana wiedza ekspertów i dane historyczne. Ryzyko związane z danym czynnikiem jest modelowane za pomocą zmiennej losowej o funkcji gęstości prawdopodobieństwa określonej na przedziale $(0, 1)$. Typ rozkładu prawdopodobieństwa jest ustalany arbitralnie. Po-

dobnie jak w metodzie *Monte Carlo*, w kolejnych przebiegach symulacyjnych dla każdego czynnika oddziałującego na czas realizacji poszczególnych procesów są generowane liczby losowe zgodnie z założonym rozkładem prawdopodobieństwa. Zakłada się przy tym, że ryzyko związane z niektórymi czynnikami (np. warunki funkcjonalno-przestrzenne placu budowy, warunki gruntowe) jest niezmiennie w czasie, oddziaływanie innych jest zmienne. Czynniki mogą również w różny sposób oddziaływać na różne procesy. W przypadkach zmiennego oddziaływania liczby losowe są generowane odrębnie dla każdego procesu (lub grupy procesów) lub terminu realizacji.

Wpływ poszczególnych czynników na czas wykonania procesu jest określany procentowo (suma oddziaływań wszystkich czynników na czas danego procesu jest równa 100%). Czas realizacji każdego procesu w każdym przebiegu symulacyjnym jest obliczany na podstawie następującej zależności:

$$t = t_a + [t_b - t_a] \cdot \frac{[(RF_1 \cdot Ran_1 + (RF_2 \cdot Ran_2) + \dots + (RF_m \cdot Ran_m)]}{\dots}, \quad (4.49)$$

gdzie: t_a – najkrótszy czas wykonania procesu, t_b – najdłuższy czas wykonania procesu, RF_j – wpływ procentowy czynnika j na czas wykonania procesu, Ran_j – liczba losowa wygenerowana zgodnie z rozkładem prawdopodobieństwa ryzyka dla czynnika j .

Na podstawie ustalonych czasów realizacji procesów w poszczególnych przebiegach symulacyjnych jest obliczany czas realizacji przedsięwzięcia zgodnie z metodą *CPM*. Badania symulacyjne umożliwiają wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji przedsięwzięcia (a także poszczególnych procesów) oraz określenie wpływu poszczególnych czynników na przebieg jego wykonania.

Możliwość praktycznego zastosowania opracowanej przez Dawooda metody jest ograniczona m.in. ze względu na:

- konieczność posiadania dużego doświadczenia i wiedzy przy doborze typów i parametrów zmiennych losowych częstości wystąpienia poszczególnych czynników,
- subiektywność dokonywanych ustaleń przy modelowaniu czynników ryzyka i częstości wystąpienia i wpływu czynników ryzyka na czas realizacji procesów, możliwość popełnienia błędów w tym zakresie,
- korzystanie z danych historycznych, które są gromadzone w przedsiębiorstwach wykonawczych w ograniczonym zakresie.

Skorupka (2002) przedstawił podobny algorytm generowania zakłóceń wpływających na czas realizacji procesów. Autor przyjął, że są znane procentowe granice zmniejszenia liczby jednostek zasobów odnawialnych (pracowni-

ków, maszyn i sprzętu), a wielkość zakłóceń ma rozkład równomierny na przedziale $[0, r]$, gdzie r to granica zmniejszenia zasobów. Czas zakłócenia w trakcie realizacji procesu jest obliczany jako iloczyn czasu planowanego jego wykonania oraz liczby losowanej z przedziału $(0, 1)$. Zakłócenia wpływają na wydajność jednostek organizacyjnych i tym samym na czas realizacji procesów. Metoda ta może być łatwo zaimplementowana w metodach symulacyjnych analizy przedsięwzięć budowlanych i może być stosowana w przypadku braku możliwości określenia rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia zakłóceń realizacyjnych i bezpośredniego ustalenia wielkości ich wpływu na czas wykonania procesu.

Carr (1979) przedstawił model symulacyjny *MUD (Model for Uncertainty Determination)*, w którym czasy realizacji procesów są uzależnione od warunków realizacyjnych. Procesy zostały podzielone na podatne i niepodatne na wpływ pogody, a siła oddziaływania pogody została uzależniona od pory roku. Model *MUD*, w udoskonalonej wersji, jest modułem systemu *DYNASTRAT (DYNAMIC-STRATegy)* do symulacyjnej analizy przedsięwzięć z ograniczoną dostępnością zasobów (Padilla i Carr 1991). Podstawą ustalania czasu wykonania procesów budowlanych jest wydajność zmianowa w_0 ustalana na podstawie norm pracochłonności. Liczba wykonanych każdego dnia r jednostek robót w_r jest uaktualniana w zależności od warunków realizacyjnych:

$$w_r = w_0 \cdot \prod_j s_{j,r}, \quad (4.50)$$

gdzie: $s_{j,r}$ – wpływ czynnika j na wydajność dzienną w warunkach realizacyjnych, jakie wystąpią w dniu r .

Woolery i Crandall (1983) zakładają, że zmienna losowa czasu realizacji procesu jest sumą zmiennej losowej czasu wykonania w warunkach optymalnych i sumą zmiennych losowych wydłużeń spowodowanych czynnikami ryzyka. Czynniki oddziałujące na proces są traktowane jako niezależne, natomiast częstość oddziaływania tego samego czynnika na różne procesy może być jednakowa.

W metodzie *PRODUF (Project Duration Forecast)* opracowanej przez Ahuja i Nandakumara (1985) jest obliczany dzienny przyrost wykonanych jednostek pracy, a wydajność dzienna jest uzależniona od wystąpienia czynników ryzyka. Stosowanie metody *PRODUF* wymaga pozyskania dużej liczby danych historycznych pozwalających na ustalenie właściwych rozkładów opisujących wpływ czynników ryzyka na wydajność.

Nasir i in. (2003) opracowali metodę wspomagającą oszacowanie pesymistycznego i optymistycznego czasu realizacji procesów przy zastosowaniu modelu sieci przekonań. Wartości te są wykorzystywane przy analizie ryzyka czasu

przedsięwzięcia z zastosowaniem metody *PERT* lub symulacji *Monte Carlo* przy założeniu, że czasy wykonania procesów są zmiennymi losowymi o rozkładzie *PERT-beta* lub trójkątnym. Procedura tworzenia sieci przekonań obejmuje cztery etapy: identyfikacja czynników ryzyka (na podstawie badań literaturowych i doświadczenia ekspertów), ustalenie zależności między czynnikami (na podstawie opinii ekspertów) oraz określenie struktury sieci oraz oszacowanie prawdopodobieństw warunkowych ryzyk (na podstawie wywiadów z ekspertami). Model obejmuje dwa rodzaje zmiennych (wierzchołków sieci): warunki realizacji – generujące czynniki ryzyka, oddziałujące na harmonogram – oraz zmienne wyjściowe – reprezentujące czasy realizacji procesów (optymistyczne i pesymistyczne oszacowania). Stany zmiennych czasu w metodzie Nasira i in. (2003) określono w procentach czasu najbardziej prawdopodobnego (np. dla robót fundamentowych zmienna czasu pesymistycznego przyjmuje cztery stany: 125%, 150%, 175% i 200% czasu najbardziej prawdopodobnego, a zmienna czasu optymistycznego trzy stany: 95%, 85% i 75% czasu najbardziej prawdopodobnego). Dopuszczalny zakres zmienności czasu realizacji przyjęto arbitralnie bez weryfikacji założeń. W wyniku analizy sieci uzyskano prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych stanów zmiennych wyjściowych. Czasy optymistyczne i pesymistyczne ustalano jako wartości oczekiwane uzyskanych wyników. Opracowanie modelu zaproponowanego przez Nasira i in. (2003) dla jednej grupy procesów wymagało oszacowania 476 prawdopodobieństw warunkowych. Pozyskiwanie danych i określenie struktury sieci trwało sześć tygodni, co może ograniczać możliwość praktycznego stosowania metody.

Creemers i in. (2014) postulują, aby wstępnie ustalony czas realizacji procesu i był powiększany o wartość poprawki $m_{i,j}$ w przypadku wystąpienia czynnika ryzyka j . W przypadku wystąpienia wielu czynników ryzyka poprawki te są sumowane. W proponowanej przez nich metodzie wystąpienie czynnika ryzyka jest modelowane za pomocą zmiennych losowych o rozkładzie równomiernym, a efekt oddziaływania ryzyka jest uwzględniany poprzez wydłużenie zakresu zmienności czasu realizacji procesów. W metodzie tej założono trójkątne rozkłady czasu realizacji procesów i po dodaniu poprawek (do czasu minimalnego, najbardziej prawdopodobnego i maksymalnego) rozkłady nadal mają typ trójkątny. Ww. autorzy wyodrębnili dwa rodzaje czynników ryzyka: czynniki o silnym wpływie na czas realizacji procesów i małym prawdopodobieństwem wystąpienia oraz czynniki o małym wpływie i dużej częstotliwości występowania. Badania symulacyjne prowadzone były metodą *Monte Carlo*. Prawdopodobieństwa wystąpienia czynników ryzyka oraz ich siły oddziaływania były przyjmowane na podstawie doświadczenia ww. autorów.

Anastasiou i Tsekos (1996) zaproponowali metodę wymagającą wyróżnienia różnych stanów warunków otoczenia, wpływających na czas i możliwość realizacji procesów, którym należy przypisać różne stopnie osiągnięcia pełnej wydajności, np.: stan 1 – który charakteryzuje pełną wydajność (stopień wydajności

$r = 1$), stany pośrednie 2, 3, 4 o stopniach wydajności $r = 0,75$, $r = 0,5$, $r = 0,25$, stan 5 ($r = 0$), w którym występuje brak możliwości prowadzenia robót.

Zmiana stanów jest opisana łańcuchem Markowa (jest to ciąg zdarzeń, w którym prawdopodobieństwo każdego zdarzenia zależy jedynie od wyniku poprzedniego), a prawdopodobieństwo przejścia do stanu l ze stanu k wynosi:

$p_{kl} = N_{kl} / N_k$, gdzie N_{kl} jest to liczba zaobserwowanych przejść ze stanu k do l , natomiast N_k – liczba zaobserwowanych stanów k otoczenia. Można założyć

różne macierze prawdopodobieństw przejścia dla okresów letnich i zimowych. Czas dzielony jest na okresy o takiej długości Δt , aby w tych okresach warunki otoczenia można traktować jako niezmiennie. Szacowany czas z realizacji procesu o wstępnie ustalonym czasie t (bez uwzględnienia wpływu otoczenia) jest

obliczany na podstawie następującej zależności: $\Delta t \cdot \sum_{s=1}^z r_s \geq t$. Prezentowany

model jest jednoczynnikowy i został zastosowany do planowania przedsięwzięcia z zakresu budownictwa morskiego. W tym przypadku najważniejszym czynnikiem wpływającym na czas realizacji procesów jest wysokość fali. Obliczone czasy (na podstawie generowanych stanów otoczenia w poszczególnych okresach) mogą być wykorzystane w metodzie symulacji *Monte Carlo*.

Skorupka (2007) zaproponował metodę identyfikacji oraz ilościowej oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć budowlanych (*MOCRA*), pozwalającą na ocenę skutków strategii zmniejszania ryzyka oraz alokację ryzyka pozostającego w planie rzeczowo-finansowym przedsięwzięcia. Ocena ryzyka, przeprowadzana na poziomie makro branży budowlanej i na poziomie realizowanego przedsięwzięcia, wspomaga podjęcie decyzji o przystąpieniu do jego realizacji. Zastosowanie metody umożliwia w dalszym etapie ponowną weryfikację czynników ryzyka oraz analizę możliwości zmniejszenia ich niekorzystnego wpływu lub całkowitą eliminację. Ryzyko dla poszczególnych czynników (na każdym poziomie oceny) jest obliczane jako iloczyn oszacowań prawdopodobieństwa wystąpienia czynnika i konsekwencji (wydłużenia czasu realizacji), określanej w procentach. Zaproponowana metoda alokacji ryzyka w harmonogramie została oparta na założeniu, że opisane i skwantyfikowane czynniki ryzyka, które oddziałują na przebieg wykonania określonego procesu mogące powodować potencjalne zwiększenie czasu jego realizacji, można sumować i odnosić bezpośrednio do czasu pesymistycznego. Zwiększenie wartości czasu pesymistycznego powoduje zmianę wartości oczekiwanej, ale również – w przypadku permanentnych zakłóceń – wartości modalnej funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu.

Założenie o addytywności oddziaływań czynników ryzyka jest niekiedy trudne do zaakceptowania w praktyce. Efekt oddziaływania dwóch zakłóceń występujących jednocześnie nie jest zawsze sumą oddziaływań niezależnych. Dużą

zaletą metody *MOCRA* jest jej łatwość stosowania, co może zachęcić zespoły planujące realizację przedsięwzięć do jej wdrożenia w praktyce.

Schatteman i in. (2008) opracowali podejście do zarządzania ryzykiem zintegrowane z proaktywnym harmonogramowaniem przedsięwzięć budowlanych. Wyniki identyfikacji, analizy czynników ryzyka oraz kwantyfikacji częstości ich występowania i siły oddziaływania na czasy realizacji procesów są wykorzystywane w heurystycznej procedurze tworzenia harmonogramów odpornych na zakłócenia (dla których koszty niestabilności są minimalne), dla ustalonych terminów dyrektywnych ich zakończenia.

Schatteman i in. (2008) stosują tzw. agresywne oszacowania czasu wykonania procesów przy budowie harmonogramu bazowego. Kontyngencja czasu nie jest uwzględniana w oszacowaniach, czas wykonania procesu jest określany dla warunków najbardziej korzystnych (scenariusz optymistyczny). oszacowanie tzw. „agresywne”) – w odróżnieniu od metody łańcucha krytycznego Goldratta, gdzie czasy są równe medianie lub wartości średniej zmiennej losowej. Identyfikacja i analiza czynników ryzyka jest przeprowadzana dla poszczególnych grup procesów o zbliżonej podatności na ich oddziaływanie. Celem analizy ryzyka jest ilościowa ocena wpływu najważniejszych czynników na czasy realizacji procesów. Pomija się czynniki o niewielkim prawdopodobieństwie wystąpienia i małej sile oddziaływania na czasy wykonania procesów.

W metodzie Schattemana i in. (2008), wpływ czynników na wydłużenie czasu realizacji procesów jest modelowany za pomocą zmiennych losowych o trójkątnych funkcjach gęstości prawdopodobieństwa $f(x)$. Parametry rozkładów są określane na podstawie następujących oszacowań: q – częstotliwości występowania czynnika, b – wydłużenia czasu realizacji procesu dla scenariusza pesymistycznego (silne oddziaływanie czynnika ryzyka), $\zeta(b)$ – częstotliwości występowania scenariusza pesymistycznego dla przedsięwzięć o podobnym charakterze, realizowanych w przeszłości, a – wydłużenia czasu realizacji procesu dla scenariusza optymistycznego, $\zeta(a)$ – częstotliwości występowania scenariusza optymistycznego dla przedsięwzięć o podobnym charakterze, realizowanych w przeszłości. Weryfikacja oszacowań dokonywanych przez kadrę zarządzającą przedsięwzięciem polega na sprawdzeniu spełnienia warunku: $q \geq \zeta(a) + \zeta(b)$.

Czasy a i b stanowią jednocześnie oszacowania końców przedziału zakresu zmienności zmiennej losowej czasu wydłużenia realizacji procesu przy oddziaływaniu danego czynnika ryzyka. Wartość najbardziej prawdopodobna c jest określana na podstawie następującej zależności:

$$c = a + (b - a) / (1 + \zeta(a) / \zeta(b)), \quad (4.51)$$

określonej przy założeniu, że iloraz częstotliwości $\zeta(a)/\zeta(b)$ jest dobrym oszacowaniem ilorazu prawdopodobieństw $P(a)/P(b) = F(a+\varepsilon)/1-F(b-\varepsilon)$ wystąpienia zakłócenia wywołującego oddziaływanie, zgodnego odpowiednio ze scenariuszem optymistycznym lub pesymistycznym, z uwzględnieniem przedziału ufności oszacowań o długości ε .

Typy i parametry rozkładu czasu wykonania procesów poddanych oddziaływaniu wielu czynników są określane przy założeniu, że liczba k wystąpień czynnika ryzyka ma rozkład Poissona z funkcją gęstości prawdopodobieństwa daną wzorem:

$$f(k; \lambda_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^k}{k!}, \quad (4.52)$$

a parametr λ_i procesu i , należącego do grupy procesów AG, jest obliczany według następującej zależności:

$$\lambda_i = \frac{\nu_i q}{\sum_{\forall j \in AG} \nu_j}, \quad (4.53)$$

Wartości wag ν_j zależą od właściwości czynnika ryzyka. Jeżeli parametr λ_i nie jest zależny od czasu wykonania procesu j , przyjmuje się $\nu_j = u_j$, gdzie u_j jest zmienną binarną, która przyjmuje wartość 1, gdy dany czynnik wpływa na czas procesu j , 0 – w przeciwnym przypadku. Jeżeli wystąpienie czynnika ryzyka jest zależne od czasu wykonania procesu j , przyjmuje się $\nu_j = d_j^* \cdot u_j$, gdzie d_j^* jest agresywnym (optymistycznym) oszacowaniem czasu procesu j .

Za pomocą badań symulacyjnych jest określana funkcja gęstości zmiennej losowej d_i czasu wykonania każdego procesu. W pierwszym etapie jest generowana liczba wystąpień k , następnie dla każdego wystąpienia l , przy zastosowaniu metody odwracania dystrybuanty, jest generowane wydłużenie czasu x_l . Czas wykonania procesu w danym przebiegu symulacyjnym jest obliczany jako suma agresywnego oszacowania czasu i wydłużeń spowodowanych wystąpieniami wszystkich analizowanych czynników ryzyka. Analiza wyników wielu przebiegów symulacyjnych umożliwia określenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu wykonania procesu. Jest ona następnie aproksymowana za pomocą funkcji gęstości teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa (np. trójkątnego).

Dokładność uzyskiwanych wyników w metodzie Schattemana i in. (2008) zależy w dużej mierze od jakości informacji pozyskiwanych od ekspertów, szacujących dane wejściowe modelu. Duża liczba wymaganych oszacowań stwarza

zagrożenie kumulacji błędów, a ograniczenie liczby analizowanych czynników ryzyka do kilkunastu najważniejszych może powodować pominięcie istotnego łącznego wpływu czynników mniej ważnych.

Zayed i in. (2013) do szacowania wydłużenia czasu realizacji procesów krytycznych oraz terminu realizacji przedsięwzięcia wykorzystują współczynnik kontyngencji czasu C . Kontyngencja jest tu rozumiana jako niezbędny bufor czasu, ulokowany na końcu przedsięwzięcia, w celu zapewnienia dotrzymania terminu dyrektywnego. Planowany czas realizacji przedsięwzięcia t_p , z uwzględnieniem oddziaływania czynników ryzyka może być obliczony jako:

$$t_r = t_p + t_c = t_p + C \cdot t_p = (1 + C) \cdot t_p, \quad (4.54)$$

gdzie: t_p – planowany (bez uwzględniania czynników ryzyka) czas realizacji przedsięwzięcia, t_c – kontyngencja czasu przedsięwzięcia, C – współczynnik kontyngencji czasu.

Zayed i in. (2013) zaproponowali dwa sposoby obliczania wskaźnika kontyngencji: wykorzystanie klasycznej metody *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*) oraz połączenie *AHP* z metodą symulacji cyfrowej. Oba sposoby wykorzystują tę samą zależność, na podstawie której jest obliczany współczynnik kontyngencji czasu:

$$C = \sum_{j=1}^m w_j \cdot P_j \cdot S_j, \quad (4.55)$$

gdzie: w_j – waga czynnika ryzyka j , P_j – prawdopodobieństwo jego wystąpienia a S_j to siła oddziaływania czynnika ryzyka j na czas realizacji przedsięwzięcia.

Zaproponowano następującą hierarchię czynników ryzyka, obejmującą ich trzy kategorie:

- Czynniki wynikające z potencjału przedsięwzięcia – lokalizacja budowy, wielkość przedsięwzięcia, dostępność sprzętu, dostępność materiałów.
- Czynniki wynikające ze sposobu zarządzania przedsięwzięciem – relacje inwestora z wykonawcą, stan techniczny wyposażenia budowy, liczba zmian projektowych, opóźnienia w płatnościach za roboty budowlane, czas podejmowania decyzji zarządczych, zmiany w wydajności pracy brygad i sprzętu.
- Czynniki zewnętrzne, wynikające z otoczenia – warunki pogodowe, warunki posadowienia, możliwość strajku pracowników, absencja pracowników.

Oceny czynników ryzyka i prawdopodobieństwa ich wystąpienia zostały ustalone metodą badań ankietowych i bezpośrednich wywiadów.

W wariancie pierwszym proponowanej przez ww. autorów metody obliczono metodą *AHP* wagi grup czynników ryzyka oraz wagi poszczególnych czynników w obrębie każdej grupy (waga w_j czynnika ryzyka j jest iloczynem tych wartości). Prawdopodobieństwa wystąpienia i oceny czynników zostały przyjęte jako średnie z ocen ekspertów.

W wariancie drugim – na podstawie uzyskanych od ekspertów ocen, w pierwszej kolejności obliczono wagi w_i czynników ryzyka metodą *AHP*, a następnie ustalono rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych losowych w_j , P_j , S_j . Wartość współczynnika kontyngencji C była wielokrotnie obliczana w kolejnych przebiegach symulacji (na podstawie wyrażenia (4.55), a wynikiem analiz jest rozkład zmiennej losowej tej wielkości. W badaniach uzyskano wartość średnią współczynnika C zbliżoną do wartości ustalonej metodą *AHP*. Autorzy weryfikację proponowanej metody przeprowadzili na przykładzie siedmiu przedsięwzięć budowlanych.

Metoda zaproponowana przez Jaśkowskiego (2015) polega na określaniu parametrów rozkładu trójkątnego czasu realizacji procesów budowlanych dla różnych ocen stanu warunków realizacyjnych. Miarę ryzyka związanego z decyzją o ustaleniu czasu realizacji procesu i , jako równego wartości t_i , obliczano z następującego wzoru:

$$r^{PC}(t_i) = \int_{t_i}^{b_i^{PC}} (x - t_i) \cdot f_i^{PC}(x) dx, \quad (4.56)$$

gdzie: $r^{PC}(t_i)$ – miara ryzyka związanego z decyzją o ustaleniu czasu wykonania procesu i , jako równego wartości t_i , dla oceny stanu warunków realizacyjnych równej PC ; jest to wartość oczekiwana wartości wydłużenia czasu wykonania procesu, $f_i^{PC}(x)$ – trójkątna funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji procesu j , przy ocenie stanu warunków realizacyjnych równej PC , o parametrach a_i^{PC} , m_i^{PC} , b_i^{PC} .

Ocenę zagregowaną stanu warunków realizacyjnych PC obliczano jako sumę ważoną stanu poszczególnych warunków, zgodnie z wyrażeniem:

$$PC = \sum_{j=1}^m pc_j \cdot w_j, \quad (4.57)$$

gdzie: pc_j – ocena stanu warunku j , w_j – waga warunku j , m – liczba warunków realizacyjnych.

Wyznaczono przybliżone parametry rozkładu zmiennej losowej czasu dla dowolnych wartości ocen PC i opracowano nomogramy ułatwiające stosowanie

metody. Do ustalenia wartości wag w_i zaproponowano zastosowanie metody *AHP*.

4.4. Przewidywanie czasu realizacji procesów budowlanych

Na przebieg realizacji procesów budowlanych oddziałuje wiele czynników ryzyka (czynniki pogodowe, nieterminowe dostawy wyrobów budowlanych itp.). Są one źródłem ryzyka oszacowań kosztów, czasu realizacji i jakości produkcji budowlanej. Prezentowane w literaturze modele predykcyjne mają na celu wyjaśnienie relacji między zmiennymi niezależnymi modelu (czynnikami ryzyka) a zmiennymi zależnymi, opisującymi podstawowe parametry organizacji i poziom nakładów (czas i koszt) procesów budowlanych, stanowiące miary strat związanych z ryzykiem. Przy tworzeniu modeli predykcyjnych są stosowane przede wszystkim: regresja statystyczna (Janusz 2007, Thomas i Yiakoumis 1987), sieci neuronowe (AbouRizk i in. 2001, Ezeldin i Sharara 2006, Moselhi i in. 1991), modelowanie matematyczne oraz systemy ekspertowe (Mohan 1990) i logika rozmyta (Fayek i Oduba 2005, Georgy i in. 2005).

Stosowanie techniki regresji statystycznej wymaga dysponowania dużą liczbą obserwacji z realizacji wielu przedsięwzięć. Analiza regresji wykorzystuje dane rzeczywiste, uzyskiwane wyniki można zatem uznać za bardziej obiektywne niż przy zastosowaniu metod uwzględniających subiektywne oceny ekspertów. Podejście to umożliwia nie tylko wyróżnienie najbardziej istotnych czynników ryzyka, ale również opisuje ilościowo ich wpływ na badany miernik. Jakość tworzonych modeli regresyjnych w dużej mierze zależy od doboru zmiennych niezależnych. Istotność czynników jest zazwyczaj analizowana z zastosowaniem wielowymiarowej analizy dyskryminacyjnej. Stosowanie techniki regresji wymaga ponadto posiadania wiedzy i umiejętności w posługiwaniu się narzędziami analizy statystycznej (Li 2009). Przegląd metod prognozowania czasu realizacji procesów budowlanych i ich opis oraz zastosowania omówiono monografii Rogalskiej (2016).

Zastosowanie sieci neuronowych pozwala określić ilościową zależność między zmiennymi na wejściu i wyjściu modelu. W odróżnieniu od regresji statystycznej, nie jest konieczne definiowanie typu zależności funkcyjnej, lecz należy zaprojektować strukturę sieci, która wpływa na jakość uzyskiwanych prognoz i powinna być dostosowana do specyfiki analizowanego problemu. Określanie struktury sieci neuronowej i jej parametrów wymaga doświadczenia i wiedzy specjalistycznej. Z drugiej strony – specjalistyczna wiedza o badanym zjawisku nie może być wykorzystana w procesie uczenia sieci. Jakość uzyskiwanych wyników w dużej mierze zależy od liczebności próby danych stosowanych do uczenia sieci. Z tych powodów – podobnie jak w przypadku regresji statystycznej – możliwość zastosowania tej metody jest ograniczona w praktyce ze względu na specyfikę produkcji budowlanej (Li 2009).

Najlepszym przykładem prostego analitycznego modelu matematycznego jest model Woodwarda (Li 2009) do prognozowania nakładów czasu pracy:

$$P = P_b \cdot \left[1 + \sum_{j=1}^s w_j \cdot (c_j - 1) \right], \quad (4.58)$$

gdzie: P – pracochłonność przewidywana, P_b – pracochłonność określona bez uwzględnienia wpływu czynników ryzyka, w_j – waga czynnikaj, s – liczba czynników, c_j – ocena stanu czynnika j (wartości mniejsze od 1 – stan czynnika wpływa na zmniejszenie pracochłonności, wartości większe od 1 – stan wpływa na zwiększenie pracochłonności).

Proste modele analityczne wykorzystują wiedzę subiektywną. Ich poprawności nie można weryfikować statystycznie, tak jak modeli regresyjnych. W prostych analitycznych modelach matematycznych zakłada się niezależność czynników oddziałujących na mierniki pracy. Ich zaletą jest łatwość stosowania, tworzenia i transparentność.

W większości systemów ekspertowych, stworzonych do wspomagania podejmowania decyzji w budownictwie, są stosowane reguły wnioskowania typu: *IF* (warunek) *THEN* (konsekwencja, działanie), za pomocą których reprezentuje się i gromadzi wiedzę o danym problemie (Mohan 1990). Regułom tym towarzyszą dwa mechanizmy wnioskowania: „w przód” – w których są tworzone nowe zdania logiczne dla nowych warunków na podstawie istniejącej wiedzy (mechanizm ten jest odpowiedni do wspomagania decyzji planistycznych i w badaniach prognostycznych – Lee i Halpin 2003), oraz „w tył”, w których poszukuje się warunków powodujących znane konsekwencje (w badaniach diagnostycznych – Yates 1993). Systemy ekspertowe efektywnie wspomagają podejmowanie decyzji w przypadku, gdy liczba zmiennych jest niezbyt duża oraz gdy w sposób jasny i jednoznaczny mogą być stworzone zdania logiczne (reguły wnioskowania). Ze względu na ryzyko, niepewność oraz złożoność – charakteryzujące specyfikę produkcji budowlanej – rozwój systemów ekspertowych wspomagających decyzje w budownictwie jest ograniczony do zagadnień dobrze rozpoznanych i powtarzalnych. Według Chan i in. (2004), w przeciwieństwie do zagadnień konstrukcyjnych, problemy z dziedziny zarządzania w budownictwie wymagają analizy wielu czynników i są trudne w dokładnym modelowaniu. Dotyczy to także zagadnienia prognozowania czasu realizacji, o czym świadczy brak konsensusu w zakresie identyfikacji najbardziej istotnych czynników ryzyka i brak jednoznacznie określonego ich wpływu na osiągnięte wyniki.

W systemach ekspertowych bazujących na logice rozmytej (Zadeh 1996) wiedza jest gromadzona w bazach reguł rozmytych. Systemy rozmyte obejmują skończoną liczbę reguł i posiadają „sztywną” strukturę. Użytkownik zwykle nie jest uprawniony do modyfikacji wbudowanych reguł, tak by uwzględnić specyfikę problemu czy dodatkową własną wiedzę specjalistyczną. Wbudowane regu-

ły odzwierciedlają zazwyczaj przeciętny wpływ czynników na badany parametr organizacji robót i nie uwzględniają wzajemnych zależności między czynnikami.

Dotychczas opracowane modele predykcji czasu w większości przypadków korzystają z góry określonego zestawu czynników wpływających na czas trwania procesów przy realizacji różnych przedsięwzięć. W opracowanych metodach przeważnie pomija się współzależność między czynnikami. Brak jest również szczegółowych badań porównawczych w zakresie jakości opracowanych metod, na podstawie identycznych danych rzeczywistych, oraz informacji o zastosowaniach praktycznych (Li 2009).

4.5. Teoria uczenia się i zapominania

Przedsięwzięcia budowlane często obejmują swym zakresem roboty wielokrotnie powtarzane na identycznych lub podobnych obiektach lub ich częściach, zwanych działkami roboczymi. Przykładem takich inwestycji są m.in. budowa wielokondygnacyjnych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej (zazwyczaj wielosekcyjnych), obiektów liniowych: dróg, sieci instalacji zewnętrznych i innych. Ten sam rodzaj procesów jest wykonywany przez brygady robocze podczas realizacji przedsięwzięć obejmujących budowę wielu obiektów czy sekcji o podobnej konstrukcji wykonania. Brygady wykonują ten sam rodzaj procesów na różnych działkach roboczych i na kolejnych placach budów. Z tego powodu jest możliwe zastosowanie teorii uczenia się (doświadczenia), opisującej/wyjaśniającej korelację pomiędzy zdobytym doświadczeniem w realizacji podobnych zadań a wielkością produkcji. W praktyce krzywa uczenia się jest używana do modelowania zwiększenia wydajności, wynikającego zazwyczaj z doświadczenia, a nie teoretycznego zdobywania wiedzy. Założenie to sprawdza się w przypadku wykonywania jednorodnych operacji produkcyjnych, podczas których pracownicy stale doskonalą swoje umiejętności, ewentualnie dążą do zapewnienia większej ergonomii swojego stanowiska pracy (Łapuńska i in. 2015). Wzrost liczby powtarzanych operacji prowadzi do nabywania coraz większego doświadczenia praktycznego, a co za tym idzie – do skrócenia czasu i niekiedy kosztu ich realizacji. Ciągłe powtarzanie procesów powoduje lepsze wykorzystanie stosowanych narzędzi pracy i ułatwia koordynację oraz kontrolę prac.

Teoria uczenia się ma celu opis matematyczny między liczbą powtórzeń wykonywania tej samej pracy a uzyskiwaną wydajnością. Stosowanie teorii uczenia się w budownictwie jest ograniczone ze względu na zmienne warunki pracy i brak możliwości zapewnienia brygadom nieprzerwanej pracy przy wykonywaniu jednorodnych technologicznie procesów na kolejnych frontach robót. Z powodu nieciągłości wykonywania procesów należy uwzględnić efekt zapominania, który jest proporcjonalny do czasu przerw (okresu, w którym brygada nie wykonuje robót tego samego typu).

Określenie wydajności pracy jest podstawą do sporządzenia realnego harmonogramu realizacji procesów. Na etapie projektowania realizacji budowy powinna być uwzględniona możliwość skrócenia czasu wykonywania procesów na skutek zdobytego doświadczenia na innych budowach – w ten sposób przedsiębiorstwo może zwiększyć pozycję konkurencyjną na etapie składania ofert w przetargach na roboty budowlane.

Pierwszy model uczenia się opracował w 1936 roku Wright (1936). Ma on postać krzywej wykładniczej o następującym równaniu:

$$t_n = t_1 \cdot n^{-l}, \quad (4.59)$$

gdzie: t_n – czas wykonania procesu na działce roboczej n , t_1 – czas wykonywania procesu na pierwszej działce, n – liczba powtórzeń procesu (numer kolejnej działki), l – parametr redukcji, który determinuje kształt krzywej logarytmicznej.

W modelu tym założono, że parametr redukcji może być określony na podstawie następującej zależności:

$$l = -\frac{\log s}{\log 2}, \quad (4.60)$$

gdzie wielkość s jest nazywana stopą uczenia się.

Stopa uczenia się s jest definiowana jako procentowa redukcja czasu w wyniku podwojenia liczby wykonanych jednostek produkcji, a wartość $(1-s)$ jest zwana współczynnikiem redukcji.

Na rysunku 4.9 przedstawiono przykład wykładniczej krzywej uczenia się.

W przypadku, gdy pracownicy korzystają z wcześniej zdobytego doświadczenia z poprzednio wykonywanych prac, np. na innych placach budów, do opisu krzywej uczenia można stosować model Stanford-B (Carlson 1973), wyrażony następującą zależnością:

$$t_n = t_1 \cdot (n + B)^{-l}, \quad (4.61)$$

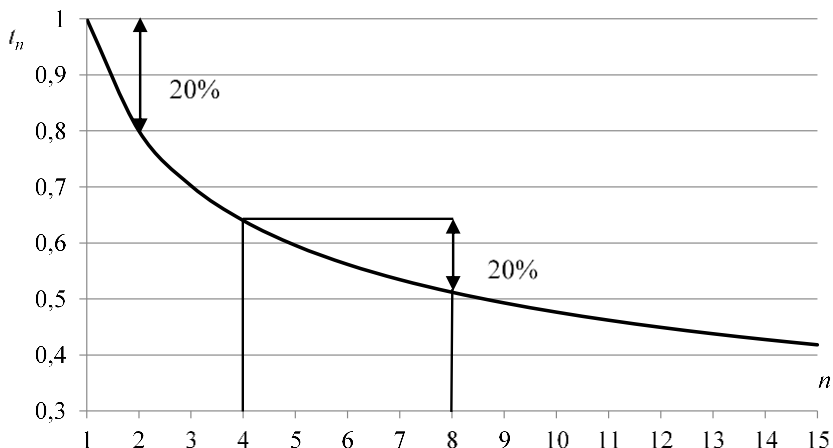
gdzie: B – ekwiwalent wcześniej zdobytego doświadczenia, który jest hipotetyczną liczbą wcześniej zapamiętanych powtórzeń pracy.

Jedną z niedogodności stosowania funkcji wykładniczej w modelu uczenia się jest to, że przy bardzo dużej liczbie powtórzeń czas realizacji procesów dąży do 0.

W przypadku procesów zmechanizowanych częściowo lub całkowicie w praktyce często jest stosowany model DeJong'a, w którym wprowadzono współczynnik M , związany ze stopniem mechanizacji procesów. W modelu tym przyjęto założenie, że procesy wykonywane ręcznie w większym stopniu podlegają skróceniu w wyniku ich powtarzania niż zmechanizowane. Model zaproponowany przez DeJong'a (1957) ma następującą postać:

$$t_n = t_1 \cdot [M + (1 - M) \cdot n^{-l}], \quad (4.62)$$

gdzie: M – współczynnik umaszynowania procesu $M \in [0, 1]$; przyjmuje on wartość 0, gdy proces jest wykonywany ręcznie, oraz $M = 1$ dla procesów w pełni zmechanizowanych.



Rys. 4.9. Zależność pomiędzy czasem realizacji procesu a liczbą powtórzeń – model Wrighta dla stopy uczenia 80%

Model DeJonga'a jest wykorzystywany w wielu przedsiębiorstwach lecz głównie przemysłowych, ze względu na jego prostotę.

Z uwagi na to, że – jak potwierdzają badania empiryczne – model Stanford-B dokładniej opisuje efekt uczenia na pierwszych etapach uczenia się a model DeJonga'a w kolejnych fazach, Carlson (1973) połączył oba podejścia w jeden model następującej postaci:

$$t_n = t_1 \cdot [M + (1 - M) \cdot (n + B)^{-l}], \quad (4.63)$$

Mazur i Hastie (1978) zaproponowali powszechnie akceptowany model, w którym wydajność w_n prac zmienia się z liczbą powtórzeń n :

$$w_n = w_0 \left(\frac{n + p}{n + p + r} \right), \quad w_n, w_0, p, n \geq 0, \quad p + r > 0, \quad (4.64)$$

gdzie: w_0 – jest wydajnością maksymalną, p – wcześniej uzyskane doświadczenie z wykonywanych podobnych prac, mierzone w tych samych jednostkach co n , natomiast r – to liczba wymaganych powtórzeń, zapewniająca osiągnięcie połowy wydajności w_0 , przy założeniu, że pracę rozpoczyna się bez żadnego doświadczenia.

Globerson i Levin (1987) opracowali model uczenia, w którym stopień zdobywania doświadczenia jest uzależniony od czasu wykonywania pracy. Ma on następującą postać:

$$w(t) = w_0 + Y_f (1 - e^{-t/T}), \quad (4.65)$$

gdzie: $w(t)$ – przewidywana wydajność pracy po czasie jej wykonywania t , w_0 – wydajność początkowa, Y_f – współczynnik nabywania doświadczenia, T – stała modelu.

Analizując literaturę przedmiotu, należy stwierdzić, że nie istnieje jedna uniwersalna krzywa uczenia się. Stosowane podejście do uwzględnienia efektu uczenia powinno umożliwiać proste, ale dokładne oszacowanie parametrów modelu na podstawie małej liczby danych pozyskiwanych z wcześniej realizowanych procesów, a przyjęty model powinien dobrze odwzorowywać zaobserwowane zjawisko uczenia się dla analizowanego rodzaju procesu.

Przerwy w pracy brygad roboczych powodują wydłużenie czasu realizacji robót realizowanych na kolejnych działkach roboczych. Przy krótkotrwałych przerwach występuje utrata części zdobytego doświadczenia, ale jeżeli przerwa jest odpowiednio długa, całe zdobyte dotychczas doświadczenie może być utracone (Lam i in. 2001). Niewiele jest prac dotyczących teorii zapominania, bowiem trudno jest ustalić zależność między długością czasu przerw, zdobytym poziomem doświadczeniem a jego utratą. Proces zapominania spowodowany przerwami w wykonywaniu pracy jest zjawiskiem odwrotnym do procesu zdobywania doświadczenia (Globerson i in. 1989, Jaber i Bonney 1996). Powoduje on wydłużenie czasu wykonywania procesów na działkach, co można opisać za pomocą zależności (Carlson i Rowe 1976, Jaber i Bonney 1996):

$$\hat{t}_x = \hat{t}_1 \cdot x^f, \quad (4.66)$$

gdzie: \hat{t}_x – czas wykonania procesu na działce roboczej x będący wynikiem zapominania, \hat{t}_1 – ekwiwalentny czas wykonania procesów na działce pierwszej zgodny z krzywą zapominania, x – liczba działek, które zostałyby wykonane w czasie przerwy, natomiast f to wykładnik krzywej zapominania.

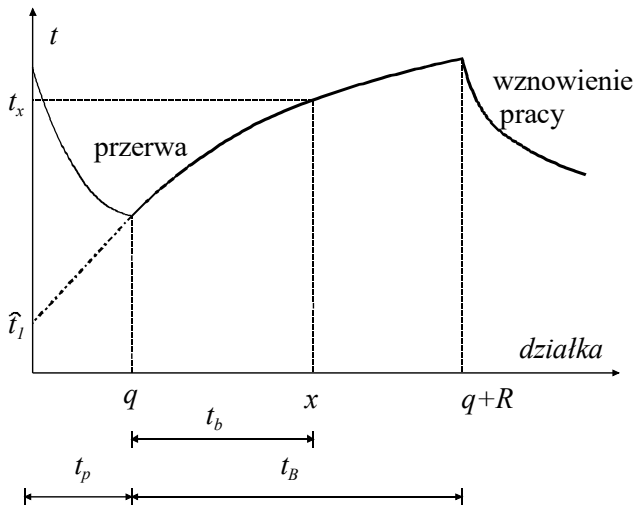
Elmaghraby (1990) w swoim modelu zwanym *VRIF (Variable Regression Invariant Forgetting Model)* zakłada, że f jest stałe i jego wartość można wyznaczyć na podstawie pierwszego ekwiwalentnego czasu wykonania \hat{t}_1 w pierwszym cyklu uczenia-zapominania (rys. 4.10). Czasy realizacji procesów na końcu etapu uczenia i początku etapu zapominania (przecięcie krzywej uczenia i zapominania na rysunku 4.10) są sobie równe, więc poprzez porównanie wyrażeń (4.59) i (4.66) możemy wyznaczyć czas \hat{t}_1 :

$$\hat{t}_1 = t_1 q^{-(l+f)}, \quad (4.67)$$

a zapamiętana, ekwiwalentna liczba wykonanych działek (zdobyte doświadczenie) na początku cyklu $(i+1)$ po wystąpieniu przerwy i wynosić będzie:

$$u_{i+1} = \left(\frac{\hat{t}_1}{t_1} (q_i + s_i)^f \right)^{-1/l}, \quad (4.68)$$

gdzie: $(q_i + s_i)$ to liczba działek, które można by wykonać do czasu zakończenia przerwy.



Rys. 4.10. Wpływ zdobywania doświadczenia i zapominania na wydajność pracy; t_p – czas wykonania q działek; t_b – minimalny czas, po którym następuje całkowita utrata efektu uczenia, R – liczba potencjalnie wykonanych działek przy braku wystąpienia przerwy, q i $(q+R)$ – odpowiednio liczba potencjalnie wyprodukowanych jednostek w czasie t_p i (t_p+t_b) , x – liczba wykonanych lub potencjalnie wykonanych działek w czasie t_p i (t_p+t_b) , przy czym $x \leq q+R$ oraz $t_b \leq t_p$ (Jaber i Bonney 1997)

Przy założeniu, że całkowita utrata doświadczenia nastąpiłaby po wykonaniu $q+R$ działek (wyjaśnienie oznaczeń w opisie rys. 4.10) to wykładnik krzywej zapominania f jest równy (Yaber i Bonney 1996):

$$f = l \frac{\log q}{\log(q+R) - \log q}. \quad (4.69)$$

Carlson i Rowe (1978) w swoim modelu nazwanym *VRVF (Variable Regression Variable Forgetting Model)* założyli, że wykładnik krzywej zapomnia-

nia jest zmienny w kolejnych cyklach i zależy od liczby wykonanych działań w cyklu.

Jaber i Bonney (1996) (*Learn-Forget Curve Model – LFCM*) zaproponowali, aby wartość wykładnika krzywej zapominania $0 \leq f_i \leq 1$ w kolejnych cyklach obliczać na podstawie wyrażenia:

$$f_i = \frac{l(1-l)\log(u_i + n_i)}{\log\left(1 + \frac{D}{t(u_i + n_i)}\right)}; i = 1, 2, \dots, \quad (4.70)$$

gdzie: n_i – zapamiętane doświadczenie na początku cyklu i , wynikające z wykonania poprzednich $i-1$ cykli, D – długość przerwy, która powoduje całkowitą utratę doświadczenia, u_i – liczba zrealizowanych działań w cyklu i , $t(u_i + n_i)$ – czas wykonania $u_i + n_i$ działań, który jest równy:

$$t(u_i + n_i) = \sum_{x=1}^{n_i} t_1(u_i + x)^{-l} \cong \int_0^{u_i + n_i} t_1 x^{-l} dx = \frac{t_1}{1-l} (u_i + n_i)^{1-l}; i = 1, 2, \dots \quad (4.71)$$

Największą niedogodnością modelu *LFCM* jest trudność w określeniu długości okresu D , w którym nastąpi całkowita utrata zdobytego doświadczenia.

Nembhard i Uzumeri (2000) zmodyfikowali propozycję przedstawioną w pracy Mazur i Hastie (1978) (wyrażenie (4.64)). W celu uwzględnienia wpływu wielu cykli uczenia-zapominania na wydajność realizowanych procesów w_n zaproponowali następującą formułę:

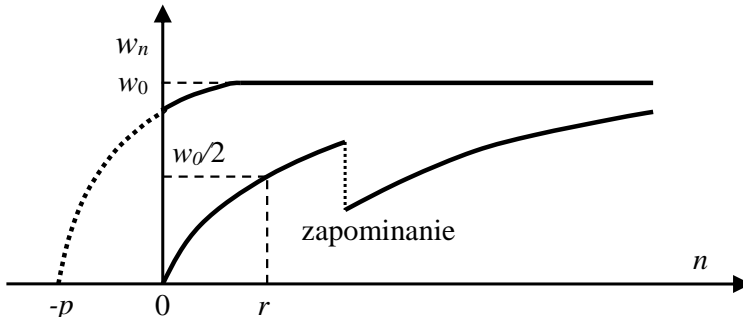
$$w_n = w_0 \left(\frac{nR_n^\alpha + p}{nR_n^\alpha + p + r} \right), \alpha, w_n, w_0, p, n \geq 0, p + r > 0, \quad (4.72)$$

gdzie:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i^1 - t_0^1)}{n(t_n^1 - t_0^1)}. \quad (4.73)$$

t_0^1 – termin zakończenia pracy na pierwszej działce, t_n^1 – termin zakończenia pracy na ostatniej n działce (prace na tych działkach realizowane są w sposób ciągły), t_i^1 – termin zakończenia pracy na działce i , α – parametr modelu, który odzwierciedla zdolność zapominania dla poszczególnych procesów.

Model uczenia się i zapominania według Nembharda i Uzumeriego (2000) przedstawia rysunek 4.11.



Rys. 4.11. Model uczenia się i zapominania wg Nembhard i Uzumeri (2000).

Wielkość R_n odzwierciedla częściową utratę zdobytego doświadczenia w efekcie wystąpienia przerw w pracy (ang. *recency of experiential learning*). Po wystąpieniu przerwy czas na pierwszej działce po wznowieniu pracy będzie wynosił:

$$\tilde{t}_1^{RC} = t_1 \left(nR_x^\alpha \right)^{-1}. \quad (4.74)$$

Nembhard i Uzumeri (2000) nie przedstawili jednak uzasadnienia przyjętego modelu (nazywanego ang. *Recency Model*) oraz sposobu ustalania parametru α .

Globerson i Levin (1987) zaproponowali prosty w zastosowaniu model, w którym efekt zapominania jest uzależniony bezpośrednio od długości czasu przerwy Δt , a czas wykonania t_b na pierwszej działce po wystąpieniu przerwy można obliczyć wykorzystując wyrażenie:

$$t_b = t_1 - [t_1 - t_w] \cdot (a \cdot \Delta t + 1) \cdot e^{-a \cdot \Delta t}, \quad (4.75)$$

gdzie: t_w – czas realizacji kolejnego procesu, gdyby przerwa nie wystąpiła, a – współczynnik zapominania, e – podstawa logarytmu naturalnego.

Wpływ doświadczenia na wydajność pracy był wielokrotnie analizowany w budownictwie, np. przy realizacji stropów żelbetowych (Pellegrino i in. 2012), kryciu dachów (Mályusz i Pém 2013), wykonywaniu pali żelbetowych (Hinze i Olbina 2009) czy robót zbrojarskich (Jarkas 2010). Krzywa uczenia się znalazła również zastosowanie w planowaniu budowy autostrady (Hassanein i Moselhi 2004), budynków wysokich (Couto i Teixeira 2005), a także przy planowaniu budowy kesonów (Panas i Pantouvakis 2013). Lam i in. (2001) uwzględnili krzywe uczenia–zapominania przy wyznaczaniu terminów rozpo-

czyniania i zakończenia procesów budowlanych w ramach przedsięwzięć planowanych metodą *Line of Balance*. Lutz i in. (1994) zastosowali model Wrighta w badaniach symulacyjnych przedsięwzięć budowlanych. Założyli oni, że czasy realizacji procesów budowlanych, ze względu na krzywą doświadczenia, mogą być skrócone maksymalnie o 25%. Biruk i Rzepecki (2017) wykazali, przeprowadzając badania symulacyjne, że uwzględnienie efektu uczenia może prowadzić do istotnego skrócenia planowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia, nawet w przypadku braku ciągłości pracy brygad roboczych i częściowej utraty zdobytego doświadczenia.

W badaniach tych najczęściej przyjmuje się, że stopa uczenia dla większości procesów w budownictwie mieści się w granicach od 70% do 90%. Zależy ona przede wszystkim od stopnia mechanizacji procesów, jakości zarządzania, poprawy warunków pracy, wprowadzanych usprawnień, motywacyjnego systemu wynagradzania i zdolności uczenia się pracowników.

Jarkas (2010), analizując roboty zbrojarskie prowadzone w 21 budynkach, stwierdził, że nie zawsze można odnotować wzrost wydajności pracy przy jej powtarzaniu. Jarkas i Horner (2011), badając wydajność robót betonowych, zaobserwowali, że na 45 analizowanych budynków w 18 zaobserwowano zmniejszenie wydajności przy zwiększaniu liczby wykonanych kondygnacji, w 26 zaobserwowano wzrost wydajności poniżej 1%, a tylko w jednym – na poziomie 5%.

Zaobserwowany brak zwiększania wydajności pracy przy zwiększaniu liczby powtórzeń lub nawet zmniejszona wydajność mogą być spowodowane wieloma czynnikami: przemęczeniem pracowników, absencją w pracy, brakiem motywacyjnego systemu wynagrodzeń, dużą fluktuacją kadr i zmiennością składu brygad roboczych, zwiększonymi nakładami pracy przy transporcie wyrobów na wyższe kondygnacje czy stosowaniem niewłaściwych narzędzi (Jarkas 2010, Jarkas i Horner 2011). Zmienność warunków pracy na budowie utrudnia bezpośrednią adaptację metod i technik organizatorskich stosowanych w produkcji przemysłowej do budownictwa.

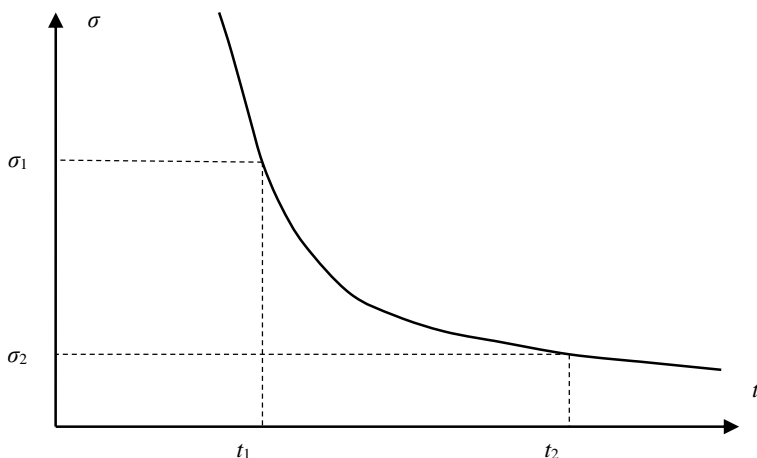
Klasyczna teoria krzywej uczenia zakłada deterministyczne warunki produkcji, brak jest natomiast prac dotyczących wpływu efektu uczenia się i zapominania na parametry zmiennych losowych czasu procesów realizowanych w warunkach ryzyka.

Jeang (2015) uważa, że zależność między wartością średnią czasu wykonania procesu a jego odchyleniem standardowym σ (rys.4.12) można wyrazić jako funkcję produkcji Cobba – Douglasa:

$$\sigma = C_0 \cdot n^{b_1} \cdot t^{b_2}, \quad (4.76)$$

gdzie: n – liczba powtórzeń wykonywania procesu (liczba działek), t – wartość średnia czasu realizacji procesu na działce, a C_0 , b_1 i b_2 – stałe ustalone metodą

regresji na podstawie danych uzyskanych z badań procesów realizowanych w przeszłości.



Rys. 4.12. Wpływ czasu realizacji procesu na jego wariancję (Jeang 2015)

Badanie efektu doświadczenia i zapominania oraz dyspersji czasu procesów powtarzalnych powinno być obszarem zainteresowań naukowców i praktyków z dziedziny budownictwa, bowiem pozwala na dokładniejsze oszacowanie czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych. Uzyskiwany efekt zwiększenia wydajności pozwala na osiągnięcie tych samych celów przy zaangażowaniu mniejszych środków. Powinny być tworzone bazy danych zawierające informacje zawierające stopę uczenia osiągniętą przy realizacji różnych robót budowlanych, pomocne przy projektowaniu realizacji budów i sporządzaniu ofert na roboty budowlane. Przydatność gromadzonych danych może być ograniczona, bowiem warunki realizacji w dużej mierze wpływają na efekt uczenia się. Należy także uwzględnić ciągły postęp technologiczno-organizacyjny w budownictwie.

4.6. Korelacja zmiennych losowych czasu realizacji procesów budowlanych

Czas realizacji procesów powinien być szacowany jako efekt skumulowanego wpływu czynników ryzyka (Song i in. 2005). Efekt korelacji zmiennych losowych czasu realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia jest spowodowany jednoczesnym oddziaływaniem na ich przebieg tych samych czynników ryzyka, np. warunków atmosferycznych czy błędów projektowych. Oszacowanie korelacji między czynnikami ryzyka może być bardziej istotne niż poprawne założenie typu rozkładu prawdopodobieństwa czasu wykonania procesów. Po-

minięcie korelacji może prowadzić do uzyskania niewiarygodnych wyników badań symulacyjnych (Öztaş i Önder 2004). W metodach symulacyjnych korelacja czasu realizacji procesów jest najczęściej pomijana przez stosowanie niezależnych generatorów liczb pseudolosowych wykorzystywanych do generowania rozkładów czasu realizacji procesów budowlanych. Uwzględnia się natomiast korelację dróg wynikającą z faktu, że proces może należeć do kilku dróg w modelu sieciowym.

W celu oceny współzależności dwóch zmiennych losowych najczęściej wykorzystuje się współczynniki korelacji liniowej Pearsona, rang Spearmana oraz τ -Kendalla.

Jeżeli $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ jest wektorem skorelowanych zmiennych losowych czasu realizacji procesów $i = 1, 2, \dots, n$ o znanej dystrybucie rozkładu łącznego $F(\mathbf{t}) = P(\mathbf{T} < \mathbf{t})$, a $F_i(\cdot)$ jest dystrybuantą rozkładu brzegowego zmiennej losowej T_i oraz dla $k = 2, 3, \dots, n$, $F_k(\cdot | T_1, T_2, \dots, T_{k-1})$ to rozkład warunkowy zmiennej losowej T_k dla T_1, T_2, \dots, T_{k-1} , wówczas algorytm generowania n wymiarowej zmiennej losowej można przedstawić w następujących krokach:

1. Wygeneruj T_1 z F_1
2. Wygeneruj T_2 z $F_2(\cdot | T_1)$
3. Wygeneruj T_3 z $F_3(\cdot | T_1, T_2)$
- \vdots
- n . Wygeneruj T_n z $F_n(\cdot | T_1, T_2, \dots, T_{n-1})$
- $n+1$. Oblicz $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$

W praktyce rzadko udaje się uzyskać tak dużą liczbę danych historycznych lub subiektywnych oszacowań ekspertów, aby można było znaleźć rozkłady warunkowe poszczególnych zmiennych losowych czasu realizacji procesów budowlanych. Z tego względu do modelowania korelacji między zmiennymi losowymi czasie realizacji procesów były wykorzystywane różne inne podejścia: metody bazujące na czynnikach ryzyka (Ahuja i Nandakumar 1985, Carr 1979, Woolery i Crandall 1983), metody regresji liniowej, metoda *Envelope* (Kokkaew i Chiara 2010), algorytm Imana i Conovera (1982) wykorzystujący korelację rang, algorytmy opracowane do generowania wartości zmiennych losowych dla wybranych typów rozkładów wielowymiarowych, np. dla zbioru skorelowanych zmiennych o rozkładach normalnych (Touran i Wisser 1992), oraz zastosowanie funkcji połączeń (teorii kopuł) – Moret i Einstein 2012, Yang 2007, Van Dorp 2005.

Większość metod bazujących na wspólnych czynnikach ryzyka wykorzystuje tę właściwość, że jeżeli liczby losowe Z_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) modelujące zmienność oddziaływania czynników ryzyka będą generowane z niezależnych rozkładów, to zmienne T_1 i T_2 obliczane w następujący sposób:

$$\begin{aligned} T_1 &= a_{11}Z_1 + a_{12}Z_2 + \dots + a_{1n}Z_n \\ T_2 &= a_{21}Z_1 + a_{22}Z_2 + \dots + a_{2n}Z_n \end{aligned} \quad (4.77)$$

będą ze sobą silnie dodatnio skorelowane, a przy założeniu upraszczającym, że $E(Z_i) = 0$ i $D^2(Z_i) = 1$ (rozumowanie to można rozszerzyć na zmienne losowe o dowolnych średnich i wariancjach), to kowariancja między zmiennymi T_1 i T_2 jest równa:

$$Cov(T_1, T_2) = D^2 \left(\sum_{j=1}^n a_{1j} \cdot a_{2j} \right). \quad (4.78)$$

W przypadku analizy czynników ryzyka, oddziałujących na czas realizacji lub wydajność procesów budowlanych, korelację między zmiennymi losowymi czasu procesów można wywołać pośrednio w badaniach symulacyjnych poprzez stosowanie, dla tych samych czynników ryzyka, tych samych ciągów liczb losowych generowanych w kolejnych przebiegach symulacyjnych (Ahuja i Nandakumar 1985, Carr 1979, Padilla i Carr 1991, Ökmen i Öztaş 2008, Woolery i Crandall 1983).

W symulacji cyfrowej do generowania liczb jest wykorzystywany program lub podprogram bazujący na formule matematycznej, dlatego liczby te nazywane są pseudolosowymi (Gentle 2003). Generator ten charakteryzuje się tym, że liczby pseudolosowe są generowane w tym samym przewidywalnym porządku. Właściwość ta jest bardzo przydatna podczas weryfikacji symulatora, w wielu metodach redukcji wariancji oraz przy porównywaniu wariantów przy zmianie parametrów modelu (Ioannou i Martinez 1996), ale także przy wywoływaniu korelacji spowodowanej wspólnymi czynnikami ryzyka.

Inne ujęcie wpływu czynników ryzyka na czas realizacji procesów budowlanych i oryginalne podejście do uwzględnienia korelacji przedstawili Wang i Demsetz (2006) w metodzie *NETCOR* (*NETworks under CORrelated uncertainty*). Uważają oni, że czas wykonania procesu jest zmienną losową będącą kombinacją rozkładu bazowego (ustalanego dla warunków deterministycznych) i rozkładów czynników ryzyka. Dodatkowo przyjęli założenie, że rozkłady czynników ryzyka są zmiennymi losowymi o wartościach oczekiwanych równych 0.

Wang i Demsetz (2006) zaproponowali, aby czas realizacji procesu w warunkach losowych przyjmować jako zmienną losową w następującej postaci:

$$T = q \cdot W = q \cdot (w_0 + X'_1 + X'_2 + \dots + X'_m) = t_0 + T_1 + T_2 + \dots + T_m, \quad (4.79)$$

gdzie: T – zmienna losowa czasu realizacji procesu, q – ilość robot do wykonania, W – szacowana norma czasu (zmienna losowa), X'_1, X'_2, \dots, X'_m – zmienne losowe, których wartości oznaczają zwiększenie lub zmniejszenie normy czasu procesu spowodowane wystąpieniem czynnika j ($j=1, 2, \dots, m$), w_0 i t_0 – odpowiednio bazowe (ustalone w sposób deterministyczny) norma czasu i czas realizacji procesu, T_1, T_2, \dots, T_m – zmienne losowe wydłużenia (lub skrócenia) czasu wykonania procesu spowodowanego czynnikami ryzyka.

Wartości bazowe (deterministyczne) są ustalane z uwzględnieniem wartości oczekiwanych wpływu wszystkich czynników ryzyka. Zmienne losowe T_1, T_2, \dots, T_m są traktowane jako niezależne, bowiem czynniki (np. awaria sprzętu i warunki pogody) mogą wystąpić niezależnie od siebie i ich wpływ sumuje się.

W metodzie *NETCOR* zakłada się, że rozkład czasu realizacji procesu (np. ustalony tak jak w metodzie *PERT*) można zdekomponować na rozkłady czynników ryzyka – ustalić wartości średnie μ_j i wariancje σ_j^2 zmiennych losowych T_j , ($j=1, 2, \dots, m$). Ta sama procedura jest wykorzystywana do dekompozycji rozkładów zmiennych losowych oddziaływania czynników ryzyka na zmienne losowe wpływu stanu czynników.

W każdym przebiegu symulacyjnym proponowanej metody jest wybierany jeden ze stanów dla każdego czynnika ryzyka, następnie jest określany jego wpływ na wartość czynnika ryzyka i jest obliczany czas realizacji analizowanego procesu. Stan czynnika ryzyka może wpływać na grupę procesów. Zmienne losowe czasu realizacji procesów budowlanych podlegających wpływom tych samych czynników ryzyka są zatem skorelowane.

W metodzie bazującej na regresji liniowej zakłada się, że można (na podstawie zastawu danych historycznych) ustalić zależność liniową między zmiennymi losowymi T_1 i T_2 czasu wykonania dwóch procesów. Wówczas pierwsza traktowana jest jako niezależna, a wartości drugiej, zależnej (objaśnianej) są wyznaczone na podstawie zależności:

$$T_2 = a_1 \cdot T_1 + a_0 + N(0, e), \quad (4.80)$$

gdzie: e – odchylenie standardowe składnika losowego, a_0 , a_1 – współczynniki regresji.

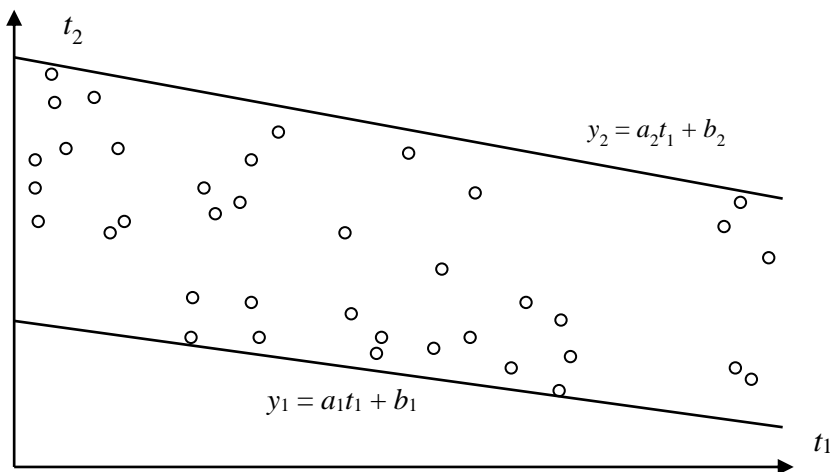
Odchylenie standardowe składnika resztowego wynosi:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}, \quad (4.81)$$

gdzie: $\varepsilon_i = t_{2i} - a_0 - a_1 \cdot t_{1i}$, przy czym t_{1i} i t_{2i} to wartości odpowiednio zmiennych T_1 i T_2 .

W metodzie *Envelope* (Vose 2008) jest sporządzany na podstawie danych historycznych wykres punktowy czasu realizacji analizowanych procesów (rys. 4.13), a następnie punkty wykresu są ograniczane prostymi o równaniach: $y_1 = a_1 t_1 + b_1$ (ograniczenie dolne) i $y_2 = a_2 t_1 + b_2$ (ograniczenie górne), wyznaczającymi zakres możliwych wartości zmiennej zależnej T_2 . Po wygenerowaniu wartości t_1 zmiennej niezależnej T_1 jest losowana wartość t_2 zmiennej T_2 z przedziału $[a_1 t_1 + b_1, a_2 t_1 + b_2]$ (zakresu wyznaczonego przez obie proste), przy założeniu rozkładu równomiernego.

Metoda *Envelope* nie ma dobrego uzasadnienia matematycznego, ale sprawdza się w wielu zastosowaniach inżynierskich.



Rys. 4.13. Idea metody *Envelope* (Vose 2008)

Kokkaew i Chiara (2010) analizowali przedsięwzięcie realizowane w systemie partnerstwa publiczno-prawnego w systemie buduj-operuj-transferuj (*BOT*), modelowane siecią *PERT*. Założyli oni trójkątne rozkłady czasu wykonania procesów. W celu ustalenia zależności między czasem realizacji dwóch procesów, eksperci szacowali jakie parametry ma rozkład procesu drugiego jeżeli czas realizacji pierwszego jest równy czasowi optymistycznemu, najbardziej prawdopodobnemu oraz pesymistycznemu. Zastosowanie metody *Envelope*

pozwoiliło na ustalenie parametrów $(t_{a,2}, t_{m,2}, t_{b,2})$ trójkątnego rozkładu zmiennej losowej procesu drugiego w zależności od wartości czasu $t_{1,r}$ procesu pierwszego wylosowanego w przebiegu symulacyjnym r .

Współczynnik korelacji liniowej ρ_{12} między zmiennymi losowymi T_1 i T_2 czasu realizacji dwóch procesów budowlanych można ustalić na podstawie danych historycznych (Wall 1997) lub opinii ekspertów (Cho 2006, Touran i Wisner 1992). Dostęp do danych historycznych jest jednak ograniczony i trudny, szczególnie gdy przedsiębiorca budowlany nie realizował przedsięwzięć o podobnym charakterze. Dane te zazwyczaj ulegają dezaktualizacji przy zmianie metod wykonania, usprawnieniu technologii realizacji robót budowlanych, czy zmianie warunków realizacji przedsięwzięcia, a przede wszystkim ich pozyskanie jest czasochłonne i kosztowne.

Macierze korelacji, zawierające współczynniki korelacji liniowej pomiędzy zmiennymi losowymi czasu realizacji dla każdej pary procesów, powinny być dodatkowo określone (Gentle 2003). Opracowanie macierzy zawierającej nierealne współczynniki staje się coraz bardziej prawdopodobne ze wzrostem jej wymiaru (liczby zmiennych losowych). Touran (1993) zaleca zwiększanie lub zmniejszanie wartości elementów macierzy o niewielką wartość np. 0,1 aż do osiągnięcia dodatniej określoności macierzy korelacji. Procedura poprawy macierzy korelacji została opisana także przez Ranasinghe'a (2000) oraz Yang'a (2006).

Cho (2006) zaproponował trójetapową metodę szacowania korelacji między zmiennymi losowymi czasu realizacji procesów T_1 i T_2 , bazującą na prawdopodobieństwie zgodności (ang. *Concordance Probability*): $CP = P(t_{2r} > t_{2s} | t_{1r} > t_{1s})$, gdzie (t_{1r}, t_{2r}) i (t_{1s}, t_{2s}) to pary obserwacji czasu zmiennych losowych T_1 i T_2 . Prawdopodobieństwo zgodności CP odpowiada współczynnikowi korelacji. Procedura określania prawdopodobieństwa zgodności CP jest następująca:

- Ustalenie wartości średniej i odchylenia standardowego czasu wykonania procesów na podstawie opinii ekspertów.
- Zadanie grupie złożonej z k ekspertów następującego pytania: czy istnieją wspólne czynniki ryzyka dla procesów 1 i 2. Odpowiedź negatywna oznacza, że zmienne losowe czasu realizacji tych procesów są niezależne. W przypadku odpowiedzi pozytywnej należy przejść do kroku 3.
- Obliczenie współczynnika korelacji liniowej na podstawie prawdopodobieństwa zgodności, równego procentowi par ekspertów (u, v) $(u, v = 1, 2, \dots, k)$, dla których przy szacowaniu średnich wartości zmiennych losowych czasu T_1 i T_2 , występuje zgodność, że $\mu_{12} > \mu_{11}$: gdzie: μ_1, μ_2 – to oszacowania średnich wartości zmiennych losowych T_1 i T_2 .

Kolejne podejście umożliwiające uwzględnienie korelacji pomiędzy zmiennymi losowymi polega na generowaniu wartości zmiennych wielowymiarowych. W przypadku założenia, że rozkłady czasu wykonania poszczególnych procesów są rozkładami normalnymi, do generowania wartości zmiennych losowych T_1, T_2, \dots, T_n o znanej kowariancji można wykorzystać algorytm dekompozycji Cholesky'ego (Gentle 2003) lub algorytm wartości własnych (Haldar i Mahadevan 2000).

Ten sposób generowania n -wymiarowych skorelowanych wektorów – po odpowiedniej modyfikacji – można także zastosować, gdy zmienne losowe mają rozkład logarytmiczno-normalny.

Podejście to zostało wykorzystane przez Tourana i Wisera (1992) do analizy kosztów realizacji przedsięwzięcia, w którym zidentyfikowano 8 niezależnych zmiennych losowych czasu realizacji i 7 skorelowanych.

Obecnie kilka komercyjnych programów np. *RiskyProject*®, *@RISK*® for *Project* czy *PertMaster*® zaimplementowało algorytm Imana-Conovera (1982), pozwalający uwzględnić korelację między zmiennymi losowymi czasu realizacji procesów. Algorytm ten bazuje na statystyce rang, a nie na wartościach zmiennych losowych. Współczynnik korelacji, obliczany na podstawie rang, jest bliski współczynnikowi korelacji liniowej Pearsona.

W algorytmie tym w pierwszej kolejności dla określonej liczby przebiegów symulacyjnych są generowane wartości realizacji wektora zmiennych losowych $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)$. Są one zestawiane w macierzy, w której w każdym wierszu znajdują się wartości kolejnych zmiennych losowych dla jednej replikacji, a w kolumnach wartości poszczególnych zmiennych losowych dla kolejnych przebiegów symulacyjnych. Następnie są przypisywane rangi wylosowanym wartościom, oddzielnie dla każdej zmiennej losowej, tak aby na etapie końcowym uporządkować tę macierz w taki sposób, aby uzyskać zakładaną korelację między zmiennymi losowymi. Największą zaletą algorytmu Imana-Conovera jest dowolność typów rozkładów czasu realizacji procesów budowlanych, natomiast wadą konieczność tworzenia macierzy zawierającej czasy trwania realizacji procesów już na początkowym etapie pierwszego przebiegu symulacyjnego.

W celu wygenerowania wartości wektora wartości skorelowanych zmiennych losowych, dla których jest znana macierz kowariancji \mathbf{C} o elementach: $c_{ij} = \text{cov}(T_i, T_j)$; $i, j = 1, 2, \dots, n$ i są znane dystrybuanty $F_i(t_i)$, może być stosowana metoda *NORTA* (*NORmal To Anything*), opracowana przez Cario i Nelsona (1997). W metodzie tej można wyróżnić następujące etapy:

- Generowanie wartości wektora $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ zmiennych losowych o rozkładzie normalnym $N(0, 1)$ o macierzy kowariancji \mathbf{C}_z , przy czym $\mathbf{C}_z = \mathbf{C}$.

- Oblicz wartości wektora $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ zmiennych losowych o rozkładach normalnych z dystrybuantą $F_i(t_i)$, stosując następujące podstawienie: $X_i = F_i^{-1}(\Phi(Z_i))$, $i = 1, 2, \dots, n$,

gdzie: Φ – funkcja gęstości rozkładu normalnego $N(0, 1)$,

$F_i^{-1}(u) = \inf \{x: F_i(x) \geq u\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ – uogólniona funkcja odwrotna.

Yang (2007) wykorzystał metodę *NORTA* w modelu symulacyjnym procesu wykonywania nawierzchni drogowej. W celu wykazania wpływu korelacji zmiennych losowych czasu realizacji poszczególnych procesów na czas wykonania przedsięwzięcia, uzyskane wyniki porównał z obliczeniami przeprowadzonymi przy zastosowaniu klasycznej metody *PERT* oraz wynikami badań symulacyjnych modelu sieciowego bez uwzględnienia korelacji. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych przez Younga (2007) można stwierdzić, że dodatnia korelacja między zmiennymi losowymi czasu realizacji procesów powoduje zwiększenie odchylenia standardowego zmiennej losowej czasu realizacji przedsięwzięcia co prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa niedotrzymania terminu dyrektywnego przedsięwzięcia. Moret i Einstein (2012) wykorzystali metodę *NORTA* do badania wpływu korelacji między czasem i kosztem procesów oraz współzależności kosztów wykonania procesów takiego samego typu na parametry realizacji przedsięwzięcia budowlanego.

Funkcja połączenia C , nazywana także funkcją łączącą lub kopułą (ang. *copula*), opisuje zależność między zmiennymi losowymi i ich realizacjami w następujący sposób:

$$C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.82)$$

Jeżeli dystrybuanty brzegowe zmiennych losowych są ciągłe, to istnieje tylko jedna funkcja łącząca dana wzorem:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), F_2^{-1}(u_2), \dots, F_n^{-1}(u_n)), (u_1, u_2, \dots, u_n) \in [0, 1]^k, \quad (4.83)$$

gdzie: $F_i^{-1}(q) = \inf \{x \in \mathbb{R} : F_i(x) \geq q\}$, $0 \leq q \leq 1$.

Właściwość ta umożliwia dokonanie symulacji łącznego rozkładu prawdopodobieństwa wektora zmiennych losowych o znanych rozkładach brzegowych (Doman 2011, Frees i Valdez 1998, Venter 2002).

W literaturze przedmiotu opisano wiele klas i rodzin kopuł, metod ustalania postaci funkcji połączeń oraz algorytmów generowania wartości skorelowanych zmiennych losowych z wykorzystaniem funkcji połączenia (Doman 2011, Genest i in. 1995, Genest i Favre 2007, Frees i Valdez 1998). Są one głównie stosowane w finansach i ubezpieczeniach przy szacowaniu ryzyka, niestety rzadko przy analizie czasowej przedsięwzięć budowlanych.

Van Dorp (2005) oraz van Dorp i Duffey (1999) wykorzystali dwuwymiarową funkcję połączeń *Diagonal Band Copula*, modelującą korelację pomiędzy czasem realizacji procesu a zagregowaną oceną ryzyka w planowaniu przedsięwzięć metodą *PERT*.

Yang (2006) w badaniach symulacyjnych zastosował wielowymiarową kopułę Gaussa (ang. *Gaussian copula*) do planowania przedsięwzięć złożonych z powtarzalnych procesów o znanych dystrybuantach i współczynniku korelacji. Kopuła Gaussa generuje wielowymiarowy standaryzowany rozkład normalny, gdy rozkłady brzegowe poszczególnych zmiennych losowych czasu realizacji procesów są również standaryzowanymi rozkładami normalnymi o znanej macierzy kowariancji (tak jak w metodzie *NORTA*).

Uwzględnienie wpływu korelacji zmiennych czasu realizacji procesów budowlanych pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo dotrzymania terminu końcowego z większą dokładnością. Czynniki ryzyka mogą wywoływać dodatnią korelację między czasami realizacji procesów (np. warunki atmosferyczne), ale opóźnienie jednego z procesów może powodować ujemną między innymi procesami. Czas realizacji przedsięwzięcia obliczony metodą *PERT*, przy założeniu dodatniej korelacji zmiennych losowych, jest mniejszy niż w przypadku założenia ich niezależności (Banerjee i Paul 2008).

Większość przedstawionych w literaturze metod ustalania rozkładów czasu realizacji przedsięwzięcia, ze względu na złożoność obliczeniową, pomija problem korelacji dróg w sieci (Mehrtotra i in. 1996).

5. Mierniki krytyczności procesów

Metoda ścieżki krytycznej (*CPM*) ma zastosowanie do projektowania realizacji przedsięwzięć w warunkach deterministycznych. Analiza modelu sieciowego w funkcji czasu umożliwia obliczenie dla każdego procesu wartości zapasu całkowitego i wyróżnienie procesów krytycznych, dla których zapas ten przyjmuje wartość zero (lub minimalną). Ciąg lub ciągi procesów krytycznych, przebiegających od zdarzenia początkowego do zakończenia przedsięwzięcia (droga krytyczna), decydują w największym stopniu o czasie jego realizacji, a ewentualne opóźnienia w wykonaniu procesów krytycznych są źródłem przesunięcia terminu zakończenia przedsięwzięcia (Biernacki i Cyunel 1989, Dyżewski 1965, Jaworski 1999, Marcinkowski 2002, Rowiński 1982).

W metodzie *PERT* zmienna losowa czasu realizacji przedsięwzięcia jest ustalana na podstawie drogi krytycznej, którą tworzą procesy o czasach wykonania będącymi zmiennymi losowymi o rozkładzie *PERT beta*. Poszczególne ciągi czynności (procesów budowlanych) w modelu sieciowym mają niejednakowy wpływ na czas realizacji przedsięwzięcia (Jaworski 1999). Duży wpływ mają procesy podkrytyczne (o małym zapasie czasu i wariancji większej niż czynności należące do drogi krytycznej). Podczas realizacji przedsięwzięcia budowlanego kierownik budowy musi zidentyfikować procesy mające największy wpływ na terminowość realizacji całego przedsięwzięcia. Procesy krytyczne – w takim ujęciu – wymagają podejmowania działań, których celem jest zabezpieczenie przed dezaktualizacją terminu rozpoczęcia w ramach operatywnego kierowania budową (np. kontrola i przeciwdziałanie nieterminowości realizacji procesów poprzedzających). Brak skutecznych działań w tym zakresie może być przyczyną propagacji zakłóceń w harmonogramie budowy.

W celu ułatwienia pracy menedżerów budowlanych opracowano wiele mierników pozwalających na określenie ważności/krytyczności procesów. Podczas analizy w warunkach probabilistycznych najczęściej określa się prawdopodobieństwo znalezienia się poszczególnych procesów na ścieżce krytycznej oraz prowadzi analizę wpływu wydłużenia czasu realizacji procesów na termin realizacji całego przedsięwzięcia. Struktura modelu sieciowego (liczba dróg dochodzących do procesu, liczba poprzedników procesu) jest ważnym czynnikiem determinującym krytyczność procesu. Ocena wpływu zakłóceń wywołanych zmiennością czasu realizacji ciągów procesów poprzedzających nie może być przeprowadzana na podstawie średnich wartości wydłużenia czasu ich wykonania, z pominięciem możliwych odchyłeń od wartości oczekiwanych. W celu uwzględnienia wpływu zmienności czasu realizacji poprzedników zaleca się stosowanie symulacji *Monte Carlo*.

Prawdopodobieństwo znalezienia się procesu na ścieżce krytycznej, oceniane za pomocą wskaźnika krytyczności *ACI* (ang. *Activity Criticality Index*), jest równoważnie prawdopodobieństwu, że ścieżka krytyczna zawiera ten proces (Van Slyke 1963):

$$ACI_i = \frac{1}{K} \sum_{s=1}^r \delta_{i,s}, \quad (5.1)$$

gdzie: $\delta_{i,s} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli proces } i \text{ jest krytyczny w przebiegu symulacyjnym } k \\ 0 & \text{dla pozostałych przypadków} \end{cases}$

Wiele programów komputerowych do analizy przedsięwzięć posiada wbudowane opcje obliczania wskaźnika *ACI*. Dodin i Elmaghraby (1985) przedstawili metodę analityczną szacowania tego wskaźnika. Stosowanie w praktyce wskaźnika krytyczności jest powszechnie krytykowane, bowiem miernik ten nie ocenia ryzyka przedsięwzięcia i może dostarczać informacje sprzeczne z intuicją i praktyką ze względu na to, że procesy o najdłuższym czasie realizacji i dużej jego dyspersji wpływają bardziej na zakończenie przedsięwzięcia od innych.

Z tego powodu Williams (1992a) zaproponował wskaźnik *SI* (ang. *Significance Index*) oceny krytyczności procesów, mający na celu oszacowanie ich wpływu na termin zakończenia przedsięwzięcia, uwzględniający zapas czasu procesu. Wskaźnik *SI* może być ustalony na podstawie wyników badań symulacyjnych w sposób następujący:

$$SI_i = E \left[\frac{T_i}{(T_i + Z_{c,i})} \cdot \frac{T}{E(T)} \right], \quad (5.2)$$

gdzie: T_i , ($i=1,2,\dots,n$) to zmienne losowe czasu realizacji procesów, T – zmienna losowa czasu wykonania całego przedsięwzięcia, a Z_i , ($i=1,2,\dots,n$) – zmienna losowa całkowitego zapasu czasu procesu i . Całkowity zapas czasu procesu i w danym kroku symulacji wyznacza się z następującej zależności:

$$z_{c,i} = t_i^{1k} - t_i^{0p} - t_i, \quad (5.3)$$

gdzie t_i^{1k} – najpóźniejszy termin zakończenia, t_i^{0p} – najwcześniejszy termin rozpoczęcia procesu i , t_i – czas jego realizacji.

Cho i Yum (1997) zaproponowali wskaźnik *UIM* (ang. *Uncertainty Importance Measure*), który jest obliczany w następujący sposób:

$$UIM_i = \frac{D^2(T_i)}{D^2(T)}, \quad (5.4)$$

gdzie: $D^2(T_i)$ – określa wpływ zmienności czasu realizacji procesu i na czas realizacji całego przedsięwzięcia, natomiast $D^2(T)$ – zmienność czasu realizacji przedsięwzięcia.

W pracy Cho i Yom (1997) przedstawiono efektywną procedurę obliczania miary krytyczności procesów, wykorzystując metodę planowania eksperymentów Taguchi'ego oraz miarę Taguchi'ego (1986) – ang. *Taguchi Tolerance*. Miara Taguchi'ego pozwala na ocenę wpływu zmienności parametru wokół swej nominalnej wartości na zmienność charakterystyki systemu a w konsekwencji na ustalenie elementów sytemu, których zmienność należy zredukować, aby zmniejszyć jego zmienność. W pracy Cho i Yom (1997), dzięki zastosowaniu miary Taguchi'ego, zidentyfikowano procesy, które mają istotny wpływ na czas realizacji całego przedsięwzięcia. W przypadku, gdy w modelu sieciowym istnieje możliwość ustalenia dominującej drogi (tak jak w założeniu klasycznej metody *PERT*), wskaźnik *UIM* może być obliczony analitycznie.

Wskaźnik *SSI* (ang. *Schedule Sensitivity Index*), zalecany przez Project Management Institute (2004), łączy ze sobą wskaźnik krytyczności *ACI* i wariancję czasu realizacji procesu (Vanhoucke 2010), i jest obliczany w sposób następujący:

$$SSI_i = ACI_i \sqrt{\frac{D^2(T_i)}{D^2(T)}}, \quad (5.5)$$

Wpływ dyspersji czasu trwania procesu na czas realizacji całego przedsięwzięcia można wyznaczyć również na podstawie korelacji zmiennych losowych (ang. *Cruciality Index – CRI*) czasu realizacji czynności i czasu realizacji przedsięwzięcia (Elmaghraby 2000, Vanhoucke 2010):

$$CRI_i = |corr(T_i, T)|, \quad (5.6)$$

przy czym współczynnik korelacji liniowej dwóch zmiennych T_1 i T_2 jest ilorazem kowariancji i iloczynu odchyłeń standardowych tych zmiennych:

$$corr(X, Y) = \frac{cov(T_1, T_2)}{\sigma_{T_1} \cdot \sigma_{T_2}}, \quad (5.7)$$

$$cov(T_1, T_2) = E(T_1 \cdot T_2) - E(T_1) \cdot E(T_2). \quad (5.8)$$

Indeks *CRI* jest stosowany podczas analizy przedsięwzięć z uwzględnieniem dostępności zasobów, bowiem jej poziom ma istotny wpływ na termin realizacji przedsięwzięcia. Miernik ten może być stosowany nie tylko w sieciach typu *PERT*, ale także w sieciach stochastycznych *GAN* (ang. *Generalized Activity Network*). Williams (1992a) zauważył, że procesy o małej wartości wariancji, nawet należące do drogi krytycznej, posiadają indeks *CRI* bliski 0, co jest zgodne z intuicją planistów.

Cho i Yum (1997) krytykują stosowanie wskaźnika *CRI* ze względu na to, że przy jego obliczaniu zakłada się liniową korelację pomiędzy zmiennymi los-

wymi, i proponują stosowanie miernika bazującego na współczynniku korelacji rang Spearmana. Test korelacji rang Spearmana zakłada, że zaobserwowane wartości są zastępowane przez ich numer w zbiorach posortowanych rosnąco (rangę) i jest możliwe obliczenie różnicy między rangami. Wówczas estymator wskaźnika *CRI* obliczony na podstawie *r* przebiegów symulacyjnych ma postać:

$$SRC_i = \left| 1 - \frac{6}{r(r^2 - 1)} \sum_{s=1}^r \left(Rank(t_i^s) - Rank(t^s) \right)^2 \right|, \quad (5.9)$$

gdzie: $Rank(t_i^s)$, $Rank(t^s)$ to odpowiednio ranga czasu realizacji procesu *i* oraz ranga czasu realizacji przedsięwzięcia – określone w przebiegu symulacyjnym *s* ($s = 1, 2, \dots, r$).

Korelację między zmiennymi losowymi czasu realizacji procesu i czasu realizacji przedsięwzięcia można też oceniać za pomocą współczynnika korelacji τ -Kendalla.

W pracy (Madadi i Iranmanesh 2012) został zaproponowany wskaźnik *PD* (ang. *Post Density*), który – podobnie jak *RPW* – uwzględnia procesy będące następnikami procesu *i*:

$$PD_i = \frac{s_i}{n}, \quad (5.10)$$

gdzie: s_i – liczba wszystkich procesów znajdujących na wspólnych drogach z procesem *i*, jednocześnie będących następnikami *i*, *n* – liczba wszystkich procesów przedsięwzięcia.

Wskaźnik ten bazuje na spostrzeżeniu, że im proces należy do większej liczby dróg w sieci, tym ma większy wpływ na terminowość realizacji przedsięwzięcia.

Madadi i Iranmanesh (2012), rozważając uwagi Williamsa (1992a) co do konieczności uwzględniania zmienności czasu realizacji procesów w ocenie krytyczności, zaproponowali następujący miernik krytyczności procesu *MOI* (ang. *Management Oriented Index*):

$$MOI_i = \begin{cases} \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{1}{\left(E(Z_{c,i}) - PD_i + 1 \right)} & \text{dla } E(Z_{c,i}) < S \cdot \sigma_i, \\ 0 & \text{dla innych przypadków} \end{cases}, \quad (5.11)$$

gdzie: σ_i – odchylenie standardowe czasu realizacji procesu *i*, σ_{\max} – maksymalna wartość odchylnia standardowego wszystkich procesów sieci, natomiast $E(Z_{c,i})$ to wartość oczekiwana całkowitego zapasu czasu procesu *i*.

Można założyć, że stała S jest równa np. 5. Z powszechnie znanej zależności, wykorzystywanej w metodzie *PERT*, można obliczyć prawdopodobieństwo, że proces i należy do drogi krytycznej C : $P(i \in C) = P(T_i > \mu_i + Z_{c,i})$

$$\geq P(T_i > \mu_i + 5\sigma_i) = P(T_i - \mu_i > 5\sigma_i) = P\left(\frac{T_i - \mu_i}{\sigma_i} > 5\right)$$

$$= P(Z > 5) \approx 0.$$

Stała S działa zatem jak próg dzielący procesy na istotne i nieistotne z punktu widzenia zarządzającego – mające istotny i nie mające wpływu na termin realizacji przedsięwzięcia.

Hadad i in. (2016) do identyfikacji najbardziej istotnego miernika krytyczności procesu zastosowali metodę *AHP*. Jednym z analizowanych kryteriów krytyczności był wskaźnik *RPW* (ang. *Rank Positional Weight*), obliczany jako czas realizacji najdłuższej drogi w sieci. Do ustalenia priorytetów procesów, metodę *AHP* wykorzystał także Singh (2014).

W niektórych metodach szacowania czasu realizacji procesów (np. metodzie Dawooda (1998)) jest możliwe ustalenie wpływu zbioru czynników ryzyka J , ($J = \{1, 2, \dots, m\}$) na wydłużenie czasu realizacji procesów. Wówczas wpływ oddziaływania czynników ryzyka na czas realizacji procesu i można opisać następująco:

$$T_i^{(J)} = t_i^D + \sum_{j \in J} D_{i,j}, \quad (5.12)$$

gdzie: $T_i^{(E)}$, ($i = 1, 2, \dots, n$) – to zmienne losowe czasu realizacji procesów, t_i – czasy realizacji procesów ustalone w warunkach deterministycznych a $D_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) – to zmienna losowa oddziaływania czynnika j na czas realizacji procesu i .

Przez analogię do *CRI* można określić wpływ czynnika ryzyka na czas realizacji przedsięwzięcia, obliczając *CRIR* (ang. *Cruciality Index for Risks*) – Creemers i in. 2014:

$$CRIR_j = \left| \text{corr}(D_j, T) \right|, \quad (5.13)$$

gdzie: $D_j = \sum_{i=1}^n D_{i,j}$.

W podobny sposób może być zaadoptowany współczynnik korelacji pomiędzy zmiennymi porządkowymi *SRC* do oceny istotności czynnika ryzyka (ang. *Spearman Rank Correlation for Risk – SRCR*):

$$SRCR_e = \left| \text{corr}(\text{rank}(D_j), \text{rank}(T)) \right|. \quad (5.14)$$

Innych wskaźników, np. *ACI*, *SI* and *SSI*, nie można zaadoptować do oceny istotności czynników ryzyka w sposób bezpośredni.

Creemers i in. (2014) zaproponowali miernik *CDC* (ang. *Critical Delay Contribution*) pozwalający na analizę wpływu wydłużenia czasu procesu *i*, spowodowanego wystąpieniem czynnika ryzyka *j*, na wydłużenie czasu realizacji całego przedsięwzięcia, który na podstawie *r* przebiegów symulacyjnych jest obliczany następująco:

$$CDC_{i,j} = \frac{1}{r} \frac{\sum_{s=1}^r d_{i,j,s} \delta_{i,s}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^r d_{i,j,s} \delta_{i,s}} (t_s - t_c), \quad (5.15)$$

gdzie: t_c – planowany (obliczony bez uwzględniania czynników ryzyka) czas realizacji przedsięwzięcia, t_s – czas realizacji przedsięwzięcia obliczony w przebiegu symulacyjnym s , ($s = 1, 2, \dots, r$), $d_{i,j,s}$ – wielkość wpływu czynnika ryzyka j , ($j = 1, 2, \dots, m$) na proces i , ($i = 1, 2, \dots, n$) wylosowany w przebiegu symulacyjnym s , natomiast $\delta_{i,s} \in \{0, 1\}$ i przyjmuje wartość 1, gdy proces i w przebiegu symulacyjnym s należy do drogi krytycznej i 0 w przeciwnym przypadku.

Wpływ czynnika ryzyka j , który może oddziaływać na różne procesy przedsięwzięcia, na czas realizacji całego przedsięwzięcia (ang. *Critical Delay Contribution for Risks*) można oszacować obliczając sumę jego wpływu przy realizacji wszystkich procesów:

$$CDCR_j = \sum_{i \in V} CDC_{i,j}. \quad (5.16)$$

Wpływ dyspersji czasu realizacji procesu i , wywołanej wszystkimi czynnikami ryzyka, na termin zakończenia przedsięwzięcia (ang. *Critical Delay Contribution for Activities*) można obliczyć wykorzystując następującą zależność:

$$CDCA_i = \sum_{j \in J} CDC_{i,j}. \quad (5.17)$$

Wskaźnik *CDCR* pozwala na ustalenie najistotniejszych przyczyn opóźnień przedsięwzięcia oraz opracowanie i wdrożenie strategii zmniejszenia skutków tego ryzyka. Podjęte działania będą miały wpływ na grupę procesów podlegającą tym samym niekorzystnym oddziaływaniom.

Jaśkowski i Biruk (2011a) uznali, że krytyczność procesu (ze względu na wpływ na terminowość realizacji) jest uzależniona od wielkości prawdopodobieństwa przesunięcia terminu jego rozpoczęcia w stosunku do terminu określonego w harmonogramie bazowym i od wielkości tego opóźnienia. Analiza modelu sieciowego w funkcji czasu (przeprowadzona dla czasów równych wartościom oczekiwany zmiennych losowych czasu realizacji procesów) umożliwia utworzenie wstępnego harmonogramu bazowego. Procesy mogą rozpoczynać się zgodnie z polityką *railway* – nie wcześniej niż w terminie ustalonym w harmonogramie – lub bezpośrednio po zakończeniu wszystkich poprzedników. Zaproponowana przez nich procedura oceny krytyczności procesów obejmuje następujące etapy:

1. Obliczenie, zgodnie z zasadami metody *CPM*, minimalnego czasu realizacji przedsięwzięcia t_{\min} i najwcześniejszych terminów t_i^{0s} rozpoczynania wszystkich procesów $i \in V$, gdzie $V = \{1, 2, \dots, n\}$ jest zbiorem procesów budowlanych (czynności w sieci).
2. Przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych modelu sieciowego przy założeniu, że czasy wykonania procesów są zmiennymi losowymi o wcześniej ustalonych parametrach, a procesy rozpoczynają się zgodnie z przyjętą polityką. Na podstawie symulacji można określić wartość oczekiwaną opóźnień procesów w stosunku do terminów zaplanowanych: $\Delta t_i = s_i^1 - s_i^0$, gdzie s_i^1 – średni termin rozpoczęcia procesu $i \in V$ określony na podstawie symulacji (wartość estymatora wartości oczekiwanej odchylenia).

W przypadku stosowania teorii zbiorów rozmytych do planowania przedsięwzięć, długości dróg w modelu sieciowym są liczbami rozmytymi. Stopień krytyczności poszczególnych dróg w sieci jest określany poprzez rangowanie liczb rozmytych, tak jak np. w pracach Elizabeth i Sujatha (2013), Shankar in. (2010), Sireesha i in. (2012). Innym ujęciem oceny krytyczności dróg jest wyznaczenie stopnia możliwości, że ścieżka p_k o długości \tilde{L}_k , będącą liczbą rozmytą, nie okaże się krótsza od żadnej z pozostałych ścieżek modelu sieciowego (Kulejewski i in. 2011) na podstawie wyrażenia:

$$\prod (\tilde{L}_k \geq \tilde{L}_1, \tilde{L}_2, \dots, \tilde{L}_n) = \min \prod_{r=1}^n (\tilde{L}_k \geq \tilde{L}_r), \quad k, r \in P, \quad k \neq r \quad (5.18)$$

gdzie: P to zbiór ścieżek w modelu sieciowym.

Chanas i Zieliński (2001) zaproponowali metodę wyznaczania krytyczności ścieżek na podstawie rozmytego czasu ich wykonania poprzez bezpośrednie zastosowanie zasady rozszerzania Zadeha (1978).

Gładysz (2011) definiuje miarę krytyczność procesów z rozmytymi czasami wykonania procesów jako możliwość $Pos(T_i \geq t_i^{1k} - t_i^{0p})$, że proces i , który

rozpocznie się w terminie najwcześniejszym t_i^{0p} , nie przekroczy terminu najpóźniejszego t_i^{1k} , a T_i to liczba rozmyta czasu realizacji procesu. Terminy t_i^{0p} i t_i^{1k} są wyznaczone metodą CPM, przy założeniu deterministycznego czasu realizacji procesów.

W szczególnym przypadku, gdy czasy realizacji procesów budowlanych są trójkątnymi liczbami rozmytymi, Chen i Huang (2007) zalecają, aby stopień krytyczności CD_i procesu i w modelu sieciowym obliczać następująco:

$$CD_i = \begin{cases} 1, & b_i \geq 0 \\ \frac{-a_i}{b_i - a_i}, & a_i < 0 < b_i \\ 0, & a_i \geq 0 \end{cases}, \quad (5.19)$$

gdzie trójkątna liczba rozmyta $A = (a_i, b_i, c_i)$ jest całkowitym zapasem czasu procesu i , ($i = 1, 2, \dots, n$), a n to liczba procesów modelu sieciowego.

Nowe ujęcie krytyczności procesów i całego przedsięwzięcia zaproponowała Kuchta (2001a), które pozwala na obliczenie stopnia krytyczności przyjmującego wartość z przedziału (0, 1). Przy obliczaniu terminu zaistnienia zdarzeń w sieci jest brana możliwość wydłużenia czasu realizacji procesów wywołana czynnikami ryzyka. Zaproponowany algorytm obliczania stopnia krytyczności jest modyfikacją klasycznego algorytmu obliczania ścieżki krytycznej.

Zammori in. (2009) zastosowali metodę TOPSIS do określenia ciągu procesów krytycznych w modelu sieciowym z rozmytymi czasami realizacji procesów. Ocena krytyczności wymagała stosowania wieloatrybutowej oceny ryzyka oraz warunków realizacyjnych. Jest ona niezbędna w zarządzaniu przedsięwzięciem, w celu zaplanowania działań ograniczających ryzyko.

Nie istnieje zatem jedna dominująca koncepcja oceny krytyczności i ważności procesów. Ocena krytyczności pomaga menedżerom w efektywnym zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi, dzięki koncentrowaniu się na niewielkiej liczbie procesów istotnych. Wybór procesów odbywa się zazwyczaj na podstawie doświadczenia i intuicji decydenta. Konieczne zatem wydaje się dostarczenie menedżerom budowlanym skutecznej metody, umożliwiającej wybór procesów w największym stopniu decydujących o powodzeniu całego przedsięwzięcia, dostosowanej do specyfiki budownictwa, przede wszystkim do zmienności warunków realizacyjnych (losowe czasy realizacji procesów budowlanych), niepewności planu produkcyjnego oraz długiego czasu wykonania procesów jak i całego przedsięwzięcia.

6. Prowadzenie badań symulacyjnych

Celem badań symulacyjnych przedsięwzięcia budowlanego w fazie jego planowania i projektowania realizacji może być m.in. określenie czasu i kosztu jego wykonania, niezbędnych nakładów zasobów, optymalnej struktury techniczno-organizacyjnej systemu wykonawczego, ustalenie strategii rozdziału zasobów czy ustalenie potencjału wykonawczego przedsiębiorstwa budowlanego, zapewniającego terminową realizację zleceń. Właściwa struktura wykonawcza przedsiębiorstwa budowlanego zapewnia eliminację konieczności podzlecenia części zakresu robót, przez co zwiększa się zysk przedsiębiorstwa, a przede wszystkim zapewnia wyższą jakość i terminowość realizowanych robót, bowiem są one wykonywane przez sprawdzone, własne brygady robocze.

Pierwszym etapem przeprowadzania badań symulacyjnych jest opracowanie modelu (Hillier i Lieberman 1990). Gordon (1974) definiuje model jako zbiór informacji o systemie, zebranych w celu jego zbadania. Modelowanie symulacyjne pozwala na chronologiczne tworzenie stanów modelu, które odzwierciedlają stany badanego systemu (Evans i in. 1967), a model jest budowany w celu badania wpływu parametrów wejściowych systemu na mierniki wyjściowe. Nie istnieje ogólny algorytm budowy modeli symulacyjnych i dla tego ten etap wymaga dużego doświadczenia. Zagadnienie modelowania graficzno-analitycznego przedsięwzięć budowlanych opisano w rozdziale 3.4, natomiast zbioru zleceń przedsiębiorstwa (w celu określenia jego planu produkcyjnego) w rozdziale 1.

Przedsiębiorstwo budowlane, w ramach swojej działalności operacyjnej, realizuje budowy (przedsięwzięcia). Na etapie budowy modelu przedsięwzięcie jest dzielone – w zależności od stopnia uogólnienia – na procesy złożone, proste a nawet operacje robocze, jest tworzona sieć zależności technologiczno-organizacyjnych między wyróżnionymi procesami, a następnie określa się rodzaje zasobów uwzględnianych w analizie, ich zapotrzebowanie oraz dostępność w trakcie planowanych robót oraz typy rozkładów czasu realizacji procesów budowlanych. Poszczególne przedsięwzięcia budowlane mogą być traktowane jako zgłoszenia w systemach kolejkowych, których realizacja wymaga wspólnych zasobów przedsiębiorstwa.

Kolejny etap zbierania i analizy danych wejściowych polega na określeniu wielkości realizowanych zadań, a następnie określeniu czasu wykonania procesów budowlanych oraz ustaleniu poziomu dostępności zasobów. Podobnie jak w metodzie *PERT* może być konieczne dokonanie przez ekspertów oszacowań parametrów modelu.

Kolejnym krokiem jest zaprogramowanie modelu. Model może zostać z kodowany za pomocą języka algorytmicznego ogólnego przeznaczenia, np.: *C++* czy *Python*. Wykorzystanie języków programowania pozwala na modelowanie systemów o dowolnym stopniu złożoności. Według Tyszera (1990) najbardziej pracowitym etapem prowadzenia badań symulacyjnych może być proces programowania modeli symulacyjnych z wykorzystaniem języków algorytmicz-

nych ogólnego przeznaczenia. Czas niezbędny do budowy symulatora można skrócić wykorzystując języki symulacyjne, które ułatwiają oprogramowanie modelu. Zawierają wbudowane mechanizmy upływu czasu systemowego i sterowania przebiegiem symulacji, generatory zmiennych losowych oraz procedury zbierania i prezentacji wyników. Programowanie z użyciem języków symulacyjnych pozwala na szybką modyfikację analizowanego problemu. Do najbardziej znanych języków symulacji dyskretnej należą: *GPSS*, *Simscrip* i *Simula*.

Do analizy modeli sieciowych można stosować także podejście polegające na zastosowaniu systemów komputerowych do interaktywnej symulacji wizualnej (ang. *Visual Interactive Simulation – VIS*), w których można wizualnie stworzyć obiekty symulacji oraz definiować zależności pomiędzy nimi. Pakiety VIS (np. *AnyLogic* czy *Witness*) bez znajomości języków programowania pozwalają na zbudowanie modelu, przeprowadzenie badań symulacyjnych i analizę wyników. Dla bardziej zaawansowanych użytkowników istnieje możliwość korzystania z języka programowania danej aplikacji symulacyjnej (Zdanowicz 2006), co uelastycznia proces modelowania symulacyjnego.

Już na etapie tworzenia komputerowej implementacji modelu symulacyjnego, ale także po jego zakończeniu jest przeprowadzana weryfikacja modelu, która polega na sprawdzeniu poprawności jego działania. Dotyczy ona jedynie wewnętrznej spójności modelu (Mielczarek 2009).

Po poprawnym opracowaniu programu komputerowego model powinien być poddany walidacji, która polega na ocenie jak dokładnie model opisuje system rzeczywisty (Law i Kelton 1991, Mielczarek 2009, Tyszer 1990). Ze względu na jednorazowy charakter przedsięwzięć budowlanych walidacja modelu jest utrudniona. Najczęściej polega na porównaniu generowanych wyników z wynikami innych modeli (analitycznych lub zweryfikowanych symulacyjnych). Często zweryfikowany model musi być modyfikowany w celu porównywalności wyników (Mielczarek 2009).

Etap planowania eksperymentów ma celu ustalenie wartości parametrów wejściowych, dla których mają być prowadzone badania symulacyjne. Dobrze zaplanowany eksperyment zapewnia zebranie maksymalnej liczby informacji niezbędnych do podejmowania decyzji zarządczych przy najmniejszych nakładach obliczeniowych (Tyszer 1990). Badania symulacyjne powinny obejmować także analizę wrażliwości, mającą na celu ocenę zmian parametrów wejściowych na charakterystyki badanego modelu, bowiem w rzeczywistości nie jest możliwe ustalenie dokładnych wartości prognozowanych zmiennych.

Przedsiębiorstwo budowlane może być traktowane jako system działający teoretycznie bez przerwy, a model symulacyjny ma charakter niezmienniczy (ang. *steady-state simulations*), tzn. warunki brzegowe nie wpływają na stany modelowanego systemu po upływie okresu przejściowego, z którego obserwacje są odrzucane.

Eksperymenty symulacyjne – zasadniczy etap badań symulacyjnych – są zazwyczaj przeprowadzane metodą (Tyszer 1990, Law i Kelton 1991):

- pojedynczego przebiegu lub
- niezależnych przebiegów.

W metodzie pojedynczego przebiegu odpowiednio długi czas symulacji (po odrzuceniu fazy przejściowej) jest dzielony na rozłączne odcinki, które są traktowane tak samo, jak niezależne przebiegi symulacyjne. W celu wyeliminowania korelacji pomiędzy zmiennymi losowymi estymowanymi na podstawie wyników z kolejnych odcinków, zaleca się przyjęcie odpowiednio długiego odstępu pomiędzy tymi odcinkami oraz odpowiednich ich długości.

W metodzie niezależnych przebiegów eksperyment przeprowadza się wielokrotnie przy stosowaniu niezależnych od siebie – w każdym powtórzeniu – ciągów liczb losowych. Wyznacza się estymatory punktowe wybranych parametrów systemu w kolejnych przebiegach, a następnie przyjmuje się jako wynik wartość średnią z ustalonych w ten sposób estymatorów. Tak jak poprzednio odrzuca się wyniki zarejestrowane w fazie niestacjonarnej (przejściowej).

Podczas badań symulacyjnych są gromadzone wartości zbiorczych charakterystyk funkcjonowania analizowanego systemu, np. liczba zrealizowanych zadań w określonym okresie czasu lub stopień wykorzystania posiadanych zasobów odnawialnych. W trakcie prowadzenia eksperymentów są zbierane zaobserwowane wartości badanych wielkości w celu wyznaczania – na etapie analizy wyników – przedziałów ufności przy szacowaniu ich wartości średniej i standardowego błędu.

Wartości x_i szacowanego parametru modelu, zarejestrowane w badaniach symulacyjnych (niezależnych przebiegach lub rozłącznych odcinkach), można traktować jako realizacje zmiennych losowej X (Platt 1974, Tyszer 1990). Dlatego nieobciążonym estymatorem punktowym wartości średniej μ , wyznaczonym na podstawie r obserwacji, jest wartość określona wzorem:

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^r x_s, \quad (6.1)$$

a wariancja estymatora $\hat{\mu}$ jest określona następująco:

$$D^2(\tilde{\mu}) = \frac{\sigma^2}{r}, \quad (6.2)$$

gdzie σ^2 jest wariancją zmiennej losowej X .

Nieobciążony estymator wariancji jest wyznaczany następująco:

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{s=1}^r (x_s - \tilde{\mu})^2. \quad (6.3)$$

Wariancja zmiennej losowej X jest wyznaczana na podstawie obserwacji rejestrowanych w kolejnych przebiegach symulacyjnych, a zatem zmienna losowa:

$$t = \frac{\tilde{\mu} - \mu}{\frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{r}}}, \quad (6.4)$$

ma rozkład t Studenta o $n-1$ stopniach swobody.

Stąd przedział ufności wartości średniej μ_i , dla ustalonego poziomu ufności $1-\alpha$, można wyznaczyć następująco:

$$P \left\{ \tilde{\mu} - t_\alpha \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{r}} < \mu < \tilde{\mu} + t_\alpha \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{r}} \right\} = 1 - \alpha. \quad (6.5)$$

Najczęściej poziom istotności przyjmowany jest na poziomie $\alpha = 0,05$. Projektując eksperymenty symulacyjne należy dążyć do minimalizacji długości przedziałów ufności, co jest gwarantem dobrej jakości uzyskanych wyników (Miłosz i Sobotka 1993). Jednym z podstawowych sposobów zawężania przedziału ufności (redukcji wariancji estymatora) jest zwiększanie liczby przebiegów symulacyjnych, co jednak powoduje wydłużenie czasu badań.

W praktyce przyjmuje się długość przedziału ufności, jaką chcemy uzyskać, równą niewielkiej części (np. 0,01) wartości estymatora, obliczonej na podstawie badań symulacyjnych.

Na dokładność wyznaczanych charakterystyk wpływa sposób generowania zmiennych (danych) wejściowych lub wybór estymatora. Korzystając z metody symulacji można rozważyć inny sposób próbkowania niż proste losowanie z teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa (Mielczarek 2007). Postępowania, mające na celu zmniejszenie „rozrzutu” obserwowanych wartości zmiennych wyjściowych, w literaturze określa się mianem metod redukcji wariancji (Avramidis i Wilson 1996, Law i Kelton 1991, Tyszer 1990). Metody redukcji wariancji można podzielić na trzy grupy:

- metody korelacyjne, a wśród nich metodę wspólnych liczb losowych, metodę zmiennych antytetycznych (przeciwstawnych) oraz metodę zmiennych kontrolnych,
- metody losowania (próbkowania) – w szczególności metodę próbkowania systematycznego, warstwowego i częściowego,
- metody specjalne, takie jak metoda pośredniej estymacji czy obciążonego estymatora, oraz inne.

Efektywność poszczególnych metod redukcji wariancji zależy przede wszystkim od złożoności modelu i stosowanych typów oraz parametrów rozkładów czasu realizacji procesów, ale także od doświadczenia i umiejętności badacza. W przypadku analizy symulacyjnej modeli sieciowych najczęściej stosowa-

no następujące metody redukcji wariancji: zmiennych antytetycznych (Burt i Garman 1970, Sullivan i in. 1982), losowania warstwowego (Burt i Garman 1970), zmiennych kontrolnych (Avramidis i in. 1991, Burt i Garman 1970, Milián 2008), metoda łacińskich hiperkostek (ang. *Latin Hypercube Sampling – LHS*) (Biruk i Jaśkowski 2011, Avramidis i Wilson 1996).

Metody te mogą być stosowane łącznie np. metoda zmiennych antytetycznych z metodą zmiennych kontrolnych czy losowania warstwowego (Avramidis i Wilson 1996, Biruk i Jaśkowski 2012).

Cechą charakterystyczną liczb pseudolosowych, generowanych w symulatorach, jest tendencja do ich grupowania. W celu uniknięcia tego negatywnego zjawiska, podczas badań symulacyjnych można zastosować metodę próbkowania quasi-losowego, które polega na stosowaniu ciągów liczb generowanych w sposób deterministyczny (nielosowy). Ciągi liczb quasi-losowych są nazywane ciągami o małej rozbieżności (ang. *low discrepancy sequences*) (Gentle 2003, Tezuka 1995), bowiem dzielą zakres zmiennej wejściowej na regularne odcinki. Podejście to stanowi pewien kompromis między dążeniem do uzyskania dużej dokładności wyników a zachowaniem losowości i wiarygodnością. W przypadku stosowania liczb quasi-losowych błąd szacowanego na podstawie próby parametru jest proporcjonalny do $\frac{1}{r}$, a nie do $\frac{1}{\sqrt{r}}$ (Chi i Jones 2006, Mielczarek 2007). Sekwencja Weyl'a liczb quasi-losowych w badaniach symulacyjnych przedsięwzięć była stosowana np. przez Biruka i Jaśkowskiego (2012) i Yanga (2006a).

7. Przykłady zastosowania modelowania symulacyjnego przedsięwzięć budowlanych

W literaturze opisano wiele modeli symulacyjnych przede wszystkim przedsięwzięć budowlanych, rzadziej przedsiębiorstw. Modele symulacyjne przedsiębiorstw budowlanych skupiają się głównie na wybranych obszarach ich funkcjonowania np. systemach logistycznych (Biruk i Sobotka 1997, Sobotka 2000, Vidalakis i in. 2011).

Lu i AbouRitzk (1999) przedstawili model przedsięwzięcia łączący symulację zdarzeń dyskretnych z uproszczonym sposobem wyznaczania ścieżki krytycznej w modelu sieciowym. Proces traktowany jest jak obsługa zgłoszenia w systemach kolejkowych. W węźle sieci, do którego dochodzi kilka ścieżek (ciągów procesów), zgłoszenia ze wszystkich ścieżek są łączone w jedno i natychmiast rozdzielane do obsługi na ścieżkach wychodzących z węzła. Czas realizacji przedsięwzięcia jest czasem przepływu wszystkich zgłoszeń od węzła *START* do węzła *KONIEC*. Podczas symulacji automatycznie jest obliczany termin t_n aktywacji każdego węzła n , a czas oczekiwania zgłoszeń na każdej ścieżce k , dochodzącej od poprzedzającego węzła scalającego ciągi zadań do węzła n , za pomocą wyrażenia:

$$W_k = t_n - t_k, \quad (7.1)$$

gdzie: t_k to czas przepływu zgłoszenia wzdłuż ścieżki k do węzła n .

Proces lub droga jest krytyczna jeżeli: $W_k = 0$. Ścieżkę krytyczną można wyznaczyć bez obliczania zapasu czasu (obliczania terminów najpóźniejszych).

Shi (1999) przedstawił metodę modelowania symulacyjnego przedsięwzięć budowlanych, w której jest stosowany – w przeciwieństwie do większości metod – tylko jeden symbol graficzny, obrazujący realizowany proces. Metoda ta została nazwana *Activity Based Construction (ABC)*. Diagramy *ABC* są dwudzielnymi grafami skierowanymi, które łatwo jest stosować do opisu systemów dynamicznych, ale ich prostota utrudnia modelowanie złożonych przedsięwzięć ze względu na rosnące skomplikowanie modelu.

W metodzie *ABC* przebieg symulacji można opisać w trzech krokach:

- Obliczenie terminu rozpoczęcia procesów na podstawie zależności: $t_i^{0s} = \max \{t_{i,z}^{0s}, t_{i,p}^{0s}\}$, gdzie $t_{i,z}^{0s}$ – najwcześniejszy termin dostępności zasobów niezbędnych do wykonania procesu i , $t_{i,p}^{0s}$ – najwcześniejszy termin rozpoczęcia procesu wynikający z zależności kolejnościowych. Wybór procesu o najmniejszej wartości t_i^{0s} i jego rozpoczęcie. Krok ten jest powtarzany aż do wyczerpania zasobów przydzielonych do realizacji procesom rozpoczętym.

- W przypadku braku procesów możliwych do rozpoczęcia uaktualnienie zegara systemowego symulacji do wartości, która pozwala na rozpoczęcie kolejnego procesu.
- Zwolnienie zasobów po zakończeniu procesu.

Opracowany program komputerowy do badań symulacyjnych gromadzi dane o czasie realizacji przedsięwzięcia i stopniu wykorzystania zasobów oraz przeprowadza ich analizę statystyczną. Model ten – w odróżnieniu od klasycznych metod *CPM/PERT* – umożliwia planowanie przedsięwzięć z uwzględnieniem ograniczeń w dostępności zasobów odnawialnych.

Ingalls i Morrice (2000) zalecają, aby w celu uproszczenia symulacji złożonych przedsięwzięć, czas realizacji procesów o małym stopniu krytyczności przyjmować jako stały i uwzględniać jedynie zmienność czasu realizacji procesów o największym wpływie na czas realizacji przedsięwzięcia.

Lee i in. (2012) opracowali system komputerowy nazwany *Stochastic Simulation System (AS4)*, bazujący na metodzie *CPM*, który umożliwia: import danych z komercyjnego oprogramowania *Primavera Project Planner (P3)*, ustalenie rozkładów realizacji procesów na podstawie danych historycznych, wyznaczenie niezbędnej liczby przebiegów symulacyjnych oraz – po przeprowadzeniu symulacji – określić parametry rozkładu czasu realizacji przedsięwzięcia bez udziału użytkownika.

Sadeghi i in. (2012) zaprezentowali oryginalną metodę planowania przedsięwzięć w warunkach losowych z uwzględnieniem ograniczeń w dostępności zasobów nazwaną przez autorów *DESPEL (Discrete Event Simulation with Probabilistic Event List)*, bazującą na symulacji dyskretnej przebiegu jego wykonania. Umożliwia ona określenie dystrybucyjności czasu realizacji przedsięwzięcia tylko w jednym przebiegu symulacyjnym. Sposób ten jest podobny do analizy sieci w metodzie *PERT*, bowiem uwzględnia w obliczeniach tylko terminy zaistnienia zdarzeń na drodze o najdłuższym czasie realizacji, lecz przy ustalaniu tej drogi jest brana pod uwagę dostępność zasobów. W systemie *DESPEL* są wykorzystywane różne reguły priorytetowe rozdziału zasobów. Podczas przebiegu symulacyjnego zakończenie procesu i , o zmiennej losowej czasu realizacji T_i , powoduje zwiększenie aktualnej wartości zegara systemowego T_n o wylosowaną wartość tej zmiennej losowej. Zakładając niezależność zmiennych losowych czasu realizacji poszczególnych procesów, termin T_i zdarzenia zakończenia procesu i jest zmienną losową o wartości oczekiwanej:

$$E(T_i) := E(T_n) + E(T_i), \quad (7.2)$$

oraz wariancji:

$$D^2(T_i) := D^2(T_n) + D^2(T_i). \quad (7.3)$$

Termin realizacji całego przedsięwzięcia jest ustalany na podstawie terminu zaistnienia zdarzenia końcowego w modelu sieciowym.

W przypadku Nielimitowanej dostępności zasobów model *DESPEL* jest równoważny metodzie *PERT* i tak jak w tej metodzie uwzględnia się tylko najdłuższą drogę (o największej sumie wartości oczekiwanych zmiennych losowych czasu realizacji procesów na tej drodze) przy wyznaczeniu terminu końcowego, a więc uzyskane wyniki są jedynie oszacowaniem dystrybuanty rozkładu czasu realizacji przedsięwzięcia.

Lee (2005) opracował program *Stochastic Project Scheduling Simulation (SPSS)*, który umożliwia obliczenie prawdopodobieństwa dotrzymania terminu dyrektywnego oraz krytyczności procesów. Program jest bardzo prosty w obsłudze, został zaprogramowany w języku *Java* a obliczenia można wykonywać na stronie internetowej. Celem stworzenia programu była pomoc przedsiębiorcom budowlanym przy szacowaniu ryzyka czasu podczas opracowania oferty na realizację robót budowlanych.

Fatemi Ghomi i Ashjari (2002) przedstawili prosty model symulacyjny realizacji trzech przedsięwzięć połączonych wspólnymi zasobami. Model został oprogramowany w języku symulacji ogólnego przeznaczenia *GPSS*. Zastosowano jedynie losową regułę alokacji zasobów do procesów, a celem analiz było sporządzanie funkcji prawdopodobieństwa terminu zakończenia każdego z trzech przedsięwzięć w zależności od limitu dostępności zasobów oraz określenie stopnia wykorzystania zasobów.

Aziz (2014) zaproponował i oprogramował metodę nazwaną przez autora *Repetitive-Projects Evaluation and Review Technique (RPERT)*, która łączy metodę *PERT* z *Line of Balance* – stosowaną do harmonogramowania procesów powtarzalnych. W metodzie wprowadzono możliwość definiowania zależności kolejnościowych pomiędzy każdymi dwoma procesami wykonywanym równoległe, jak i pomiędzy dwoma ciągami procesów realizowanych na kolejnych działkach roboczych. Autor uwzględnił efekt uczenia się (redukcji czasu realizacji procesów) przy powtarzaniu tych samych procesów na kolejnych działkach roboczych.

Lee i in. (2009) opracowali model symulacyjny realizacji budynku wysokiego o konstrukcji stalowej. Montaż konstrukcji stalowych jest prowadzony na „otwartej przestrzeni”, dlatego jest podatny na oddziaływanie czynników atmosferycznych. W modelu metodą regresji statystycznej ustalono wpływ warunków pogodowych (zmienne niezależne to temperatura, prędkość wiatru, wilgotność powietrza i nasłonecznienie) na wydajność procesów budowlanych. Czasy realizacji procesów były wydłużane o dni, w których nie można prowadzić robót ze względu na następujące warunki atmosferyczne: spadek średniej temperatury poniżej -2°C , przekroczenie w ciągu dnia średniej prędkości powietrza powyżej 10 m/s lub większe opady dzienne niż 10 mm/m²

Model został zaimplementowany komputerowo w programie *Crystal ball 7.0* firmy *Decisioneering, Inc.* W celu ułatwienia wprowadzania, gromadzenia

i analizy danych, program został uzupełniony makrami oprogramowanymi w języku VBA w *Excelu*.

Realizacja budynków wysokich wymaga powtarzania dużej liczby procesów budowlanych na kolejnych kondygnacjach. Z tego powodu analiza modelu metodą symulacji jest czasochłonna i trudno uzyskać wiarygodne dane dotyczące zmienności tak dużej liczby procesów. Wiele obiektów ma tę samą konstrukcję, ten sam rodzaj elewacji czy wykończenia. Z tego powodu Nguyen i in. (2013) na podstawie badań ankietowych wyodrębnili ciąg procesów „kontrolnych” decydujących o czasie realizacji budynku. Terminy ich zakończenia można traktować jako etapy realizacji przedsięwzięcia. Dzięki analizie przedsięwzięcia ograniczonej jedynie do przebiegu wykonania procesów „kontrolnych” jest konieczne określanie mniejszej liczby rozkładów czasu realizacji procesów budowlanych, uzyskiwanie mniejszej liczby danych od ekspertów. Złożoność modelu symulacyjnego jest mniejsza, co ułatwia prowadzenie badań symulacyjnych. Istnieje możliwość ustalenia i stosowania rozkładów wykonywania robót jednostkowych (np. czasu wykonania 1 m² elewacji), aby dane mogły być wykorzystywane podczas planowania innych inwestycji.

Zaproponowane podejście jest wygodne w użyciu. Jednak istnieją inne metody sieciowe niż *CPM* (np. sieci Petriego), które umożliwiają prostsze modelowanie procesów powtarzalnych.

AbouRizk i Wales (1997) zaproponowali podejście łączące metodę symulacji dyskretnej i ciągłej. Pierwszy moduł ich modelu (symulacja dyskretna) odwzorowuje przebieg przedsięwzięcia budowlanego za pomocą modelu sieciowego, natomiast drugi (symulacja ciągła) imituje warunki otoczenia wpływające na mierniki pracy. Upływ czasu w obu modułach jest kontrolowany przez wspólny zegar symulacyjny, uaktualniany o stały przyrost czasu. Każdego dnia są generowane warunki atmosferyczne i jest ustalany ich wpływ na wydajność dzienną. Podprogram generujący warunki pogodowe był weryfikowany poprzez porównanie generowanych stanów z danymi historycznymi z 20 lat. Procesy przedsięwzięcia zostały podzielone na grupy ze względu na podatność zmiany wydajności brygad je realizujących na wpływ warunków pogodowych. Dla każdej z grup opracowano sieć neuronową do szacowania wpływu warunków na wydajność. Opracowana metodyka pozwala na ocenę wpływu innych czynników losowych (o ciągłym charakterze) na wydłużenie czasu wykonania pojedynczych procesów, jak i całego przedsięwzięcia.

Wpływ warunków pogody na przebieg robót wykonywanych tarczą wiertniczą był analizowany przez Shahin i in. (2014). W modelu zastosowano generator pogody (symulacja dyskretno-ciągła). Postęp robót podatnych na oddziaływanie tych warunków był ustalany na podstawie współczynnika procentowego, równego stosunkowi wydajności uzyskiwanej przy aktualnych parametrach otoczenia (temperatura otoczenia, prędkość wiatru) i wydajności w warunkach optymalnych.

W pracy Dytczak i in. (2014) przedstawiono wykorzystanie metody symulacji do ustalenia kolejności realizacji procesów budowlanych w celu zaprojektowania harmonogramu niepodatnego na warunki atmosferyczne.

Hu i Mohamed (2013) zaproponowali dwuetapowy algorytm dynamicznej alokacji zasobów przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości wykonywania procesów budowlanych. Autorzy, podobnie jak Thabet i Beliveau (1994), uważają, że zbyt duża liczba zasobów (brygad roboczych, maszyn budowlanych) realizująca prace na frontach roboczych może prowadzić do spadku wydajności i zwiększa ryzyko wypadków.

Ze względu na specyfikę problemu, w symulacji przebiegu przedsięwzięcia wykorzystano metodą stałego kroku (zegar czasu symulowanego był zwiększany o stałą wartość). Badania symulacyjne obejmowały cztery podstawowe etapy, powtarzane w każdym kroku czasowym:

- identyfikacja możliwych do wykonania pakietów robót,
- alokacja zasobów do pakietów robót,
- uaktualnienie zegara systemowego,
- uaktualnienie postępu prac.

Identyfikacja możliwych do wykonania pakietów robót polega na sprawdzeniu spełnienia ograniczeń kolejnościowych między pakietami robót. Są to powszechnie stosowane relacje w sieciach jednopunktowych typu: *start-finish* (SF), *start-start* (SS), *finish-start* i *finish-finish* (FF). Możliwe jest także definiowanie wzajemnych opóźnień między rozpoczynaniem/zakończeniem procesów oraz wprowadzenie dodatkowych ograniczeń terminu rozpoczęcia lub zakończenia danego typu robót. Dodatkowo termin rozpoczęcia pakietu robót musi być poprzedzony dostawą niezbędnych wyrobów budowlanych. W przypadku, gdy jedno z tych ograniczeń nie jest spełnione, prace nie mogą być rozpoczęte i pakiet oczekuje na etap identyfikacji w następnym kroku czasowym.

W procesie alokacji zasobów nie można przekroczyć limitu dostępności zasobów określonego dla całego przedsięwzięcia, jak i limitu dla pakietu, wynikającego z wielkości frontu robót. W pierwszej kolejności zasoby do poziomu minimalnego są przypisywane pakietom już realizowanym. Pozostałe zasoby przydziela się nowym pakietom robót zgodnie z wcześniej ustaloną regułą priorytetową (np. minimalnego zapasu czasu). Jeżeli liczba aktualnie dostępnych zasobów jest mniejsza od wymaganego minimalnego poziomu dla pakietu, to jego rozpoczęcie jest opóźniane. Liczba maksymalnie przypisanych zasobów nie może być większa od maksymalnej, ustalonej na podstawie wielkości frontu robót. Takie podejście zapewnia ciągłość rozpoczętych robót, ale liczba zasobów przypisanych do jednego pakietu w kolejnych krokach czasowych może się zmieniać. Jest to niezgodne z zasadami zarządzania zasobami ludzkimi w budownictwie, bowiem preferuje się alokację do wykonywania robót brygad specjalizowanych lub branżowych o niezmiennym składzie osobowym. Ulega też zmianie czas realizacji robót w stosunku do planowanego.

Uaktualnienie zegara systemowego polega na zwiększeniu czasu systemowego o założoną wartość przyrostu czasu.

Uaktualnienie postępu prac mierzonych pracochłonnością robót zrealizowanych, będącą iloczynem długości kroku czasowego i liczby jednostek zaangażowanych zasobów. W przypadku osiągnięcia wymaganej liczby roboczogodzin, pakiet jest usuwany z możliwych do wykonania pakietów robót i dołączany do listy już zrealizowanych.

Model był testowany na przykładzie rzeczywiście realizowanej inwestycji. Badania modelu wykazały, że uzyskany czas realizacji był o 13 dni (o około 10%) krótszy niż otrzymany w wyniku zastosowania wbudowanych algorytmów wyrównywania zasobów, zaimplementowanych w komercyjnym oprogramowaniu *MS Project* i *Primavera P6*.

Li i in. (2012) przedstawili inny wariant modelu pozwalającego analizować przedsięwzięcie z uwzględnieniem dostępności zasobów odnawialnych różnego rodzaju. Ze względu na komputerową implementację zależności kolejnościowe i ograniczenia zasobowe były przedstawiane w formie macierzy incydencji i macierzy zasobów. Autorzy wykorzystali różne reguły heurystyczne alokacji zasobów (minimalnego czasu procesu, minimalnego zapasu czasu, minimalnego terminu zakończenia procesu, największego stopienia wykorzystania zasobów i maksymalnej liczby następników) w celu znalezienia rozwiązania o najkrótszym średnim czasie realizacji. Przy porównaniu wariantów były wykorzystywane te same ciągi liczb losowych (*Common Random Numbers*).

Scherer i Ismail (2011) zaprezentowali sposób tworzenia bazy danych typowych procesów budowlanych w formie łatwych do wykorzystania bibliotek w pakiecie symulacyjnym "*Plant Simulation*" (*UGS Tecnomatix*). Celem ich badań było skrócenie czasu programowania modeli symulacyjnych złożonych przedsięwzięć poprzez wykorzystanie gotowych, przetestowanych modułów. Autorzy wykorzystali powszechnie znany graficzny opis procesów zarządzania (*Business Process Modeling Notation – BPMN*) do tworzenia modeli procesów budowlanych. Model taki ma budowę hierarchiczną. Blok program, opisujący pojedynczy proces, jest łączony z innymi blokami, tworząc sekwencję procesów np. wykonanie ścian betonowych składa się z montażu deskowań, montażu zbrojenia, betonowania i demontażu deskowania. W ten sposób można tworzyć biblioteki procesów o różnym stopniu scalenia.

Sieci *Petriego* dają możliwość modelowania, tak jak sieci *GAN*, sprzężeń zwrotnych (np. wykonania robót poprawkowych), dlatego Biruk (2002) zastosował je do modelowania robót remontowych, w celu ustalenia dystrybuanty rozkładu czasu realizacji przedsięwzięcia, zarówno uwzględniając zmienność czasu wykonywania procesów budowlanych jak i zakresu robót. Jaworski i Biruk (2000) wykorzystali sieci *P/T* do planowania przedsięwzięcia złożonego z trzech takich samych obiektów budowlanych w warunkach losowych. Celem badań symulacyjnych było ustalenie terminów dyrektywnych zatrudniania brygad, dla których występuje kompromis pomiędzy ciągłością ich pracy a termi-

nem realizacji przedsięwzięcia. Biruk i Jaśkowski (2008) przedstawili model realizacji budynku wysokiego w konwencji sieci *Petriego*, w którym na każdej kondygnacji musi być zrealizowany następujący ciąg procesów technologicznych: konstrukcja żelbetowa, konstrukcja stalowa, strop żelbetowy, ściany osłonowe i ścianki działowe. Model ten został sparametryzowany: zdefiniowano liczbę powtórzeń tranzycji oraz wprowadzono dodatkowe łuki wzbraniające warunki wzbudzenia tranzycji, co doprowadziło do redukcji wielkości modelu.

Li i Liu (2014) do modelowania przedsięwzięcia budowlanego zastosowali czasowe sieci *Petriego* z kolorowymi znacznikami (ang. *Timed Coloured Petri Net – TCPN*), ze względu na to, że kolorowe znaczniki pozwalają na modelowanie różnych rodzajów zasobów. Analiza symulacyjna modelu pozwoliła określić potencjalne konflikty zasobowe, a zmiana liczby dostępnych zasobów pozwoliła na wybranie ich optymalnego poziomu, w celu zapewnienia wysokiego stopnia ich wykorzystania przy jednoczesnym dotrzymaniu terminu dyrektywnego przedsięwzięcia.

Miłosz i in. (1995) przedstawili model symulacyjny przedsiębiorstwa usługowego (transportowego, budowlanego itd.), bazujący na dynamice przemysłowej w ujęciu Forrestera, wspomagający podejmowanie decyzji strategicznych i taktycznych w zarządzaniu przedsiębiorstwem.

Metoda symulacji była także stosowana do wyznaczania wielkości buforów czasu w celu zwiększenia stabilności harmonogramu (Kulejewski i Zawistowski 2011). Może być także użyteczna podczas weryfikacji metod analitycznych projektowania harmonogramów odpornych (Jaśkowski i Biruk 2011a).

W prezentowanych w literaturze modelach symulacyjnych jest analizowany głównie czas realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Brak jest badań przedsiębiorstw budowlanych, których celem byłoby dostosowanie ich potencjału wykonawczego do wielkości zbioru zleceń (liczby realizowanych przedsięwzięć).

8. Propozycja autorskiej metodyki planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego

8.1. Wprowadzenie

W Słowniku języka polskiego PWN pod red. W. Doroszewskiego pojęcie planowania gospodarczego jest definiowane jako: „*określanie przyszłych celów i zadań ekonomicznych oraz sposobu ich realizacji*”. Ze względu na horyzont czasowy można wyróżnić: plany strategiczne (długookresowe, obejmujące kilka lat), taktyczne (średniookresowe – okres około 1 roku) i operacyjne, które koncentrują się na bieżącej działalności (Brzeziński 2002, Kasprowicz 2007). Celem nadrzędnym planowania w wymiarze strategicznym powinno być określenie optymalnej organizacji (struktury) i wielkości przedsiębiorstwa budowlanego przewidywanych warunkach prowadzenia jego działalności. Decyzje podejmowane na tym etapie pozwalają na przystosowanie kluczowych zasobów przedsiębiorstwa (ich rodzaju i ilości) do warunków rynkowych, rozwoju technologicznego budownictwa i przewidywanych zmian makro- i mikrootoczenia. Podejmowane decyzje są trudno odwracalne i mogą decydować o osiągnięciu celów długookresowych.

Po przyjęciu nowego zlecenia wykonawca w porozumieniu z inwestorem opracowuje – w ramach planowania taktycznego – harmonogram dyrektywny realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Obejmuje on swym zakresem całe zadanie inwestycyjne i wskazuje terminy dyrektywne realizacji wszystkich etapów i istotnych zdarzeń: przekazanie placu budowy, roboty przygotowawcze, zagospodarowanie placu budowy, uzbrojenie terenu, budowę obiektów podstawowych i pomocniczych, urządzenie terenu inwestycji, likwidację zaplecza i obiór. Im bardziej starannie opracowany jest harmonogram dyrektywny i bazuje on na dokładniejszych założeniach, tym mniej jest on podatny na dezaktualizację.

Kierownictwo przedsiębiorstwa budowlanego ma za zadanie zsynchronizowanie robót na wszystkich placach budów i sprawną ich koordynację, przy czym struktura organizacyjna systemów kierowania i wykonawczego poszczególnych budów powinna być ściśle powiązana ze strukturą organizacyjną przedsiębiorstwa (Dyżewski 1965, Jaśkowski 2008). Plany ogólne i szczegółowe powinny być podporządkowane podstawowym ustaleniom dyrektywnych harmonogramów rzeczowych (Rowiński 1982). W ramach projektowania realizacji budowy są ustalane terminy realizacji poszczególnych procesów przedsięwzięcia (są opracowywane harmonogramy ogólne) oraz niezbędne zasoby do ich wykonania. Ze względu na możliwość wystąpienia różnych zakłóceń realizacyjnych, długi horyzont planowania może prowadzić do szybkiej dezaktualizacji planów. Dążenie do osiągnięcia celu zgodnie z planem, w założonych terminach (a również przeciwdziałanie dezaktualizacji planów), jest podstawowym zadaniem

kierowania i planowania operatywnego. Planowanie operatywne jest nazywane również planowaniem krótkoterminowym, bieżącym ze względu na krótki horyzont planowania, najczęściej jednego dnia, tygodnia, maksymalnie jednego miesiąca. W ramach planowania operatywnego wyznacza się bezpośrednio zadania do wykonania. Kierownicy niskiego szczebla podejmują decyzje o alokacji zasobów w kolejnych terminach funkcjonowania przedsiębiorstwa na podstawie danych historycznych oraz obciążonej ryzykiem projekcji przyszłości, w celu osiągnięcia celów cząstkowych (realizacji przedsięwzięć w terminach ustalonych wcześniej, ciągłości pracy zasobów własnych, minimalizacji ilości robót zleczanych podwykonawcom itd.), wpływających na cel główny – uzyskiwanie zysków z prowadzonej działalności.

Z formalnego punktu widzenia działalność operacyjna przedsiębiorstwa budowlanego może być opisana jako zmiana stanu systemu (liczby dostępnych zasobów, terminów rozpoczynania i zakończenia procesów lub pewnych etapów czy całych przedsięwzięć), wywołana decyzjami zarządczymi, przy jednoczesnym wpływie na jego funkcjonowanie warunków losowych (Tang i Mukherjee 2013):

$$\mathbf{S}_{l+1} = [\mathbf{C}_l + \mathbf{R}] \bullet \mathbf{S}_l, \quad (8.1)$$

gdzie: \mathbf{R} odwzorowuje wpływ czynników ryzyka (np. awarie maszyn budowlanych, złe warunki atmosferyczne), \mathbf{C}_l – decyzje podejmowane na etapie l , asymbol \bullet oznacza wpływ czynników ryzyka i decyzji podjętych w stanie \mathbf{S}_l na stan \mathbf{S}_{l+1} .

Decyzje na etapie planowania operatywnego są podejmowane przez menedżerów niskiego szczebla. Dobrym planistą może być inżynier-organizator z odpowiednim stażem zawodowym (Rowiński 1982). Podejmowane decyzje, bazujące na doświadczeniu i intuicji, są próbami celowej regulacji – dostosowania planu operatywnego do nie zawsze aktualnego już harmonogramu ogólnego czy dyrektywnego. Decyzje te nie zawsze są zbliżone do optymalnych ze względu na złożoność problemów decyzyjnych oraz konieczność zbierania i analizy wielu danych. Jakość podejmowanych decyzji zarządczych można podnieść stosując metody optymalizacyjne i komputerowe systemy wspomaganie decyzji (Chua i in. 2003, Sriprasert i Dawood 2003). System komputerowy zarządzania zasobami przedsiębiorstwa budowlanego powinien umożliwiać codzienną aktualizację stanu systemu, na podstawie informacji przekazywanych z budów, i podejmowanie skorygowanych decyzji, uwzględniających dotychczasowy przebieg robót na wszystkich budowach, w celu wdrożenia działań umożliwiających dotrzymanie planowanych terminów realizacji etapów budowy (Orihuela i in. 2016).

Działalność przedsiębiorstwa budowlanego może być przedstawiona jako układ sterowania, gdzie obiektem sterowanym są budowy a organem sterującym

kierownictwo przedsiębiorstwa (Kasprowicz 2002). Poprzez kanał sprzężenia bezpośredniego są przekazywane polecenia dotyczące sposobu alokacji zasobów i wykonania procesów budowlanych, natomiast – poprzez kanał sprzężenia zwrotnego – informacje dotyczące przebiegu robót budowlanych. Bieżące przetwarzanie i analiza tych informacji pozwala na podejmowanie racjonalnych decyzji opartych na doświadczeniu decydenta lub optymalnych czy suboptymalnych opracowanych z wykorzystaniem matematycznych metod podejmowania decyzji. Decyzje optymalne z punktu widzenia przedsiębiorstwa budowlanego nie muszą być optymalnymi z punktu widzenia poszczególnych budów.

Przedsiębiorstwo budowlane jest złożonym systemem probabilistycznym. Jego długotrwałe działanie zapewniają decyzje zarządcze kierownictwa podejmowane zgodnie z zasadą samoregulacji i samodoskonalenia, z niezbędnym przystosowaniem się do środowiska zewnętrznego (Rybalski 1970). Podejmowanie decyzji, zarówno na etapie planowania strategicznego, taktycznego jak i operatywnego, powinno być wspomagane komputerowo.

W rozdziale 8.2 przedstawiono metodykę planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego. Jej podstawą jest autorski model symulacyjny realizacji planu produkcyjnego (opisany w podrozdziale 8.2.2) mający na celu badanie wpływu poziomu jego zasobów i stosowanie różnych reguł heurystycznych alokacji zasobów odnawialnych na terminowość wykonywania robót. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwalają na ustalenie poziomu własnych zasobów odnawialnych (liczby brygad roboczych, sprzętu budowlanego itp.) i są pomocne w dostosowaniu struktury systemu roboczego przedsiębiorstwa do warunków rynkowych na etapie strategicznym podejmowania.

Podczas planowania taktycznego przedsięwzięć budowlanych określa się dyrektywny termin przedsięwzięcia budowlanego na przyjętym poziomie niezawodności na podstawie dystrybucji zmiennej losowej czasu realizacji przedsięwzięcia. W klasycznej metodzie *PERT* przyjmuje się, że czas realizacji przedsięwzięcia jest zmienną losową o rozkładzie normalnym, która jest sumą zmiennych losowych procesów należących do drogi krytycznej. Dystrybucja rozkładu może być także określona na podstawie analizy symulacyjnej *Monte Carlo*. W tym przypadku uwzględnia się wpływ wszystkich dróg w sieci na termin zakończenia przedsięwzięcia. Zazwyczaj nie uwzględnia się jednak dostępności zasobów przy ustalaniu terminu realizacji przedsięwzięcia. Analiza symulacyjna pozwala na przyjęcie limitów zasobów odnawialnych, ale zazwyczaj zakłada się ich stałą lub znaną w określonych okresach dostępność podczas realizacji przedsięwzięcia.

Badania symulacyjne realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego pozwalają na wyznaczenie rozkładu czasu przedsięwzięcia nie tylko z uwzględnieniem poziomu dostępności zasobów odnawialnych, ale także współdzielenia zasobów wspólnych przedsiębiorstwa budowlanego oraz zmiennego w czasie planu produkcyjnego (liczby i zakresu realizowanych równoległe zleceń). W ten sposób dystrybucja powinna być podstawą ustalania

terminu dyrektywnego na przyjętym przez decydenta poziomie prawdopodobieństwa jego dotrzymania. Jest to etap planowania taktycznego. Wyznaczoną przykładową dystrybuantę czasu realizacji przy analizowanych ograniczeniach zasobowych przedstawiono w przykładzie w podrozdziale 8.2.3.

W rozdziale 8.3 przedstawiono proponowany system zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*) wraz z przykładami ilustrującymi jego działanie. W systemie *SZOZOPB* zaimplementowano te same reguły alokacji zasobów co w modelu symulacyjnym realizacji planu produkcyjnego.

Zaproponowane modele (model symulacyjny planu produkcyjnego i system *SZOZOPB*) mogą umożliwić zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów budowlanych. System *SZOZOPB* wypełnia lukę pomiędzy zarządzaniem strategicznym przedsiębiorstwem, planowaniem dyrektywnym i ogólnym budowy apodejmowaniem decyzji przez menedżerów budowlanych niskiego szczebla na budowie.

Przedstawiona metodyka planowania zasobów może mieć także zastosowanie do analizy systemu wykonawczego przedsięwzięcia budowlanego. Pojęcie „system wykonawczy przedsięwzięcia” zastosowano w celu odróżnienia go od określenia – system roboczy przedsiębiorstwa. Jego zadaniem jest wykonawstwo procesu realizacyjnego – zespołu działań technicznych, z wykorzystaniem dysponowanych zasobów: środków technicznych, siły roboczej, na realizowanych na obiektach budowlanych, zgodnie z przyjętymi procedurami technologicznymi, organizacyjnymi i zasadami ekonomicznymi (Jaśkowski 2008).

8.2. Wspomaganie planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego

8.2.1. Proponowana metodyka planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego

Proponowana metodyka planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego obejmuje następujące etapy (rys. 8.1):

- Sformułowanie problemu

Krytyczna analiza literatury przedmiotu i wywiady z wieloma uczestnikami procesu inwestycyjnego wykazały, że problem zagadnienia planowania zasobów przedsiębiorstwa budowlanego został opisany w sposób niewystarczający, a pakiety komercyjne skupiają się na projektowaniu realizacji pojedynczych pojedynczych przedsięwzięć. Najbardziej zaawansowana metoda zarządzania zasobami odnawialnymi w realizacji wielu przedsięwzięć *Resource Allocation and Multi-Project Scheduling (RAMPS)* nie uwzględnia zmienności planu produkcyjnego i losowych czasów realizacji procesów budowlanych. Nie opisano także szczegółowo stosowanych w niej algorytmów harmonogramowania procesów przy limitowanych poziomach ich dostępności. Z tego powodu w rozprawie

podjęto próbę opracowania i zaproponowano metodykę planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego przy zmiennym zakresie robót spowodowanych losowymi terminami pozyskiwania nowych zleceń i losowymi czasami realizacji procesów budowlanych.

- Zebranie i opracowanie danych potrzebnych do opracowania modelu
Dane niezbędne do modelowania symulacyjnego obejmują:
 - typy realizowanych przedsięwzięć (robót) budowlanych modelowanych za pomocą sieci zależności,
 - intensywność strumienia zgłoszeń (rozpoczynania kolejnych przedsięwzięć),
 - typy i parametry rozkładów czasu realizacji procesów budowlanych,
 - identyfikację kluczowych zasobów (ich rodzaju i zapotrzebowań) niezbędnych do realizacji procesów budowlanych,
 - limity dostępności analizowanych zasobów przedsiębiorstwa budowlanego.

- Budowa modelu symulacyjnego realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego

Ze względu na złożone relacje między elementami analizowanego systemu (przedsiębiorstwa budowlanego), które muszą oprócz zależności kolejnościowych uwzględniać interakcje procesów realizowanych równolegle na różnych palcach budów z uwzględnieniem losowości terminów ich rozpoczynania, do opisu analizowanego problemu wybrano metodę symulacji komputerowej. Zasady budowy modeli symulacyjnych opisano w rozdziale 6, proponowany model wraz z zaimplementowanymi regułami heurystycznymi został przedstawiony w podrozdziale 8.2.2, a przykłady zastosowania reguł w harmonogramowaniu procesów budowlanych zawiera podrozdział 8.3.3.

- Weryfikacja i walidacja modelu

Poprawność działania modelu była sprawdzana przede wszystkim na etapie jego budowy. Walidacja modelu jest utrudniona ze względu na brak opisanych w literaturze modeli probabilistycznych planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego. Brak jest też wiarygodnych danych historycznych o czasach realizacji procesów budowlanych, dostępności zasobów i stosowanych w praktyce metodach ich rozdziału. Oceny jakości modelu może jedynie dokonać zarząd analizowanego przedsiębiorstwa przed wdrożeniem metodyki do praktyki planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa.

- Badania symulacyjne

Badania symulacyjne mają na celu analizę wpływu zmian parametrów wejściowych, głównie poziomu dostępności i wybranej reguły heurystycznej alokacji zasobów na parametry wyjściowe. Mierniki efektywności proponowanego rozwiązania powinny być konsultowane z zarządem przedsiębiorstwa i być zgodne ze strategią przedsiębiorstwa. Funkcjonowanie systemu może być oceniane na przykład poprzez:

- liczbę zrealizowanych przedsięwzięć w określonym czasie,
- średnią wartość czasu realizacji przedsięwzięć,
- średnią wartość wydłużenia terminu realizacji w stosunku do planowanego,
- liczbę lub koszt „przerzutów” zasobów,
- stopień wykorzystania zasobów odnawialnych,
- koszty niewykorzystania zasobów,
- koszty „przerzutów” zasobów z jednego placu budowy na drugi, karę za wydłużenie terminów realizacji.

Mierniki można uwzględnić łącznie poprzez funkcję kryterialną. Wymaga to wyrażenia ich we wspólnych jednostkach, np. pieniężnych. Rozwiązanie takie pozwala na znalezienie rozwiązania optymalnego ze względu na przyjętą funkcję celu, ale standaryzacja mierników może prowadzić do utraty części informacji.

Zaleca się przeprowadzenie badań symulacyjnych przy założeniu nieograniczonej dostępności zasobów. Pozwala to na oszacowanie najkrótszych czasów realizacji przedsięwzięć oraz poziomu zaangażowanych zasobów i ich stopnia wykorzystania. Obliczone mierniki mogą być użyteczne do oceny rozwiązań uzyskanych przy analizach uwzględniających limity zasobów. Na ich podstawie, po zaakceptowaniu przez zarząd, jest możliwe ograniczenie poziomów zmienności zasobów w dalszych badaniach symulacyjnych. Należy wtedy dokonać oceny skuteczności reguł heurystycznych alokacji zasobów i wpływu dodatkowych ograniczeń (blokowanie zasobu na budowach, zwiększenie długości okresu planowania) w celu znalezienia rozwiązania suboptymalnego ze względu na przyjęte kryterium optymalizacji. Dla ustalonego rozwiązania suboptymalnego należy wyznaczyć dystrybuanty rozkładu czasu realizacji przedsięwzięć, a więc i terminy dyrektywne na określonym poziomie niezawodności, uwzględniające limity w dostępności zasobów i równoległą realizację robót budowlanych na wielu placach budowy.

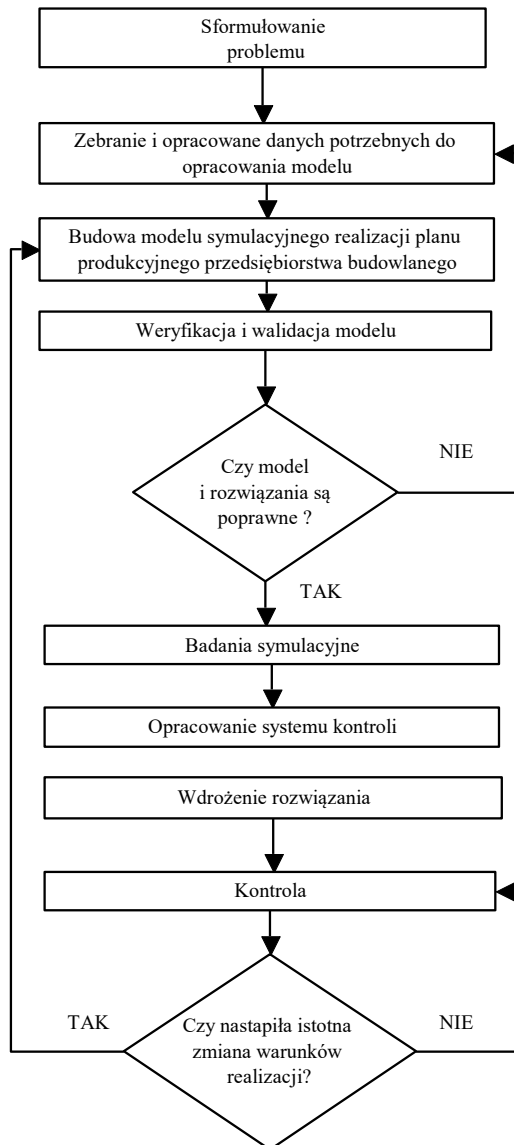
- Opracowanie systemu kontroli

Ze względu na zmiany otoczenia przedsiębiorstwa system kontroli powinien obejmować ciągle śledzenie zmian koniunktury na rynku i uaktualnianie: rodzajów realizowanych przedsięwzięć i rozkładów ich zgłoszeń (rozpoczynania nowych zleceń). Konieczność ta może też wynikać ze zmiany strategii przetargowej przedsiębiorstwa lub pozyskiwania nowych segmentów rynku. Należy też analizować możliwość zwiększenia lub zmniejszenia potencjału wytwórczego przedsiębiorstwa, analizując jego sytuację finansową. Działania te muszą być zgodne ze strategią przedsiębiorstwa.

- Wdrożenie rozwiązania

Ustalona liczba kluczowych jednostek zasobów odnawialnych, czasy realizacji przedsięwzięć, różnice w terminach planowanych a ustalonych na etapie badań symulacyjnych mogą być wskazówką dla zarządu przedsiębiorstwa do usta-

lenia racjonalnego poziomu zatrudnienia i wyposażenia przedsiębiorstwa budowlanego. Wyniki analiz pomagają uzasadnić konieczność dokonania niezbędnych inwestycji lub ograniczenia potencjału produkcyjnego oraz wprowadzenia zmian w systemie zarządzania.



Rys. 8.1. Główne etapy metodyki planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego

Uznane za najskuteczniejsze reguły alokacji zasobów, ze względu na zaakceptowany przez zarząd kryterium oceny realizacji planu produkcyjnego, powinny stać się wytyczną do harmonogramowania procesów na etapie operacyjnym i zastosowane w proponowanym systemie zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*).

- Kontrola

Postęp organizacyjny i technologiczny może powodować konieczność projektowania nowych modeli sieciowych i ponownego szacowania czasu realizacji procesów budowlanych. W procesie tym może być pomocne dokumentowanie zrealizowanych procesów budowlanych i analiza przyczyn niezgodności rzeczywistych i planowanych terminów ich realizacji. Prowadzone analizy i przegląd systemu zarządzania zasobami może wymusić rozbudowę modelu symulacyjnego i wprowadzenie dodatkowych ograniczeń (w przypadku stwierdzenia ich istotnego wpływu), które w większym stopniu odwzorowują warunki realizacyjne, np. uwzględnienie korelacji czasu realizacji procesów budowlanych, na które oddziałują te same czynniki ryzyka, czy zależność czasu realizacji procesu od pory roku itp.

Konieczne jest także ciągle doskonalenie i szkolenie służby dyspozytorskiej oraz menedżerów wyższego szczebla.

8.2.2. Opis modelu symulacyjnego planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego

Modelowanie realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa wymaga określenia liczby typów planowanych przez nie przedsięwzięć i zaprojektowania dla każdego typu modelu sieciowego. Zlecenia są modelowane jako zgłoszenia w systemie masowej obsługi. Zakłada się, że rozkłady zgłoszeń i ich parametry są znane. W modelu założono, że względu na warunki ryzyka, że terminy rozpoczęcia nowych przedsięwzięć (zgłoszeń) mogą być opisane rozkładem równomiernym lub trójkątnym, różnym dla każdego typu zlecenia.

Rozkład równomierny na przedziale (t_a, t_b) uzyskuje się dzięki transformacji liniowej:

$$T = t_a + (t_b - t_a) \cdot U, \quad (8.2)$$

gdzie U zmienna losowa o rozkładzie równomiernym na przedziale $(0, 1)$.

Do generowania liczb losowych o rozkładzie trójkątnym o parametrach (t_a, t_m, t_b) takich, że $(t_a < t_m < t_b)$, stosuje się zależność:

$$F^{-1}(u|t_a, t_m, t_b) = \begin{cases} t_a + \sqrt{u(t_m - t_a) \cdot (t_b - t_a)} & \text{dla } 0 \leq u \leq \frac{t_m - t_a}{t_b - t_a} \\ t_b - \sqrt{(1-u) \cdot (t_b - t_m) \cdot (t_b - t_a)} & \text{dla } \frac{t_m - t_a}{t_b - t_a} \leq u \end{cases}, \quad (8.3)$$

gdzie u jest liczbą losową o rozkładzie równomiernym na przedziale $(0, 1)$.

Wartości liczb u_s , ($s = 1, 2, \dots$) z rozkładu U są ustalane z wykorzystaniem predefiniowanego w języku *Java* generatora liczb pseudolosowych z zakresu $(0, 1)$.

W symulatorze jest wymagane dla każdego rodzaju przedsięwzięcia zdefiniowanie macierzy incydencji (zależności kolejnościowych) dla każdego rodzaju przedsięwzięcia, wagi procesów, rodzaju i liczby niezbędnych zasobów do realizacji każdego procesu oraz oszacowań czasu wykonania procesów. Przyjęto, że czasy realizacji procesów mogą być opisane rozkładem równomiernym lub trójkątnym i będą losowane zgodnie z zależnością 8.2 lub 8.3.

Dodatkowo należy ustalić poziom dostępności kluczowych zasobów odnawialnych oraz ich wagi (koszt wykorzystania).

Po pojawieniu się nowego zamówienia w systemie w terminie t_i zgodnie z zasadami metody *CPM* są obliczane planowane terminy rozpoczęcia i zakończenia procesów (zadań) oraz całego przedsięwzięcia (bez uwzględnienia dostępności zasobów) na podstawie przyjętych oszacowań czasu optymistycznego t_a , pesymistycznego t_b i najbardziej prawdopodobnego t_m dla rozkładu trójkątnego oraz t_a i t_b dla równomiernego. Na tym etapie, planista ma możliwość oszacowania wpływu czynników ryzyka na czas wykonania procesów, przyjmując wartość $u_r \in [0, 1]$. Planowany czas t_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) procesu i jest obliczany zgodnie z wyrażeniem 8.2 w przypadku rozkładu równomiernego i 8.3 trójkątnego dla wartości u_r . Przyjmując $u_r = 0$ zakładamy, że planowany czas realizacji procesu będzie równy oszacowaniu optymistycznemu t_a , dla $u_r = 1$ pesymistycznemu t_b , a dla $u_r = 0,5$ odpowiada medianie przyjętego rozkładu.

W modelu symulacyjnym zaimplementowano następujące reguły heurystyczne alokacji zasobów:

- Według priorytetu procesu określanego przez decydenta (*DMP*). Wartość tego priorytetu (przyjmujące dowolne wartości ze zbioru liczb naturalnych) może być określana na podstawie subiektywnej oceny zarządzającego zasobami przedsiębiorstwa, ale także na podstawie np. obliczonych dla przedsięwzięć mierników krytyczności procesów (rozdział 5), rang procesów (planowanego czasu od momentu rozpoczęcia danego procesu do momentu zakończenia przedsięwzięcia) lub maksymalnej liczby krytycznych następników ustalonych dla warunków deterministycznych czy też kosztu procesu.

- Maksymalnej liczby bezpośrednich następników (*MIS*).
- Minimalnego czasu realizacji procesu (*SPT*), ustalanego na podstawie czasu planowanego.
- Maksymalnego czasu oczekiwania (*FCFS*).
- Minimalnego całkowitego zapasu czasu (*DMSLK*). Jest to reguła dynamiczna, bowiem zapas czasu jest obliczany na podstawie rzeczywistego czasu realizacji procesów już zrealizowanych (wprowadzonego do systemu przez decydenta) i planowanego dla niezrealizowanych. Całkowity zapas czasu procesu zmienia się w zależności od dotychczasowego przebiegu przedsięwzięcia w warunkach losowych, ale także od poziomu dostępności zasobów i sposobu ich alokacji.
- Minimalnego terminu najpóźniejszego rozpoczęcia procesu (*LST*). Termin zakończenia jest obliczany tylko jeden raz dla czasów planowanych. Zakłada się tak jak w metodzie *CPM*, że dla zdarzenia końcowego sieci zależności, najwcześniejszy dopuszczalny termin jest równy terminowi najpóźniejszemu. Terminy najpóźniejsze t_{ri}^1 rozpoczęcia procesu i są obliczane zgodnie z zależnością:

$$t_{ri}^1 = \min_j \{t_{rj}^1 - t_i\}, \quad (8.4)$$

gdzie: t_i – czas realizacji procesu i , t_{rj}^1 – najpóźniejszy możliwy termin rozpoczęcia procesu j ($j = 1, 2, \dots$), a j jest bezpośrednim następnikiem procesu i .

Do realizacji jest kierowany proces o najmniejszej wartości obliczonej zgodnie z wyrażeniem (8.4). Jest to heurystyka podobna do reguły maksymalnego opóźnienia procesu (*MDP*), ale wybór procesów rozpatrywanych przy alokacji zasobów jest ograniczany do procesów o największej krytyczności – wybór procesów do realizacji odbywa się w taki sposób, aby miał jak najmniejszy wpływ na opóźnienie realizacji przedsięwzięcia.

- Minimalnego terminu zakończenia procesu (*EFT*). Dla każdego procesu termin zakończenia jest obliczany jako aktualny termin jego rozpoczęcia powiększony o planowany czas jego.
- Maksymalnego opóźnienia procesu (*MDP*). Opóźnienie procesu jest obliczane jako różnica pomiędzy planowanym terminem rozpoczęcia (obliczonym dla modelu deterministycznego) a aktualnym terminem alokacji zasobów.
- Największego zapotrzebowania na zasoby odnawialne (*RED*). Ze względu na różne rodzaje zasobów przypisano im wagi v_j (koszty wykorzystania) zasobów $j = 1, 2, \dots, m$, a priorytet procesu i , $i = 1, 2, \dots, n$, jest obliczany następująco:

$$RED_i = t_i \cdot \sum_{j=1}^m v_j \cdot r_{ij}, \quad (8.5)$$

gdzie: r_{ij} to liczba zasobów typu j niezbędnych do wykonania procesu i o planowanym czasie t_i .

- Zmodyfikowanego największego zapotrzebowania na zasoby odnawialne ($MRED$), która od poprzedniej różni się tym, że przy obliczaniu wartości priorytetu nie uwzględnia się czasu planowanego wykonania procesów:

$$MRED_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot r_{ij}, \quad i \in A, \quad (8.6)$$

a A to zbiór procesów, których poprzedniki zostały zakończone do terminu podejmowania decyzji o skierowaniu do realizacji, a nie przydzielono im jeszcze zasobów.

- Losowej wartości priorytetu procesu (RAN), według której ze zbioru możliwych do rozpoczęcia, procesy wybierane są losowo. Po każdym skierowaniu procesu do realizacji, jest uaktualniany poziom dostępności zasobów i powtarzany wybór losowy, aż zbiór procesów możliwych do rozpoczęcia jest pusty.

W systemie zarządzania zasobami zaimplementowano także regułę heurystyczną największego stopnia wykorzystania zasobów (GRU), której celem jest maksymalizacja wartości:

$$\max : \sum_{i \in A} \sum_{j=1}^m \delta_i \cdot v_j \cdot r_{ij}, \quad i \in A, \quad (8.7)$$

gdzie $\delta_i \in \{0,1\}$ jest równa 1, gdy proces i jest kierowany do realizacji, 0 w przeciwnym razie.

Zasady harmonogramowania procesów budowlanych z uwzględnieniem dostępności przy stosowaniu wbudowanych reguł zostały przedstawione na przykładach w podrozdziale 8.3.2.

W przypadku, gdy istnieje kilka procesów możliwych do rozpoczęcia (zrealizowane zostały wszystkie poprzedzające je procesy), ale tylko część z nich może być skierowana do realizacji ze względu na ograniczoną liczbę dostępnych jednostek zasobów, a wybrana reguła priorytetowa nie rozstrzyga, który z nich powinien być kierowany do realizacji, to wybór procesu odbywa się na podstawie drugiej wybranej przez decydenta reguły pomocniczej. W przypadku tych samych wartości priorytetów dla reguły pomocniczej wskazanie procesu odbywa się losowo.

W celu efektywnego zarządzania zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego w modelu symulacyjnym wprowadzono centralny magazyn zasobów

bów oraz magazyny na budowach. Jednostki danego zasobu pozostają w magazynie na budowie do czasu zakończenia ostatniego procesu, do realizacji którego zasób jest angażowany. Po realizacji ostatniego procesu, którego wykonanie jest uwarunkowane dostępnością tego zasobu, wraca on do magazynu centralnego lub może być wykorzystany na innej budowie. W tym wypadku przerzut zasobu nie jest rejestrowany. Podejmując decyzji o skierowaniu procesu do realizacji, decydent rozważa konieczność przerzutów jednostek zasobów (brygad roboczych i sprzętu) z jednego placu budowy na drugi. Liczba przerzutów zasobów jest zapamiętywana.

Elementem modelu symulacyjnego uwzględniającym specyfikę produkcji budowlanej jest możliwość blokowania zasobów na budowach. Dla każdego typu zasobu istnieje możliwość zdefiniowania różnego czasu rezerwacji. Jednostki zasobu pozostają na budowie pod warunkiem, że będą one potrzebne do realizacji innych procesów na tej budowie, ale brak ich wykorzystania jest rejestrowany w systemie jako czas bezczynności. Po upływie terminu rezerwacji jednostki zasobu stają się dostępne dla innych budów. Opcja blokowania zasobów przewidziana jest dla zasobów o wysokich kosztach transportu z jednej budowy na drugą; np. koparek, żurawi i innego ciężkiego sprzętu.

Kolejną opcją modelu symulacyjnego wynikającą ze specyfiki budownictwa, przede wszystkim z długiego czasu wykonania procesów, jest możliwość wprowadzenia horyzontu planowania Δt (parametr modelu). W terminie t_i podejmowania decyzji o rozdziale zasobów jest tworzona wspólna lista procesów, która obejmuje:

- procesy możliwe do wykonania, których wszystkie poprzedniki zostały zrealizowane, a nie przypisano do nich jeszcze zasobów,
- bezpośrednie następniki procesów rozpoczętych, których jest planowane zakończenie w przyjętym horyzoncie planowania tzn. do terminu $t_i + \Delta t$.

Na tym etapie, przy rozdziale zasobów uwzględniany są także zasoby zwalniane przez procesy planowane do zakończenia w przedziale czasowym $t_i + \Delta t$.

Uwzględnienie przy alokacji zasobów bezpośrednich następników procesów rozpoczętych zapewnia wyższy stopień harmonizacji robót, których planowanie jest obarczone najmniejszym ryzykiem (największą pewnością realizacji w terminach planowanych).

Opcja blokowania zasobów na budowach i idea horyzontu planowania została przedstawiona na przykładach w podrozdziale 8.3.2.

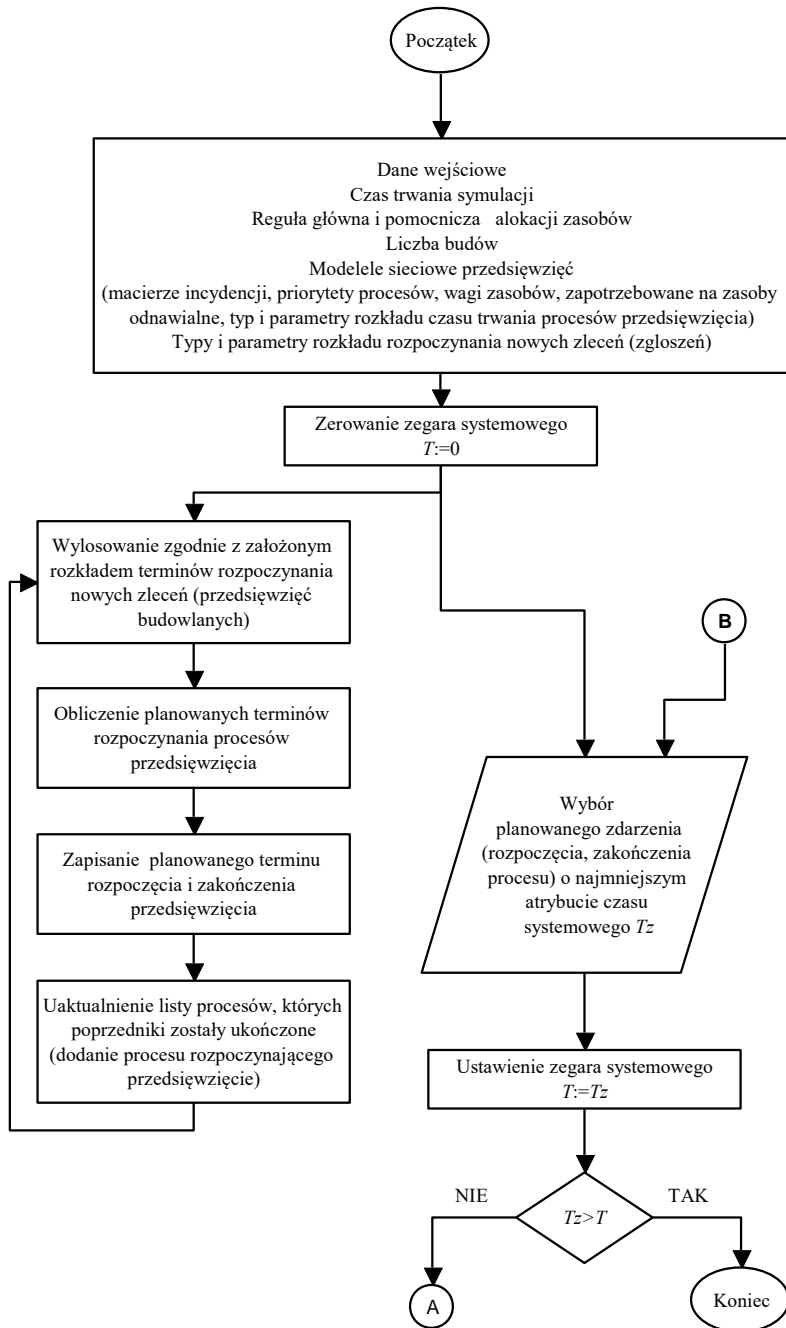
W symulatorze można dopuścić możliwość podzlecenia robót. Brakujące zasoby (brygady robocze, maszyny budowlane itp.) mogą być wynajmowane. W takim przypadku procesy je angażujące będą realizowane w terminach najwcześniejszych.

Informacje o przebiegu realizacji zleceń przedsiębiorstwa są jako wynik badań symulacyjnych realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa są gromadzone w postaci następujących plików danych wyjściowych:

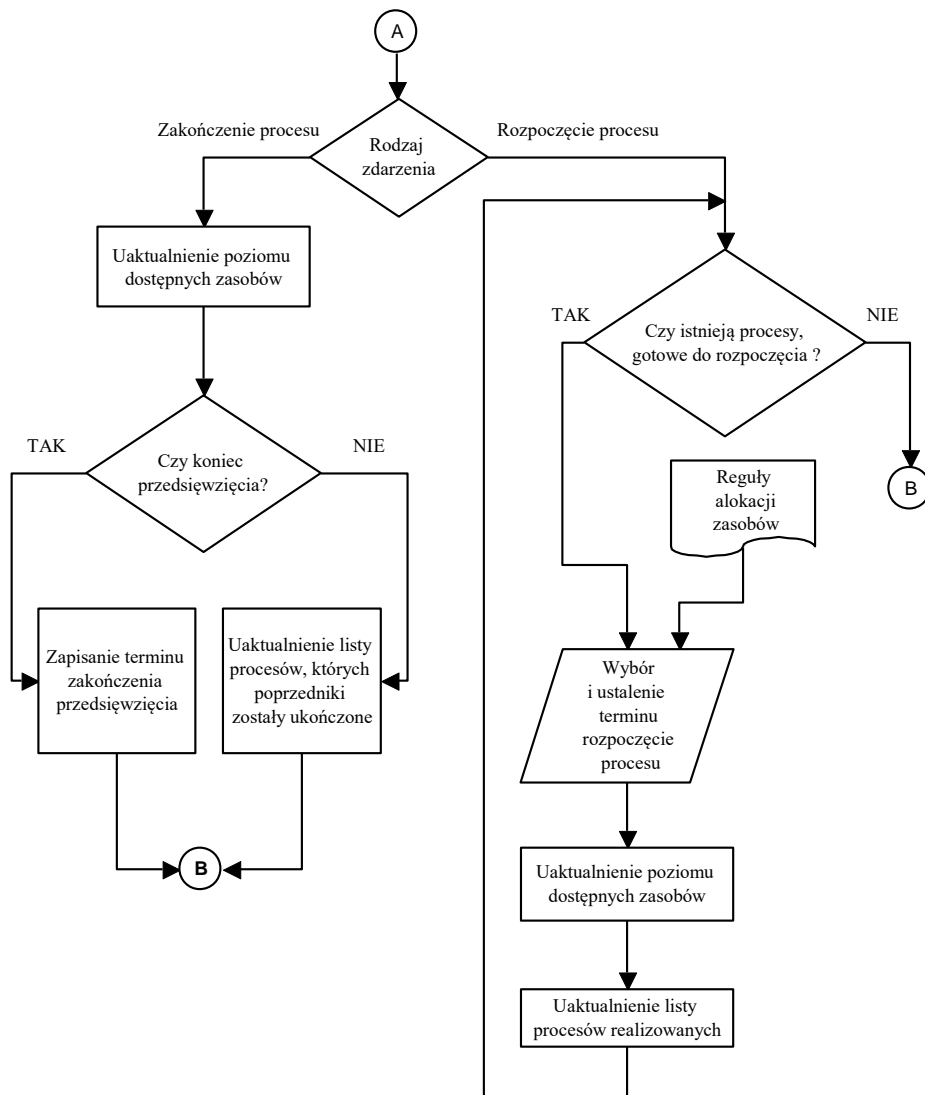
- plik zawierający terminy planowane i rzeczywiste rozpoczęcia oraz zakończenia każdego zrealizowanego przedsięwzięcia,
- plik zawierający liczbę przerzutów z budowy na budowę dla każdego typu zasobu,
- oddzielne pliki dla każdego typu zasobów zawierające informacje o długości okresów, w których była wykorzystywana ustalona liczba jednostek zasobów oraz częstość wykorzystywania zasobu na określonym poziomie,
- plik zawierający statystyki zasobów zewnętrznych (wynajmowanych), tzn. liczbę i czas ich wykorzystania.

Schemat działania modelu symulacyjnego realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego przedstawiono na rysunku 8.2.

Przedsiębiorstwo budowlane funkcjonuje w sposób ciągły przez długi okres bez przerw. Model systemu planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego osiąga stan stabilny po pewnym okresie początkowym (tzw. okres rozgrzewania modelu), po zakończeniu którego pozyskiwane są obserwacje o jego funkcjonowaniu – stanowiące próbę losową. Stąd wprowadzono, definiowany przez decydenta parametr czasu, który pozwala na odrzucanie obserwacji z okresu przejściowego (niestacjonarnego). Analiza danych wyjściowych pozwala na określenie poziomu zatrudnienia zasobów własnych przedsiębiorstwa i ich wpływu na terminy realizacji przedsięwzięć budowlanych (zleceń) i koszty przerzutu zasobów w warunkach losowych. Symulator realizacji planu produkcyjnego i system *SZOZOPB* został oprogramowany w języku programowania ogólnego przeznaczenia *Java Standard Edition 8* w środowisku *Eclipse IDE for Java Developers*.



Rys. 8.2. Schemat modelu symulacyjnego realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego



Rys. 8.2. cd. Schemat modelu symulacyjnego realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego

8.2.3. Przykład symulacyjnego ustalenia poziomu zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego

W strukturze wielkości przedsiębiorstw budowlanych w Polsce dominują małe podmioty gospodarcze, tj. o liczbie pracowników poniżej 50 osób, a średnia zatrudnienia wynosi około 34 osób (GUS 2016). Na podstawie przeprowadzonych wywiadów z kierownikami budów z regionu lubelskiego wyróżniono dwa

typy funkcjonujących w tym rejonie przedsiębiorstw budowlanych ze względu na zakres produkcji. Przedsiębiorstwa pierwszego rodzaju, zatrudniające zazwyczaj niewielką liczbę pracowników, koncentrują swoją działalność na robotach stanu surowego. Przystępują do przetargów na realizację robót budowlanych, a po uzyskaniu zlecenia dużą część robót, przede wszystkim roboty wykończeniowe i specjalistyczne, podzlecają niewielkim podmiotom gospodarczym, często mikroprzedsiębiorstwom. Świadczą także usługi w zakresie swojej specjalizacji większym podmiotom gospodarczym. Program produkcyjny takich przedsiębiorstw jest losowy, a zarządzanie zasobami odbywa się intuicyjnie.

Drugi rodzaj przedsiębiorstw ukierunkowuje swoją działalność na segment rynku budownictwa mieszkaniowego. Przedsiębiorstwa te świadczą usługi deweloperskie lub stale współpracują z firmami deweloperskimi, przez co przyszły zbiór zleceń i zakres robót jest bardziej przewidywalny. Menadżerowie starają się utrzymać pewien stały poziom zatrudnienia pracowników, zapewniający terminowe i odpowiedniej jakości wykonywanie robót, przede wszystkim własnymi siłami. Jest to szczególnie istotne w przypadku braku wykwalifikowanych pracowników na rynku.

Małe i średnie przedsiębiorstwa nie archiwizują informacji o przebiegu zrealizowanych przedsięwzięciach budowlanych, dlatego dane wejściowe do modelu symulacyjnego (m. in. modele sieciowe przedsięwzięć, parametry rozkładów czasu procesów budowlanych) zostały pozyskane od kierowników budów jednego z lubelskich przedsiębiorstw budowlanych specjalizującego się w budownictwie mieszkaniowym. Realizowane budynki mieszkalne mają konstrukcję żelbetową monolityczną z murowanymi wypełnieniami ścian osłonowych.

Udało się dokonać klasyfikacji realizowanych zleceń na 4 zasadnicze typy. Opisano je poniżej.

Typ 1. Budynek mieszkalny o powierzchni około 1000 m² (20–25 mieszkań). Mieszkania w tych budynkach są poszukiwane przez lokatorów, ze względu na wysoki komfort użytkowania. Liczba wznoszonych budynków tego typu jest stosunkowo niewielka ze względu na małą dostępność działek budowlanych przydatnych pod taką zabudowę i ze względu na ich wysoką cenę.

Typ 2. Budynek mieszkalny o powierzchni 2200–2500 m² (około 50 mieszkań). Wielkość tego obiektu jest kompromisem pomiędzy komfortem zamieszkania w bloku a stopniem wykorzystania działki budowlanej.

Typ 3. Budynek mieszkalny o powierzchni ponad 5000 m² (około 100 mieszkań). Budynki te powstają zazwyczaj na działkach o dobrej lokalizacji. Wysoka cena działki budowlanej zmusza dewelopera do maksymalnego jej wykorzystania, a lokalizacja rekompensuje lokatorom niedogodności wynikające z zamieszkania w dużym bloku.

Typ 4. Zespoły budynków. Wielkość działki umożliwia realizację kilku obiektów budowlanych. Budynki te są oddawane do użytku etapowo. Najczęściej są to dwa budynki mieszkalne o powierzchni od 2200 do 2500 m².

W badaniach symulacyjnych funkcjonowania analizowanego przedsiębiorstwa założono, że będzie ono realizować wszystkie 4 typy zleceń. W modelu symulacyjnym przyjęto, że zgłoszenia (odstępny pomiędzy terminami rozpoczęcia kolejnych inwestycji tego samego typu) są opisane rozkładem równomiernym o parametrach podanych w tabeli 8.1. Rozkłady prawdopodobieństwa czasu wykonania procesów budowlanych zostały przyjęte jako trójkątne, a ich parametry zostały oszacowane przez ekspertów. Czas odbioru budynku opisano rozkładem równomiernym. Szczegółowej analizie zostaną poddane kluczowe zasoby przedsiębiorstwa: brygady cieśli, murarzy oraz tynkarzy. Pracownicy o tych specjalnościach zawodowych stanowią większą część załogi analizowanego przedsiębiorstwa. Założono pełną dostępność pozostałych zasobów odnawialnych. Etatowymi pracownikami są także blacharze i brukarze. Pracownikom tym jest trudno zapewnić ciągłość pracy w obrębie planu produkcyjnego jednego przedsiębiorstwa ze względu na zbyt mały zakres realizowanych robót. Brygady blacharzy i brukarzy świadczą usługi na rzecz innych przedsiębiorstw budowlanych.

W przykładzie, każdy proces wykonuje tylko jedna brygada, nie jest celowym zatem wykorzystywanie reguły alokacji zasobów maksymalnego zapotrzebowania na zasoby odnawialne (*RED*) czy też największego stopnia wykorzystania zasobów (*GRU*).

Tabela 8.1. Parametry rozkładów czasu pomiędzy terminami rozpoczęcia (zgłoszeń) kolejnych zleceń

Inwestycja	Parametry rozkładu równomiernego [dni]	
	t_a – czas minimalny	t_b – czas maksymalny
Typ 1	150	190
Typ 2	70	90
Typ 3	140	170
Typ 4	170	210

Model sieciowy przedsięwzięcia typu 1 przedstawiono na rysunku 8.3, a wyszczególnienie realizowanych procesów, parametry rozkładów czasu wykonania oraz zasoby niezbędne do ich realizacji zamieszczono w tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Procesy, parametry rozkładów czasu wykonania i niezbędne zasoby przedsięwzięcia typu 1

Lp.	Nazwa procesu	Parametry rozkładu trójkątnego			Zasoby		
		t_a	t_b	t_m	Brygada cieśli	Brygada murarzy	Brygada tynkarzy
1	Roboty przygotowawcze	5	10	7			
2	Wykopy	10	25	20			
3	Fundamenty	15	30	20	1		
4	Ściany piwnic	15	24	18	1		
5	Strop piwnic	7	12	9	1		
6	Ściany parteru	4	7	5	1		
7	Strop parteru	5	10	7	1		
8	Ściany I piętra	4	7	5	1		
9	Strop I piętra	5	10	7	1		
10	Ściany II piętra	4	7	5	1		
11	Strop II piętra	5	10	7	1		
12	Stropodach	5	8	6			
13	Obsypanie fundamentów	3	5	4			
14	Krycie dachu	5	10	7			
15	Okna i drzwi	8	11	9			
16	Elewacja	9	23	14			1
17	Roboty zewnętrzne	10	25	15			
18	Posadzka piwnic	3	6	4			
19	Ściany murowane piwnic	6	8	7		1	
20	Ściany murowane parteru	5	8	6		1	
21	Ścianki działowe parteru	4	7	5		1	
22	Tynki parteru	7	10	8			1
23	Podkłady – parter	2	4	3			
24	Ściany murowane I piętra	5	8	6		1	
25	Ścianki działowe I piętra	4	7	5		1	
26	Tynki I piętra	7	10	8			1
27	Podkłady – I piętro	2	4	3			
28	Ściany murowane II piętra	5	8	6		1	
29	Ścianki działowe II piętra	4	7	5		1	
30	Tynki II piętra	7	10	8			1

Tabela 8.2. c.d.

31	Podkłady – II piętro	2	4	3	
32	Drzwi wewnętrzne	5	11	7	
33	Tynki klatki schodowej – I działka	4	7	5	1
34	Okładziny klatki schodowej – I działka	5	8	6	
35	Malowanie klatki schodowej – I działka	2	5	3	
36	Tynki klatki schodowej – I działka	4	7	5	1
37	Okładziny klatki schodowej – I działka	5	8	6	
38	Malowanie klatki schodowej – I działka	2	5	3	
39	Odbiór końcowy	1	2		

Graf zależności kolejnościowych przedsięwzięcia typu 2 przedstawiono na rysunku 8.4, a wyszczególnienie realizowanych procesów, parametry ich rozkładów czasu ich wykonania oraz zasoby niezbędne do ich realizacji zamieszczono w tabeli 8.3. Dla przedsięwzięcia typu 3 przyjęto, że model sieciowy jest taki sam jak dla typu 2 (rys.8.4). Rozkłady czasu wykonania procesów i ich parametry oszacowane przez ekspertów zamieszczono w tabeli 8.4. Dla przedsięwzięcia typu 4 złożonego z dwóch budynków o powierzchni 2200–2500 m² przyjęto dla każdego z nich zależności kolejnościowe, rozkłady czasu procesów i ich parametry jak dla obiektu typu 2. Procesy są powiązane wspólnym węzłem początkowym (roboty przygotowawcze) i końcowym (odbior).

Tabela 8.3. Procesy, parametry rozkładów czasu wykonania i zasoby przedsięwzięcia typu 2

Lp.	Nazwa procesu	Parametry rozkładu			Zasoby		
		t_a	t_b	t_m	Brygada cieśli	Brygada murarzy	Brygada tynkarzy
1	Roboty przygotowawcze	7	14	10			
2	Wykopy	15	30	20			
3	Fundamenty	35	50	40	1		
4	Ściany piwnic	24	43	30	1		
5	Strop piwnic	9	15	11	1		
6	Ściany parteru	5	9	7	1		
7	Strop parteru	6	12	8	1		
8	Ściany I piętra	5	9	7	1		

Tabela 8.3. c.d.

9	Strop I piętra	6	12	8	1
10	Ściany II piętra	5	9	7	1
11	Strop II piętra	6	12	8	1
12	Ściany III piętra	5	9	7	1
13	Strop III piętra	6	12	8	1
14	Dach	6	9	7	1
15	Krycie dachu	10	20	12	
16	Obsypanie fundamentów	7	10	8	
17	Okna i drzwi	13	20	15	
18	Elewacja	20	30	24	1
19	Roboty zewnętrzne	22	35	25	
20	Posadzka piwnic	5	8	6	
21	Ściany murowane piwnic	10	15	11	1
22	Ściany murowane parteru	9	14	10	1
23	Ścianki działowe parteru	8	11	9	1
24	Tynki parteru	12	18	14	1
25	Podkłady – parter	5	8	6	
26	Ściany murowane I piętra	9	14	10	1
27	Ścianki działowe I piętra	8	11	9	1
28	Tynki I piętra	12	18	14	1
29	Podkłady – I piętro	5	8	6	
30	Ściany murowane II piętra	9	14	10	1
31	Ścianki działowe II piętra	8	11	9	1
32	Tynki II piętra	12	18	14	1
33	Podkłady – II piętro	5	8	6	
34	Ściany murowane III piętra	9	14	10	1
35	Ścianki działowe III piętra	8	11	9	1
36	Tynki III piętra	12	18	14	1
37	Podkłady – III piętro	5	8	6	
38	Drzwi wewnętrzne	8	13	10	
39	Tynki klatki schodowej – I działka	6	10	9	1
40	Okładziny klatki schodowej – I działka	10	15	12	

Tabela 8.3. c.d.

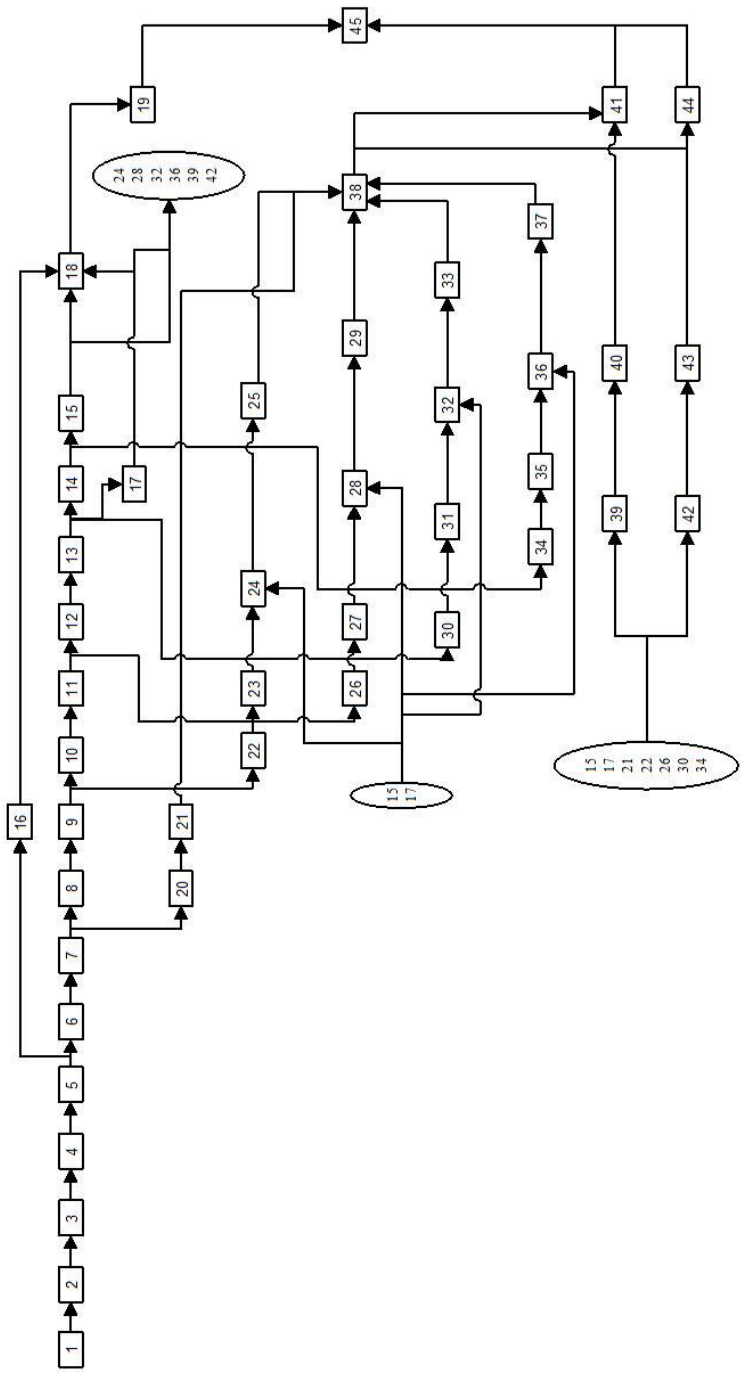
41	Malowanie klatki schodowej – I działka	6	9	7	
42	Tynki klatki schodowej – II działka	6	10	9	1
43	Okładziny klatki schodowej – II działka	10	15	12	
44	Malowanie klatki schodowej – II działka	6	9	7	
45	Odbiór końcowy	2	3		

Tabela 8.4. Procesy, parametry rozkładów czasu wykonania i zasoby przedsięwzięcia typu 3

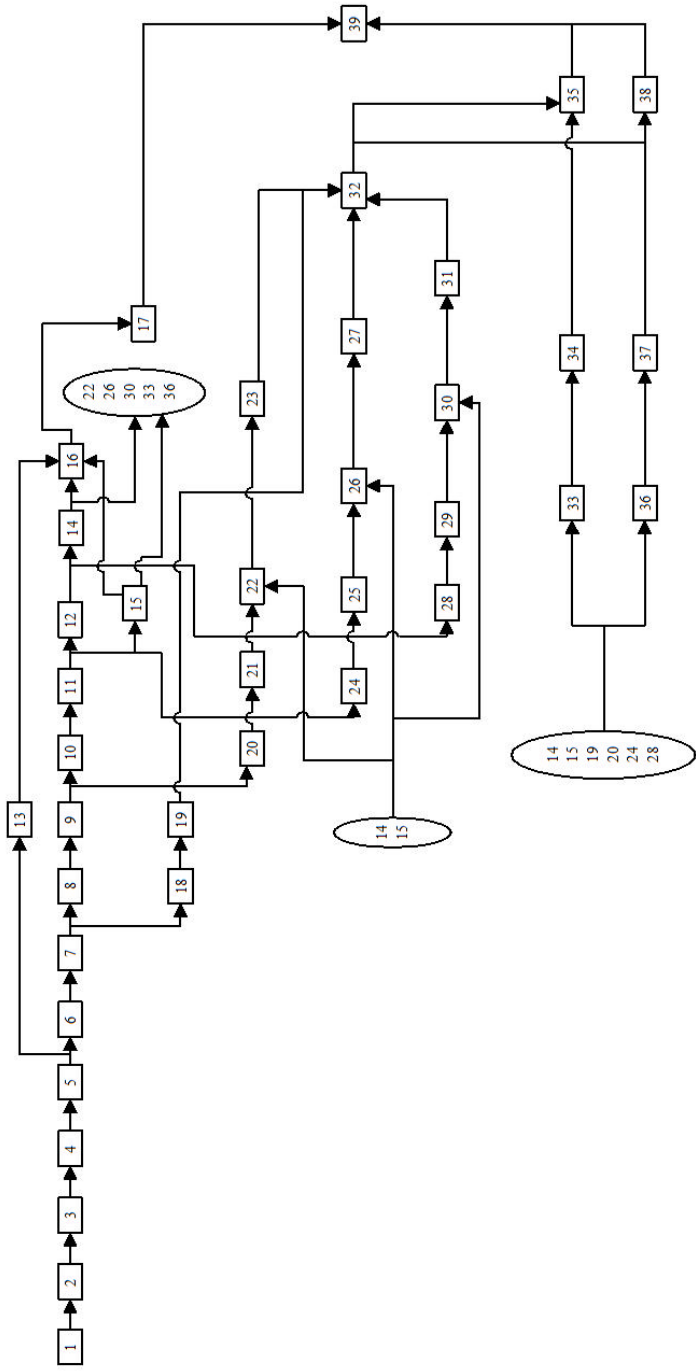
Lp.	Nazwa procesu	Parametry rozkładu			Zasoby		
		t_a	t_b	t_m	Brygada cieśli	Brygada murarzy	Brygada tynkarzy
1	Roboty przygotowawcze	10	25	14			
2	Wykopy	27	54	36			
3	Fundamenty	45	80	60	1		
4	Ściany piwnic	41	56	45	1		
5	Strop piwnic	14	30	20	1		
6	Ściany parteru	10	18	14	1		
7	Strop parteru	12	24	16	1		
8	Ściany I piętra	10	18	14	1		
9	Strop I piętra	12	24	16	1		
10	Ściany II piętra	10	18	14	1		
11	Strop II piętra	12	24	16	1		
12	Ściany III piętra	10	18	14	1		
13	Strop III piętra	12	24	16	1		
14	Dach	8	18	11	1		
15	Krycie dachu	14	40	22			
16	Obsypanie fundamentów	10	22	15			
17	Okna i drzwi	20	38	27			
18	Elewacja	44	54	47			1
19	Roboty zewnętrzne	34	59	40			

Tabela 8.4. c.d.

20	Posadzka piwnic	11	20	15	
21	Ściany murowane piwnic	20	30	22	1
22	Ściany murowane parteru	18	28	20	1
23	Ścianki działowe parteru	16	22	18	1
24	Tynki parteru	22	35	28	1
25	Podkłady – parter	10	16	12	
26	Ściany murowane I piętra	18	28	20	1
27	Ścianki działowe I piętra	16	22	18	1
28	Tynki I piętra	22	35	28	1
29	Podkłady – I piętro	10	16	12	
30	Ściany murowane II piętra	18	28	20	1
31	Ścianki działowe II piętra	16	22	18	1
32	Tynki II piętra	22	35	28	1
33	Podkłady – II piętro	10	16	12	
34	Ściany murowane III piętra	18	28	20	1
35	Ścianki działowe III piętra	16	22	18	1
36	Tynki III piętra	22	35	28	1
37	Podkłady – III piętro	10	16	12	
38	Drzwi wewnętrzne	16	24	18	
39	Tynki klatki schodowej – I działka	12	20	15	1
40	Okładziny klatki schodowej – I działka	20	30	24	
41	Malowanie klatki schodowej – I działka	12	18	14	
42	Tynki klatki schodowej - II działka	12	20	15	1
43	Okładziny klatki schodowej – II działka	20	30	24	
44	Malowanie klatki schodowej – II działka	12	18	14	
45	Odbiór końcowy	2	4		



Rys. 8.3. Graf jednopunktowy zależności kolejnościowych przedsięwzięć 1 typu



Rys. 8.4. Graf jednopunktowy zależności kolejnościowych przedsięwzięć 2 i 3 typu

Założono, że czas procesów jest równy medianie rozkładu ($u_r = 0,5$), którego parametry ustalono na podstawie oszacowań uzyskanych od ekspertów. Wpływ poziomu dostępności zasobów odnawialnych i skuteczność poszczególnych reguł heurystycznych alokacji zasobów na funkcjonowanie przedsiębiorstwa budowlanego będzie oceniana za pomocą stopnia wykorzystania zasobów i efektem skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć w stosunku do czasu realizacji ustalonego przy stosowaniu reguły losowego wyboru procesu *RAN*.

Stopień wykorzystania zasobu j jest obliczany w następujący sposób:

$$r_j = \frac{1}{r_j^{\max}} \cdot \frac{\sum_k^{r_j^{\max}} r_k \cdot t_k}{\sum_k^{r_j^{\max}} t_k}, \quad (8.8)$$

gdzie: r_j^{\max} – maksymalny poziom wykorzystania zasobu j , r_k i t_k to odpowiednio poziom k i czas wykorzystania zasobu j w analizowanym przebiegu symulacyjnym.

Efekt skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć EF_S (funkcja celu) dla każdej reguły heurystycznej S alokacji zasobów obliczano w sposób następujący:

$$EF_S = \sum_{k=1}^4 w_i \cdot (T_{Ri} - T_{Si}), \quad (8.9)$$

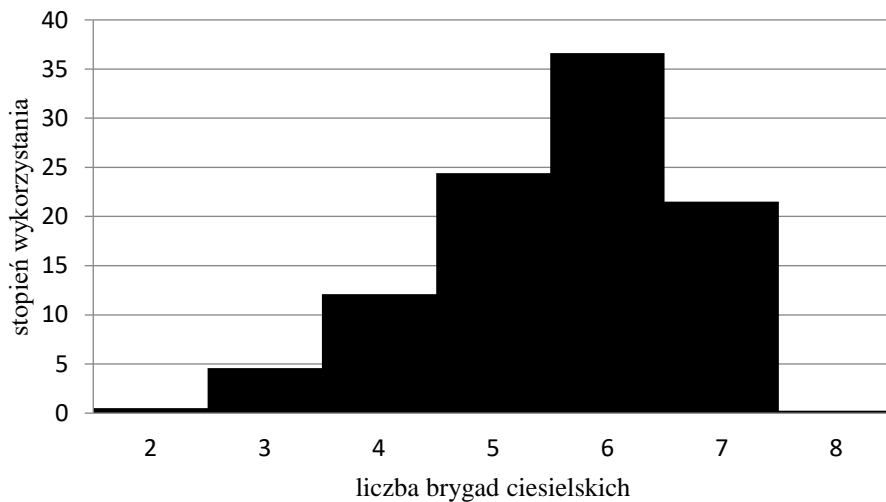
gdzie: T_{Ri} – czas realizacji obiektu typu i dla reguły *RAN*, T_{Si} – czas realizacji obiektu typu i dla heurystyki s , natomiast waga przedsięwzięcia typu i wynosi:

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_i v_i}, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (8.10)$$

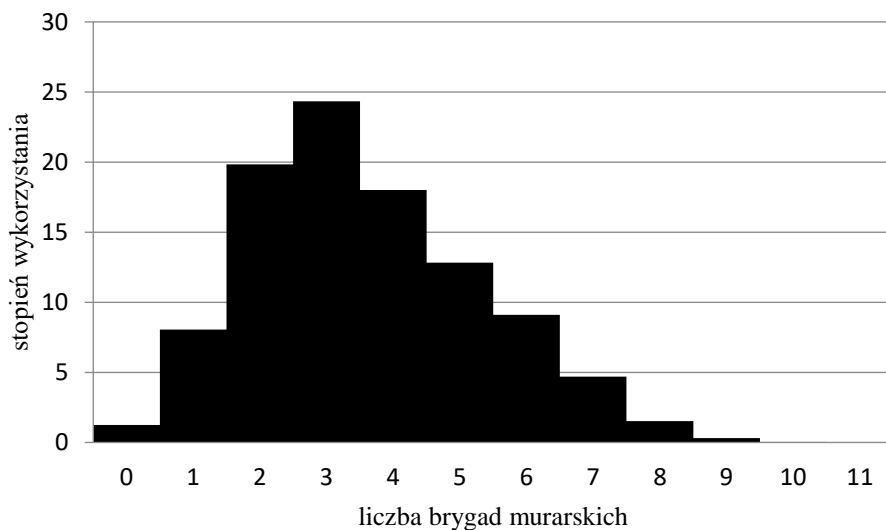
gdzie: v_i – intensywność zgłoszeń przedsięwzięcia typu i (odwrotność wartości oczekiwanej zmiennej losowej odstępu czasu pomiędzy rozpoczynaniem realizacji obiektów tego samego typu).

Przeprowadzone pilotażowe badania symulacyjne – przy założeniu pełnej dostępności zasobów oraz braku analizy przerzutów zasobów z budowy na budowę – wykazały, że ze względu na losowy charakter planu produkcyjnego oraz losowe czasy wykonania procesów budowlanych zatrudnienie niezbędnych zasobów jest bardzo nierównomierne. Maksymalnie jest angażowanych 8 brygad ciesielskich, średnio 5,6 brygady a ich stopień wykorzystania równy jest 70% – (rys.8.5).

Podział obiektów na działki robocze umożliwia jednoczesną realizację robót aż przez 11 brygad murarskich, a ich stopień wykorzystania jest równy 33% (rys. 8.6).



Rys. 8.5. Wykorzystanie brygad ciesielskich przy założeniu pełnej ich dostępności



Rys. 8.6. Wykorzystanie brygad murarskich przy założeniu pełnej ich dostępności

Założenie pełnej dostępności zasobów prowadzi do konieczności zatrudnienia aż 31 brygad tynkarskich, a średnio jest angażowanych jedynie 3,8 brygady. Plik wyjściowy z przeprowadzonego badania symulacyjnego o czasie wynoszącym 30000 dni, zawierający dane o wykorzystaniu brygad tynkarskich, przedstawiono na rysunku 8.7. W kolumnie pierwszej zapisany został numer analizowanego zasobu, w drugiej – sumaryczne zapotrzebowanie na zasób, w trzeciej czas w dniach, przez który był wykorzystywany na określonym poziomie, natomiast w ostatniej – liczba wystąpień danego poziomu jego wykorzystywania w modelowanym czasie.

3	0	105076	135165
3	1	19369.1	35076
3	2	24699.25	43883
3	3	12738.96	23969
3	4	11478.96	22567
3	5	31482.18	46450
3	6	32093.9	47982
3	7	16185.76	28239
3	8	7977.889	16209
3	9	5826.717	12204
3	10	6362.408	12048
3	11	7529.517	13255
3	12	6478.562	11287
3	13	3619.009	7201
3	14	2128.988	4561
3	15	1537.84	3252
3	16	1493.3	2984
3	17	1344.987	2642
3	18	959.2267	1946
3	19	587.8562	1222
3	20	310.5893	708
3	21	224.8688	467
3	22	174.422	397
3	23	142.6897	284
3	24	102.485	174
3	25	39.11904	77
3	26	13.58741	34
3	27	9.420984	18
3	28	4.955756	10
3	29	5.368808	13
3	30	1.989049	5
3	31	0.054361	1

Rys. 8.7. Plik wyjściowy z zarejestrowanymi danymi o wykorzystaniu brygad tynkarskich uzyskany w wyniku obserwacji z 30000 dni

W praktyce przyjęcie założenia pełnej dostępności brygad roboczych jest trudne do zaakceptowania ze względu na ograniczoną liczbę podmiotów gospodarczych funkcjonujących na rynku usług budowlanych i trudność w zarządzaniu dużą liczbą niezależnych wykonawców. Z tego powodu został przeanalizowany wpływ poziomu dostępności brygad ciesielskich, murarskich i tynkarskich na średni czas realizacji przedsięwzięć budowlanych i stopień wykorzystania zasobów. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 8.5.

Tabela 8.5. Zależność średniego czasu realizacji przedsięwzięć i stopnia wykorzystania zasobów od poziomu ich dostępności, ustalona dla reguły losowej wartości priorytetu procesu

Dostępność brygad			Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]				Stopień wykorzystania brygad [%]		
ciesielskich	murarskich	tynkarskich	typ 1	typ 2	typ 3	typ 4	ciesielskich	murarskich	tynkarskich
8	10	10	163	258	449	267	69,8	36,0	38,4
7	10	10	163	258	449	267	79,7	36,0	38,4
7	8	8	165	261	451	274	79,8	45,0	48,1
7	6	6	174	267	461	288	79,7	60,0	64,1
7	5	5	185	278	472	304	79,7	71,9	76,9
7	4	5	194	283	475	311	79,8	90,1	77,0
7	4	4	228	316	514	357	79,8	90,0	96,3
6	5	5	200	289	485	314	92,9	71,9	76,8

Celem kolejnego etapu badań symulacyjnych była ocena wpływu różnych reguł alokacji zasobów na średni czas realizacji przedsięwzięć. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem reguły losowej wartości priorytetu procesu stanowiły podstawę odniesienia do oceny jakości innych heurystyk. Eksperymenty przeprowadzono dla trzech poziomów dostępności brygad ciesielskich, murarskich i tynkarskich, równych odpowiednio: $\{6, 4, 4\}$, $\{7, 4, 4\}$, $\{7, 5, 5\}$. Poziomy te zapewniają wysoki stopień wykorzystania pracy brygad roboczych (powodują stosunkowo niewielkie przerwy w pracy zasobów) przy akceptowalnym wydłużeniu czasu przedsięwzięć w stosunku do najkrótszego z możliwych, obliczonego dla Nielimitowanych zasobów. Wyniki przedstawiono w tabelach 8.6–8.8.

Dla przyjętych parametrów rozkładów zgłoszeń, wagi przedsięwzięć przyjmują następujące wartości: $w_1 = 0,195$, $w_2 = 0,415$, $w_3 = 0,214$, $w_4 = 0,175$.

Tabela 8.6. Efekt skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć dla różnych reguł heurystycznych alokacji zasobów przy założeniu dostępności 6 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 4 tynkarskich

Reguła		Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]				Skrócenie czasu realizacji w stosunku do reguły RAN [dni]				Efekt skrócenia EF [dni]
główna	pomocnicza	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	
RAN		248	334	531	376	0	0	0	0	0,0
DMSLK	RAN	193	298	500	367	55	36	31	9	34,0
EFT	RAN	200	309	583	335	48	25	-52	41	15,6
FCFS	RAN	227	317	513	340	21	17	18	35	21,3
MDP	RAN	215	307	500	323	33	26	31	53	33,2
MIS	RAN	252	341	534	378	-5	-7	-3	-3	-4,8
LFT	RAN	207	302	497	318	41	31	34	57	38,4
SPT	RAN	199	309	584	334	49	25	-53	41	15,8

Tabela 8.7. Wpływ reguły alokacji zasobów na średni czas realizacji przedsięwzięć przy założeniu dostępności 7 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 4 tynkarskich

Reguła		Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]				Skrócenie czasu realizacji w stosunku do reguły RAN [dni]				Efekt skrócenia EF [dni]
główna	pomocnicza	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	
RAN		229	314	509	357	0	0	0	0	0,0
DMSLK	RAN	190	293	492	334	39	22	17	22	24,3
EFT	RAN	194	301	558	333	35	14	-48	24	6,4
FCFS	RAN	212	304	497	326	17	10	12	31	15,5
MDP	RAN	204	299	491	313	25	16	19	44	23,2
MIS	RAN	231	323	514	360	-2	-9	-4	-3	-5,4
LFT	RAN	197	292	486	308	32	22	24	49	29,0
SPT	RAN	193	300	557	332	36	14	-48	25	7,1

Tabela 8.8. Wpływ reguły alokacji zasobów na średni czas realizacji przedsięwzięć przy założeniu dostępności 7 brygad ciesielskich, 5 murarskich i 5 tynkarskich

Reguła		Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]				Skrócenie czasu realizacji w stosunku do reguły RAN [dni]				Efekt skrócenia EF [dni]
		Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	
główna		185	277	472	304	0	0	0	0	0,0
	pomocnicza									
<i>RAN</i>		172	269	462	293	13	9	10	11	10,2
<i>DMSLK</i>	<i>RAN</i>	177	278	486	303	8	-1	-14	1	-1,8
<i>EFT</i>	<i>RAN</i>	182	275	469	294	3	3	3	10	4,0
<i>FCFS</i>	<i>RAN</i>	182	275	467	291	3	2	5	13	5,2
<i>MDP</i>	<i>RAN</i>	187	278	472	307	-2	-1	0	-3	-1,2
<i>MIS</i>	<i>RAN</i>	175	269	461	285	10	8	11	19	11,0
<i>LFT</i>	<i>RAN</i>	177	278	487	303	8	-1	-14	1	-1,8
<i>SPT</i>	<i>RAN</i>									

Analizując wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że efekt skrócenia czasu realizacji przedsięwzięć przy stosowaniu wszystkich reguł alokacji rośnie wraz ze zmniejszeniem poziomu dostępności zasobów. Reguła maksymalnej liczby bezpośrednich następników (*MIS*) przynosi nieznaczne pogorszenie wyników w porównaniu z losowym wyborem procesu. Może być to spowodowane tym, że kierowane procesy do realizacji w pierwszej kolejności mają niewielki wpływ na termin zakończenia przedsięwzięcia (posiadają mały stopień krytyczności). Najlepsze rezultaty uzyskano przy zastosowaniu reguł *LFT* i *DMSLK*, w których wykorzystano koncepcję oceny stopnia wpływu procesu na końcowy termin przedsięwzięcia oraz reguła maksymalnego opóźnienia procesu (*MDP*). Dobre rezultaty daje także reguła najkrótszego oczekiwania na zasoby (ang. *First Come, First Served*). Wybór reguły pomocniczej ma niewielki wpływ na czasy realizacji przedsięwzięć, co ilustruje tabela 8.9. Na tym etapie badań symulacyjnych nie analizowano zagadnienia konieczności „przerzutów” brygad z budowy na budowę. Do dalszych analiz założono dostępność 7 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 5 tynkarskich. Przyjęty poziom dostępności analizowanych zasobów odnawialnych jest kompromisem między średnim czasem realizacji przedsięwzięć a stopniem wykorzystania zasobów. Zwiększenie stopnia ich wykorzystania może utrudniać zarządzanie zasobami ludzkimi na etapie zarządzania operacyjnego, także z wykorzystaniem systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*) – opisanym w podrozdziale 8.3.1. Trudność ta wynika przede wszystkim z konieczności zapewnienia pracownikom urlopów wypoczynkowych, zdarzeń losowych czy też strat czasu przy konieczności zmiany budowy – „przerzutach” z jednego placu budowy na drugi.

Tabela 8.9. Wybrane przykłady wpływu reguły pomocniczej (kombinacji reguły głównej i pomocniczej) na średni czas realizacji przedsięwzięć przy założeniu dostępności 6 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 4 tynkarskich

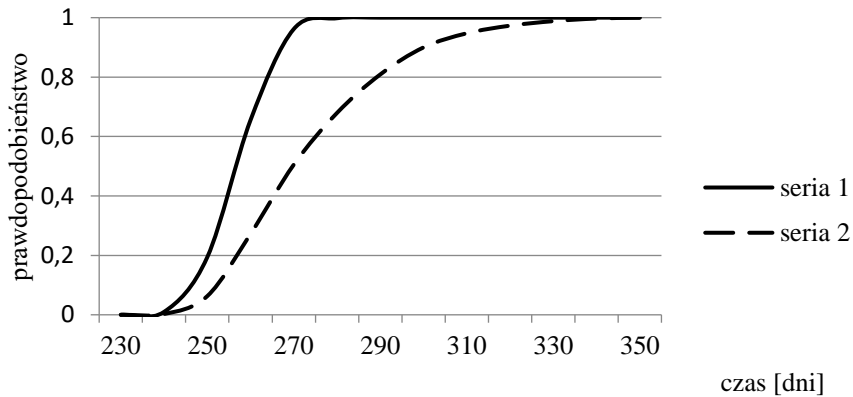
Reguła		Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]			
główna	pomocnicza	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
<i>DMSLK</i>	<i>RAN</i>	193	298	500	367
	<i>EFT</i>	194	297	500	367
	<i>FCFS</i>	193	297	500	365
<i>EFT</i>	<i>RAN</i>	200	309	583	335
	<i>LFT</i>	201	310	584	333
	<i>SPT</i>	200	307	577	335
<i>FCFS</i>	<i>RAN</i>	227	317	513	340
	<i>MDP</i>	227	317	512	341
	<i>DSMLK</i>	227	320	514	342
<i>MDP</i>	<i>RAN</i>	215	307	500	323
	<i>FCFS</i>	214	307	501	321
	<i>LFT</i>	214	308	501	323
<i>LFT</i>	<i>RAN</i>	207	302	497	318
	<i>MIS</i>	206	302	496	318
	<i>SPT</i>	206	302	496	317

W analizowanym przykładzie całkowite wyeliminowanie przerzutów w bardzo niewielkim stopniu powoduje wydłużenie czasu przedsięwzięć budowlanych, a więc także nieistotnie wpływa na stopień wykorzystania analizowanych zasobów odnawialnych (tabela 8.10). Jest to spowodowane strukturą sieci zależności. Brygady ciesielskie wykonują kolejno procesy stanu surowego, a podział budynków na działki robocze zapewnia front robót i pozwala na zapewnienie brygadam murarzy i tynkarzy ciągłości zatrudnienia. W przypadku wyboru losowego procesu *RAN* uzyskano niewielki efekt skrócenia jedynie o $EF=5,9$ dnia. W wielu przypadkach praktycznych analizę „przerzutów” zasobów z jednej budowy na drugą można pominąć, szczególnie gdy budowy są zlokalizowane na terenie jednego miasta. Czas przejazdu brygad roboczych jest krótki, a koszt „przerzutów” niewielki. Nie uzyskano także poprawy rezultatu zwiększając horyzont planowania. Jest to spowodowane tymi samymi czynnikami co w przypadku „eliminacji” przerzutów z jednego placu budowy na drugi.

Tabela 8.10. Wpływ eliminacji „przerzutów” brygad na czas realizacji przedsięwzięć budowlanych.

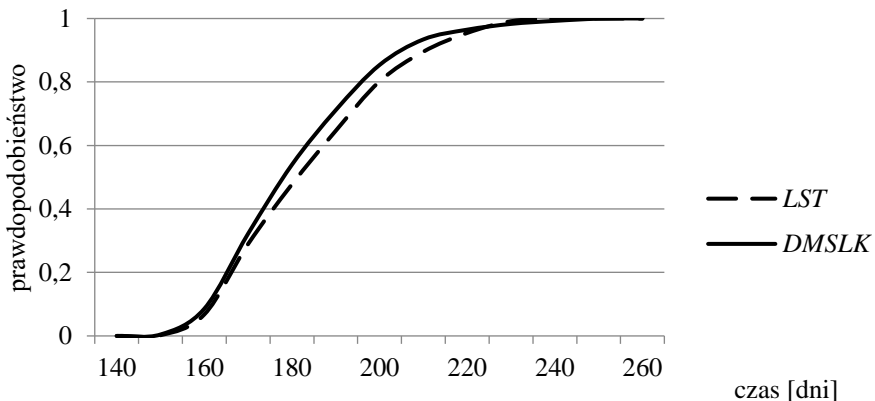
Regula		Przerzuty	Średni czas realizacji przedsięwzięcia [dni]				Efekt skrócenia [dni]	Skrócenie czasu realizacji w stosunku do reguły RAN [dni]		
główna	pomocnicza		Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4		ciesielskich	murarskich	tynkarskich
RAN		dopuszczalne	185	277	472	304	0,0	0	0	0
DMSLK	RAN	nie-dopuszczalne	172	269	462	293	10,2	13	9	10
EFT	RAN	dopuszczalne	177	278	486	303	-1,8	8	-1	-14
FCFS	RAN	nie-dopuszczalne	182	275	469	294	4,0	3	3	3
MDP	RAN	dopuszczalne	182	275	467	291	5,2	3	2	5
MIS	RAN	nie-dopuszczalne	187	278	472	307	-1,2	-2	-1	0
LFT	RAN	dopuszczalne	175	269	461	285	11,0	10	8	11
SPT	RAN	nie-dopuszczalne	177	278	487	303	-1,8	8	-1	-14

Kolejnym etapem badań symulacyjnych było wyznaczenie dystrybuant rozkładu czasu przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem dostępności zasobów przedsiębiorstwa budowlanego. Zmienna losowa czasu realizacji przedsięwzięcia wyznaczana w ten sposób być powinna podstawą do ustalania terminów dyrektywnych na etapie planowania taktycznego. Na rysunku 8.8 przedstawiono dystrybuantę dla przedsięwzięcia typu 2 ustaloną metodą symulacji *Monte Carlo* przy założeniu pełnej dostępności zasobów i z uwzględnieniem limitu analizowanych zasobów przedsiębiorstwa przy realizacji planu produkcyjnego.



Rys. 8.8. Dystrybuanty rozkładu czasu przedsięwzięcia typu 2; seria 1 – przy założeniu pełnej dostępności zasobów, seria 2 – ustalana na podstawie badań symulacyjnych planu produkcyjnego z wykorzystaniem reguły *LST* przy przyjętym poziomie dostępności zasobów: 7 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 5 tynkarskich

Przy zbliżonych średnich czasach realizacji przedsięwzięcia (181 dni przy zastosowaniu reguły *DMSLK* i 183 dla *LST*), dystrybuanty rozkładów, a więc i prawdopodobieństwa dotrzymania ustalonych przez decydenta terminów dyrektywnych, nie różnią się od siebie (rys. 8.9), a więc w tym przypadku wybór strategii ma niewielki wpływ na niezawodność dotrzymania planowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia.



Rys. 8.9. Dystrybuanty rozkładu czasu przedsięwzięcia typu 1 przy założeniu 7 brygad ciesielskich, 4 murarskich i 5 tynkarskich oraz braku przerzutu zasobów; seria 1 – reguła *LST*, seria 2 – reguła *DMSLK*

8.3. Wspomaganie planowania operatywnego realizacji zbioru zleceń

8.3.1. Proponowany system zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (SZOZOPB)

Powodzenie przedsięwzięcia budowlanego zależy głównie od sprawnej realizacji procesów budowlanych zgodnie z planem. W ramach planowania operatywnego dokonuje się dostosowania bieżących działań do zmiennych warunków prowadzenia robót. Zadaniem decydenta jest właściwa koordynacja procesów realizowanych i planowanych do wykonania na budowach oraz kontrola zgodności z harmonogramami dyrektywnymi i ogólnymi poszczególnych przedsięwzięć, przy uwzględnieniu celu przedsiębiorstwa. Osiąga się to poprzez koncentrację sił i środków przedsiębiorstwa tam, gdzie istnieje ryzyko, że procesy nie będą wykonywane terminowo, zgodnie z wcześniej ustalonym harmonogramem.

Dyspozytorski system zarządzania zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa powinien pełnić trzy zasadnicze funkcje: informacyjną, zapobiegawczą i interwencyjną. Na podstawie zbieranych i analizowanych informacji z budów o przebiegu realizacji procesów budowlanych jest możliwa kontrola przebiegu i ustalenie ewentualnych przyczyn nieterminowego, niezgodnego z planem wykonania robót, ograniczenie zakłóceń poprzez podjęcie działań naprawczych, a przede wszystkim wprowadzenie udoskonaleń w zakresie technologii i organizacji, zarządzania oraz zmian w systemie dyspozytorskim (Bala i Suliga 1976). Dyspozytorski system zarządzania umożliwia planowanie operatywne zasobów – przydział kluczowych zasobów do realizacji niezrealizowanych procesów – z uwzględnieniem wyników kontroli postępu robót i stopnia wykorzystania analizowanych zasobów. Decyzje w tym zakresie stanowią podstawę do szczegółowego projektowania realizacji zbioru zleceń

Proponowany system zarządzania operatywnego zasobami przedsiębiorstwa budowlanego (SZOZPB) umożliwia, na podstawie informacji z budów i innych działów przedsiębiorstwa, zmianę stanu modelowanego przebiegu realizacji robót poprzez:

- wprowadzenie nowych zleceń,
- zmianę dostępności poziomu zasobów odnawialnych, spowodowaną np. awarią sprzętu budowlanego lub zatrudnianiem nowych brygad roboczych,
- kończenie procesów realizowanych,
- podzlecanie robót,
- kierowanie do realizacji nowych procesów, z uwzględnieniem dostępności zasobów odnawialnych.

Nowe zlecenie jest modelowane za pomocą macierzy incydencji, odwzorowującej zależności technologiczno-organizacyjne między procesami przyjętego do realizacji zlecenia. Każdemu procesowi jest przypisywany planowany, de-

terministyczny czas oraz priorytet (waga) procesu i zasoby odnawialne niezbędne do jego rozpoczęcia. Priorytety procesów są wykorzystywane w niektórych regułach alokacji zasobów. Każdemu zasobowi jest przypisana waga (koszt jego wykorzystania).

Na podstawie planowanego czasu wykonania procesów i aktualnego stanu zegara systemowego, odpowiadającego terminowi przyjęcia przedsięwzięcia do realizacji, są obliczane planowane terminy zakończenia procesów i całego przedsięwzięcia – bez uwzględnienia dostępności zasobów odnawialnych.

Proces, którego wszystkie poprzedniki zostały zakończone i dla którego są dostępne zasoby odnawialne w ilościach niezbędnych do jego wykonania, jest dołączany do zbioru procesów gotowy do rozpoczęcia. Decydent wybiera jeden z nich (wspomagając się przy tym wskazaniem *SZOZOPB*) i kieruje go realizacji.

W systemie zaimplementowano następujące reguły priorytetowe alokacji zasobów: priorytetu procesu określanego przez decydenta (*DMP*), maksymalnej liczby bezpośrednich następników (*MIS*), minimalnego czasu realizacji procesu (*SPT*), maksymalnego czasu oczekiwania (*FCFS*), minimalnego zapasu czasu (*DMSLK*), minimalnego terminu najpóźniejszego rozpoczęcia procesu (*LST*), minimalnego najwcześniejszego zakończenia procesu (*EFT*), maksymalnego opóźnienia procesu (*MDP*), największego zapotrzebowania na zasoby (*RED*), zmodyfikowanego największego zapotrzebowania na zasoby (*MRED*), losowej wartości priorytetu procesu (*RAN*) oraz heurystykę największego stopnia wykorzystania zasobów (*GRU*).

Wybór procesu do realizacji może być dokonany na podstawie wskazań systemu zarządzania zasobami, bazujących na heurystycznych regułach alokacji zasobów, ale wybór kierowanego do realizacji procesu, po spełnieniu ograniczeń kolejnościowych i zasobowych jest dokonywany przez decydenta. W przypadku jednakowych wartości priorytetów procesów, ustalonych zgodnie z przyjętą przez decydenta regułą heurystyczną, wskazanie procesu odbywa się na podstawie reguły *DMP*. Jeżeli i ona nie rozstrzyga o kolejności realizacji procesów, system wskazuje proces wybrany losowo.

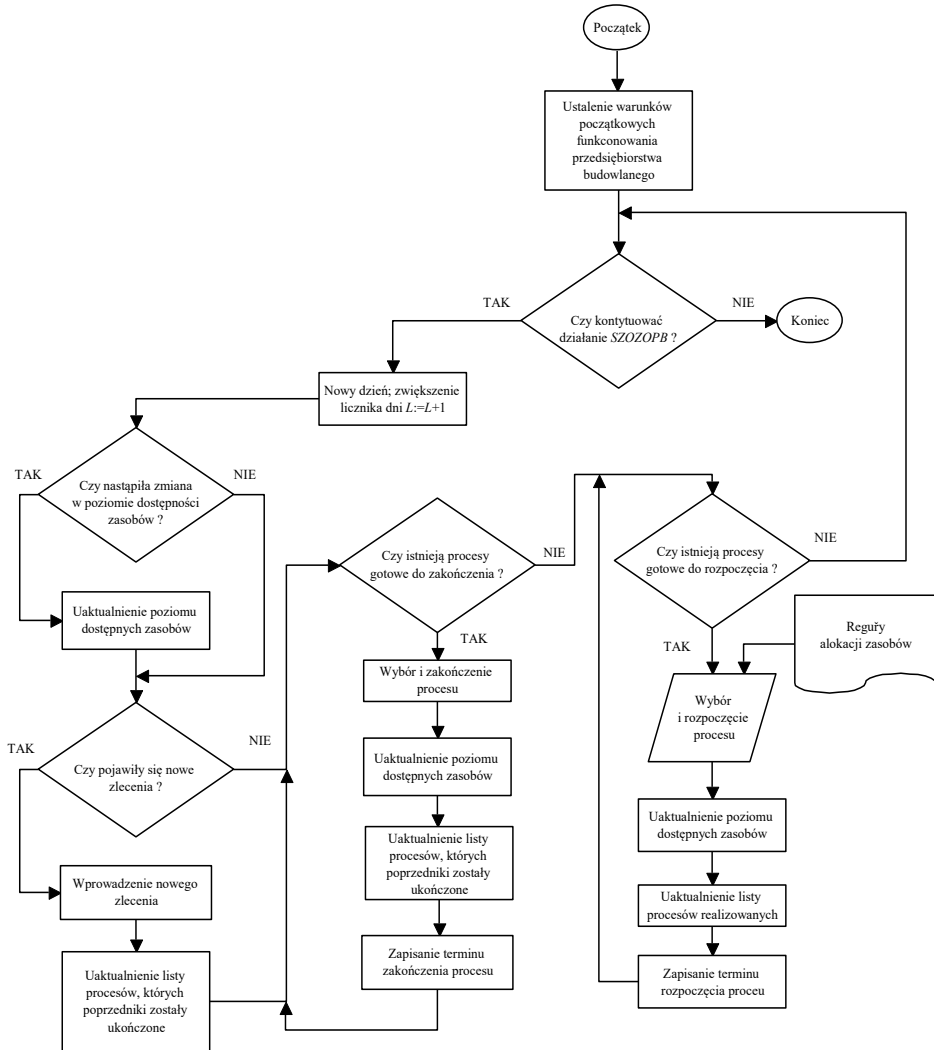
W przypadku braku dostępności zasobów własnych lub gdy procesy wymagają liczby jednostek przekraczającej założone limity, istnieje możliwość poddzlecenia robót i rozpoczynanie procesów w terminach ustalonych z podwykonawcami.

Termin zakończenia procesu jest wprowadzany na podstawie informacji z budów. Terminy rozpoczynania i zakończenia procesów są terminami rzeczywistymi, a czas ich wykonania może się różnić od planowanego.

Dodatkowo wprowadzono opcję blokowania zasobów na budowach (czas rezerwacji zasobów na budowach) oraz horyzont planowania. Przykłady harmonogramowania procesów, w przypadku wyboru tych opcji, zostały szczegółowo omówione w podrozdziale 8.3.2.

Schemat ideowy systemu przedstawiono na rysunku 8.10. W pierwszej kolejności należy ustalić stan początkowy funkcjonowania modelowanego przed-

siębiorstwa, tzn. wprowadzić do *SZOZOPB* obecny stan realizacji przedsięwzięć (postęp realizacji) i aktualne dostępne limity zasobów.



Rys. 8.10. Schemat ideowy systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*)

Dane wyjściowe otrzymywane w systemie *SZOZOPB* są takie same, jak w modelu symulacyjnym realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego. Dodatkowo są tworzone pliki zawierające:

- dane o liczbie jednostek wykorzystywanych zasobów każdego dnia pracy,

- terminy planowane i rzeczywiste rozpoczęcia oraz zakończenia procesów wszystkich przedsięwzięć oraz dodatkowo najwcześniejsze terminy realne rozpoczęcia, wynikające z dotychczasowego przebiegu realizacji oraz zakończenia, będące sumą terminu realnego rozpoczęcia i planowanego czasu realizacji procesu.

Termin realny rozpoczęcia procesu jest tutaj definiowany jako najwcześniejszy, możliwy termin rozpoczęcia tzn. ukończone zostały jego wszystkie poprzedniki. Wybór decydenta i przypisanie zasobów do innego procesu, może spowodować jednak opóźnienie jego rozpoczęcia i przekroczenie terminu realnego.

Analiza wyników (gromadzonych w plikach danych wyjściowych) umożliwia decydentowi analizę przebiegu pracy i badanie przyczyn niezgodności harmonogramów tworzonych na etapie planowania, z rzeczywistym przebiegiem prac na budowach oraz umożliwi ocenę skuteczności zaproponowanego systemu zarządzania zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego.

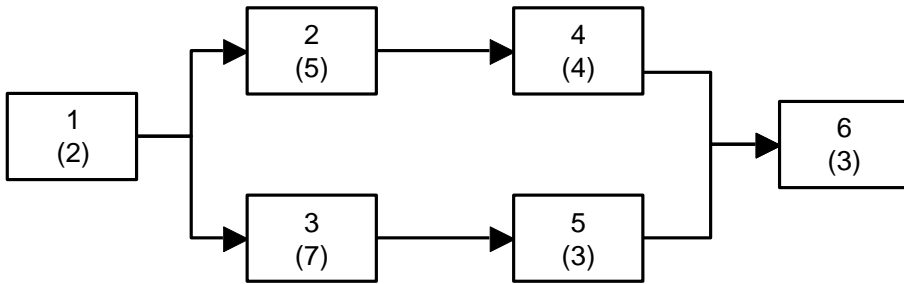
Warunkiem podstawowym skuteczności systemu dyspozytorskiego jest wprowadzenie metody operatywnego zarządzania budową, utworzenie służby dyspozytorskiej i wyposażenie jej w sprawny system komputerowego wspomaganie ich pracy (Bala i Suliga 1976) oraz ciągłego jego usprawniania i rozwoju umiejętności kadry kierowniczej.

8.3.2. Przykłady działania systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (SZOZOPB)

Rozdział zawiera przykłady ilustrujące zasady alokacji zasobów przedsięwzięć z wykorzystaniem systemu *SZOZOPB* oraz zaimplementowane opcje ich blokowania zasobów na budowach i ideę horyzontu planowania. Przykłady te są częścią wykonanych testów poprawności działania zaimplementowanych reguł heurystycznych w modelu symulacyjnym i systemie zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*) reguł heurystycznych rozdziału zasobów.

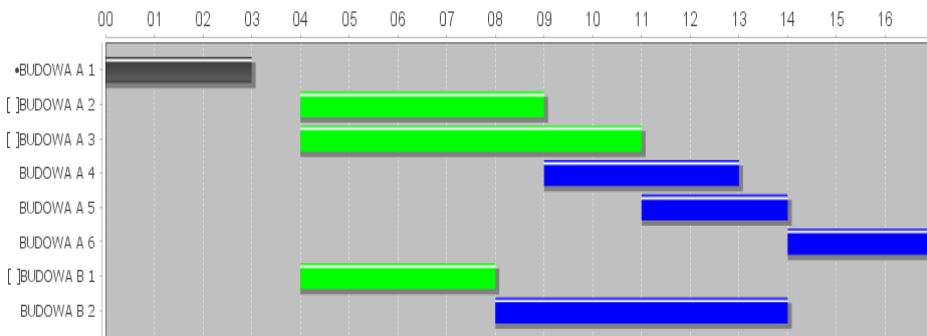
W celu przedstawienia różnicy skuteczności zastosowania reguł priorytetowych *DMSLK* i *LST* zaprezentowano przykład planowania dwóch przedsięwzięć realizowanych równolegle. Model sieciowy przedsięwzięcia pierwszego przedstawiono na rysunku 8.11 – planowane czasy podano w nawiasach. Przedsięwzięcie drugie składa się z dwóch procesów realizowanych kolejno, a wartości priorytetu jego procesów są większe od priorytetów procesów przedsięwzięcia pierwszego. Rozpoczęcie przedsięwzięcia drugiego zaplanowano w terminie $t_1 = 4$. Planowany czas procesu 1 na budowie B równy jest 4, natomiast procesu 2 wynosi 7. Przyjęto dodatkowo, że wszystkie procesy wymagają jednej jednostki zasobu, której poziom dostępności jest niezmienny w czasie i wynosi 1.

W dalszej części pracy przyjęto oznaczenie procesów, w którym wielka litera identyfikuje budowę, a liczba – proces.



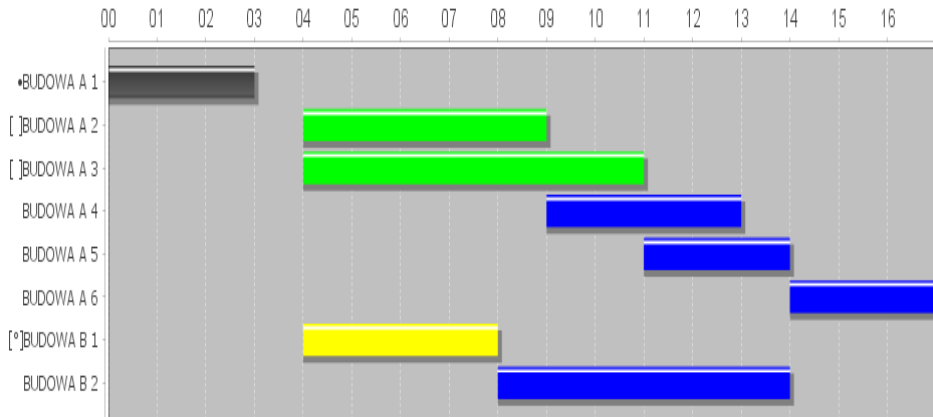
Rys.8.11. Przykładowy harmonogram realizacji zleceń przedsiębiorstwa (opis w tekście)

Na rysunku 8.12 kolorem szarym są zaznaczone procesy wykonane, zielonym możliwe do rozpoczęcia w terminie $t_l = 4$, natomiast niebieskim planowane w dalszym horyzoncie czasu do realizacji.



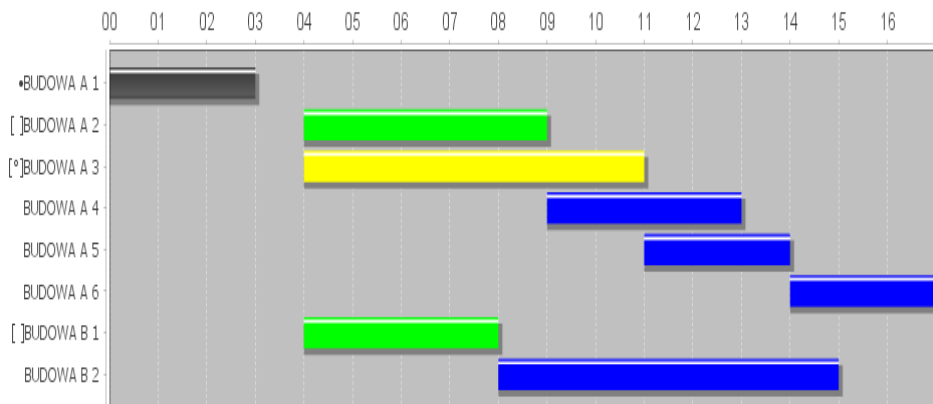
Rys. 8.12. Procesy możliwe do rozpoczęcia w terminie $t_l=4$

W przypadku reguły *DMSLK* zapasy czasu są obliczane ponownie. Zapasy czasu procesu A3 oraz B1 są równe 0. Wybór procesu odbywa się na podstawie reguły pomocniczej (priorytet procesu ustalany przez decydenta) – do realizacji jest kierowany proces B2 oznaczony kolorem żółtym na rysunku 8.13.



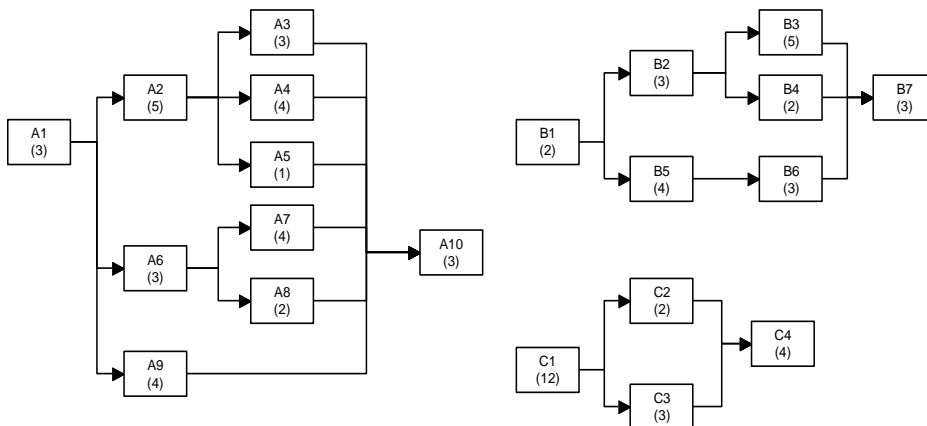
Rys. 8.13. Wybór procesu zgodnie z regułą priorytetową DMSLK

Reguła *LST* wybiera proces A3 ze względu na to, że jego najpóźniejszy planowany termin rozpoczęcia wynosi $t_{r(A3)}^1 = 2$, a dla procesu: $t_{r(B1)}^1 = 4$ (rys. 8.14).



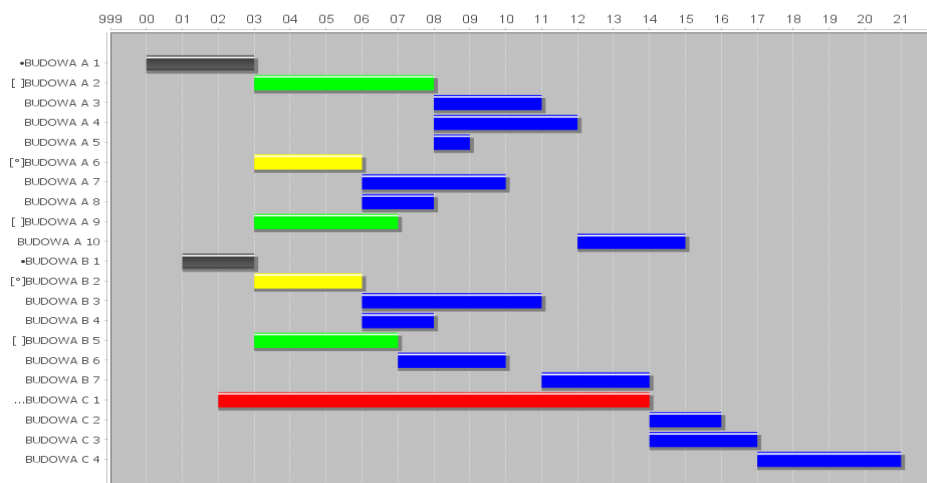
Rys. 8.14. Wybór procesu zgodnie z regułą priorytetową *LST*

W kolejnym przykładzie analizowana jest realizacja trzech przedsięwzięć, których modele sieciowe zaprezentowano na rysunku 8.15. Planowane czasy procesów podano w nawiasach.



Rys. 8.15. Jednopunktowe modele sieciowe 3-ch realizowanych równolegle przedsięwzięć

Na rysunku 8.16 kolorem czerwonym są zaznaczone procesy aktualnie realizowane. Przy założeniu, że wagi (koszty wykorzystania) trzech zasobów odnawialnych są odpowiednio równe $v_1 = 0,1$, $v_2 = 0,2$ i $v_3 = 0,3$ oraz poziom dostępności zasobów w terminie $t_1 = 3$ wynosi $r_1 = 8$, $r_2 = 7$, $r_3 = 10$ jednostek (wymagane zapotrzebowania na te zasoby do realizacji procesów zestawiono w tabeli 8.11), to reguła największego stopnia wykorzystania zasobów (*GRU*) sugeruje skierowanie do realizacji następujących procesów: A6 oraz B2 (maksymalizacja wyrażenia 8.7), oznaczonych na rysunku 8.16 kolorem żółtym.

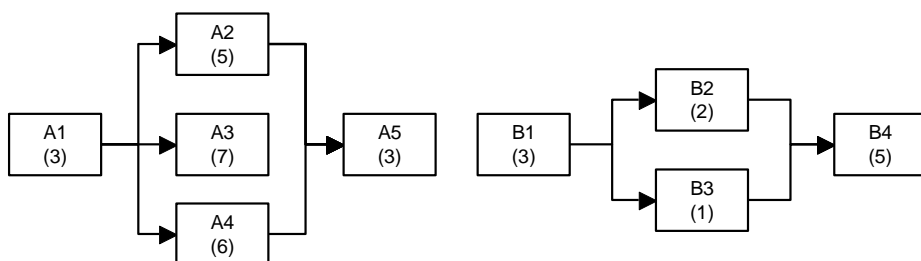


Rys. 8.16. Przykładowy harmonogram realizacji zleceń przedsiębiorstwa (opis w tekście)

Tabela 8.11. Wymagana liczba jednostek zasobów do realizacji procesów budowlanych (przykład i opis w tekście)

Budowa	Proces	Zapotrzebowanie na zasób 1	Zapotrzebowanie na zasób 2	Zapotrzebowanie na zasób 3
A	2	3	5	7
	6	2	3	8
	9	6	2	5
B	2	4	3	2
	5	2	1	3

W przykładzie ilustrującym opcje blokady zasobów przyjęto, że są realizowane równoległe dwa przedsięwzięcia o modelach sieciowych jak na rysunku 8.17. Planowany czas realizacji procesów podano w nawiasach.



Rys. 8.17. Jedn punktowe modele sieciowe 2-ch realizowanych równoległe przedsięwzięć wykorzystane do ilustracji opcji blokady zasobów

Tabela 8.12. Wymagana liczba jednostek zasobów do realizacji procesów budowlanych do przykładu z opcją blokowania zasobów na budowach

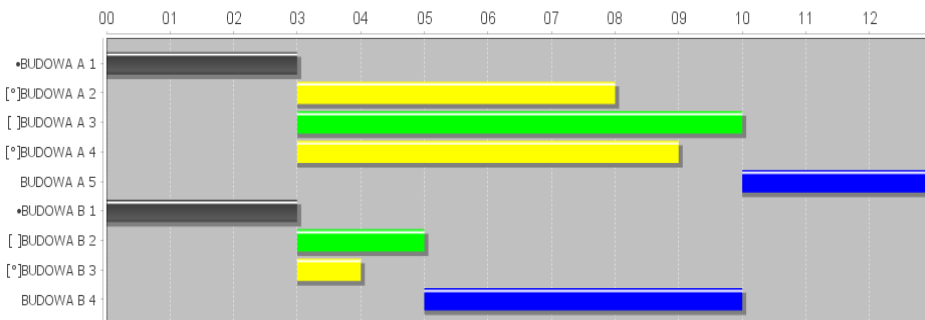
Budowa	Proces	Zapotrzebowanie na zasób 1	Zapotrzebowanie na zasób 2
A	1	3	3
	2	0	1
	3	2	2
	4	2	3
B	1	0	0
	2	5	2
	3	3	1

Założono, że do realizacji procesów na budowach niezbędne są zasoby w ilości jak w tabeli 8.12. Przyjęto, że zasób typu 1 jest nielimitowany, natomiast poziom dostępności zasobu 2 wynosi 5 jednostek. Rozpoczęcie realizacji

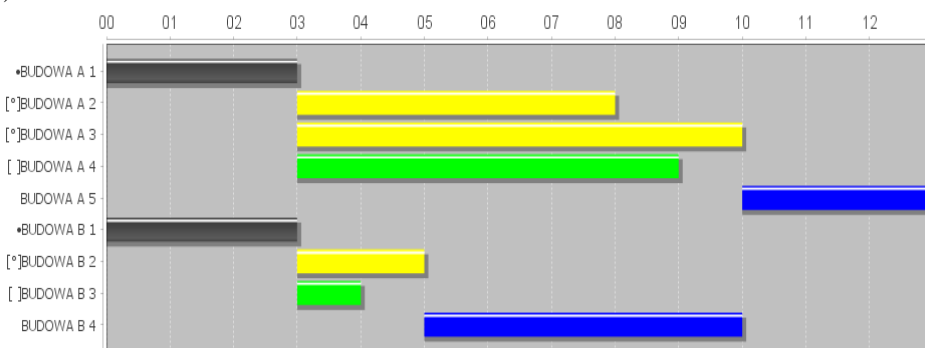
procesu A1 (rys. 8.18) spowodowało, że zarezerwowano na budowie A po 3 jednostki zasobów typu 1 i 2. Zastosowanie w terminie $t_l = 3$ reguły minimalnego czasu realizacji procesu (*SPT*) powoduje, że jest zalecane rozpoczęcie najkrótszego z możliwych procesów – B3. W takim przypadku w magazynie centralnym pozostanie tylko 1 jednostka zasobu typu 2 i nie jest możliwe rozpoczęcie procesu B2. Do realizacji powinny być skierowane procesy najkrótsze tzn. A2 i A4 na (rys. 8.18a), bowiem rozpoczęcie ich jest warunkowane dostępnością zasobu typu 2: zarezerwowanych na budowie: A3-ch jednostek i 1 jednostki zasobu z magazynu centralnego. Proces A3 nie może być rozpoczęty, ze względu na brak zasobu typu 2.

Natomiast wybór reguły minimalnego zapasu czasu (*DMSLK*) spowoduje skierowanie procesu A2 mimo, że procesu B3 ma mniejszy całkowity zapas czasu (rys. 8.18b). Ze względu na jedną dostępną jednostkę zasobu typu 2, do realizacji nie może być skierowany proces A4 o mniejszym zapasie czasu, lecz jest wybierany proces A2, który wymaga tylko 1 jednostki zasobu typu 2.

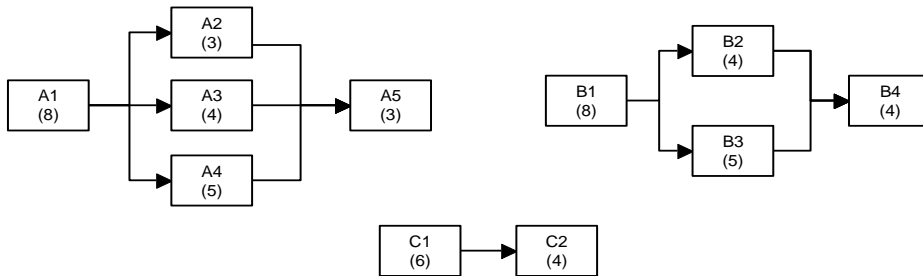
a)



b)

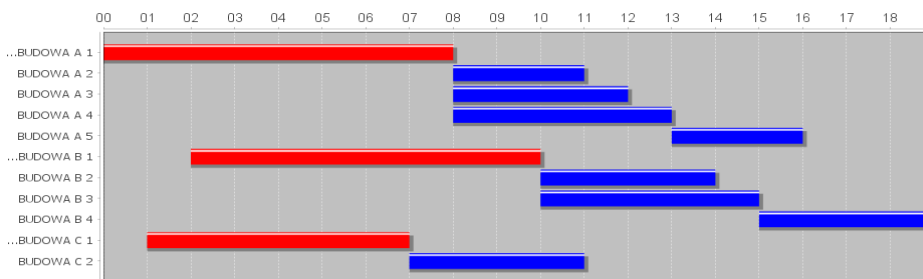


Rys. 8.18. Harmonogramy realizacji przedsięwzięć w przykładzie z blokowaniem dostępności zasobów na budowie przy zastosowaniu reguły: a) *SPT*, b) *DMSLK*



Rys. 8.19. Jedn punktowe modele sieciowe 3-ch realizowanych równolegle przedsięwzięć wykorzystane do ilustracji idei horyzontu planowania

Modele sieciowe przedsięwzięć wykorzystanych w przykładzie ilustrującym wykorzystanie idei horyzontu planowania przedstawiono na rysunku 8.19. Przyjęto czasy wykonania procesów, liczbę jednostek niezbędnych zasobów i ich wagi jak w tabeli 8.13. Założono, że $\Delta t = 5$ oraz poziom dostępności zasobów jest równy: $r_1 = 13$, $r_2 = 14$, $r_3 = 14$ jednostek.



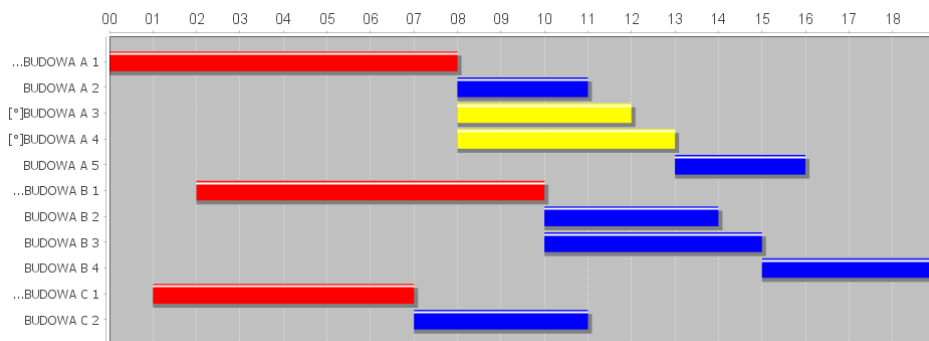
Rys. 8.20. Harmonogram realizacji zleceń – przykład z horyzontem planowania; decyzja o alokacji zasobów podejmowana w terminie $t_l = 2$

Ze względu na horyzont planowania, w terminie $t_l = 2$ przewiduje się zakończenie procesu C1 i zwolnienie 2, 5 i 3 jednostek poszczególnych zasobów. Ich liczba jest niewystarczająca do rozpoczęcia procesu C2 (rys. 8.20).

W terminie $t_l = 3$ podejmowania decyzji, jest brane pod uwagę dodatkowo zakończenie procesu A1, stąd w terminie 8 dostępne będą zasoby typu 1, 2, 3 w ilościach odpowiednio 7, 12, 6 jednostek. Reguła RED zaleca skierowanie do wykonania w pierwszej kolejności procesu A4 o największej wartości priorytetu równej $RED_{A4} = 205$ spośród procesów następujących po A1 (rys. 8.21). Proces C2 nie może być rozpoczęty ze względu na zbyt małą liczbę dostępnych zasobów typu 1. Stan dostępności zasobów typu 1, 2, 3 wynosić będzie wówczas odpowiednio 5, 4, 1 jednostek i dlatego kierowany do realizacji będzie proces A3 a nie A2, że $RED_{A2} > RED_{A3}$.

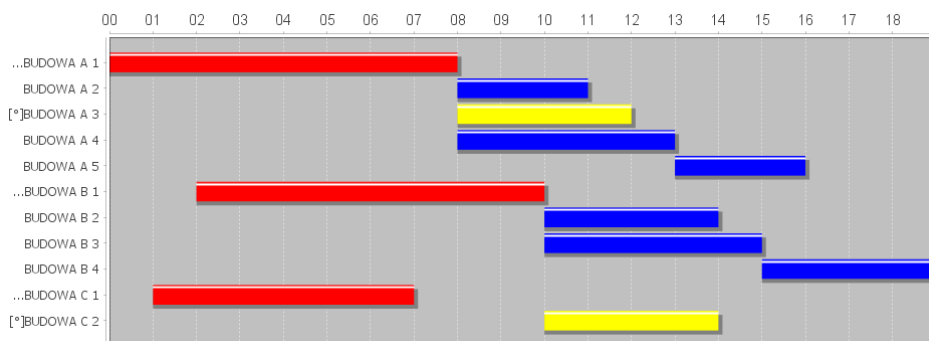
Tabela 8.13. Dane do przykładu ilustrującego ideę horyzontu planowania

Budowa	Proces wykonania procesu	Czas	Zapotrzebowanie na zasób 1	Waga zasobu 1	Zapotrzebowanie na zasób 2	Waga zasobu 2	Zapotrzebowanie na zasób 3	Waga zasobu 3	Wartość priorytetu RED
1	1	8	5		7		3		432
	2	3	6		5		1		156
	3	4	4		3		1		136
	4	5	2		8		5		205
2	1	8	6	6	2	3	8	1	400
	2	3	3		2		4		84
	3	4	2		1		2		68
3	1	6	2		5		3		180
	2	4	8		7		5		296



Rys. 8.21. Harmonogram realizacji zleceń – przykład z horyzontem planowania; decyzja o alokacji zasobów podejmowana w terminie $t_1 = 3$

W przypadku podejmowania decyzji o alokacji zasobów w terminie $t_1 = 5$, przewidywany stan dostępności zasobów każdego typu w terminie $t_1 = 10$ będzie wynosić odpowiednio: 13, 14, 14 jednostek, co pozwala na rozpoczęcie procesu C2 o $RED_{C2} = 296$. Skierowanie do realizacji tego procesu spowoduje zmniejszenie stanu dostępnych zasobów do poziomu odpowiednio: 5, 7 i 9 jednostek. Proces A4 o $RED_{A4} = 205$ nie może zostać wybrany ze względu na zbyt małą dostępność zasobu 2. Procesem wybieranym w drugiej kolejności jest proces A3 o $RED_{A3} = 156$. Stan dostępnych zasobów maleje do poziomu odpowiednio 1, 4, 8 jednostek i inne procesy nie mogą być rozpoczynane (rys.8.21).



Rys. 8.21. Harmonogram realizacji zleceń – przykład z horyzontem planowania; decyzja o alokacji zasobów podejmowana w terminie $t_1 = 5$

Podsumowanie

Przedsiębiorstwo budowlane lub podmiot gospodarczy świadczący usługi zarządzania inwestycjami budowlanymi, musi koordynować pracę wielu osób i organizacji na wielu budowach jednocześnie. Właściwa harmonizacja pracy brygad roboczych, terminów dostaw materiałów budowlanych czy maszyn umożliwia dotrzymanie terminów dyrektywnych ustalonych z inwestorami.

Efektywność realizacji przedsięwzięć budowlanych w dużym stopniu zależy od jakości projektu organizacji budowy oraz skuteczności działań podejmowanych w ramach kierowania operatywnego. Terminowa realizacja pojedynczego przedsięwzięcia nie gwarantuje jednak efektywności działalności całego przedsiębiorstwa (Marcinkowski 2007).

Plan produkcyjny przedsiębiorstwa budowlanego ma na celu harmonizację pracy wszystkich zasobów przedsiębiorstwa oraz zasobów pozyskanych z zewnątrz przy realizacji robót na różnych placach budowy. Przedsiębiorstwo opracowując plan produkcyjny musi osiągać cele poszczególnych przedsięwzięć (zleceń), mierzone w aspekcie czasu, kosztu i jakości. Najłatwiej jest cele te osiągnąć wykorzystując zasoby własne przedsiębiorstwa i sprawdzonych podwykonawców. Pozyskiwanie zasobów na rynku, w szczególności w czasie koniunktury w budownictwie, kiedy ich liczba jest zbyt mała w stosunku do zapotrzebowania, jest utrudnione i obarczone ryzykiem braku terminowości realizacji robót i ich złej jakości. Stąd też wykonawca powinien starać się zapewnić sobie taki poziom zatrudnienia pracowników i posiadanego sprzętu oraz wyposażenia, który umożliwi sprawną realizację robót, a podzlecenie robót ograniczyć do prac specjalistycznych.

Plan produkcyjny przedsiębiorstwa budowlanego jest zmienny w czasie co do ilości robót jak i zakresu ze względu na pozyskiwanie nowych zleceń i kończenie już rozpoczętych. Plan produkcyjny jest opracowywany z uwzględnieniem dostępności własnych zasobów odnawialnych (brygady robocze, urządzenia, maszyny) i ewentualnego podzlecenia robót. Zakres pozlecanych robót najczęściej obejmuje roboty specjalistyczne nie objęte specjalizacją wykonawcy. Plan produkcyjny musi zapewniać przede wszystkim ciągłość pracy zasobów własnych przedsiębiorstwa (Smaga 1992) i zapewniać przychody z pracy zasobów własnych dążąc jednocześnie do terminowej realizacji przedsięwzięć budowlanych. Kierownictwo przedsiębiorstwa kieruje się przy planowaniu produkcji zasadą gospodarności, tzn. ustala strategię rozdziału ograniczonych zasobów na różne fronty robót, aby zmaksymalizować swój efekt. Plan ten musi być okresowo aktualizowany, a podejmowane decyzje są często działaniami naprawczymi, mającymi na celu minimalizację opóźnień realizowanych procesów budowlanych. Często decyzje te nie są optymalne. Są podejmowane na podstawie niepełnych informacji dostarczanych z budów, a bazują głównie na doświadczeniu managerów niższego szczebla.

Literatura przedmiotu (cytowana w rozprawie) skupia się głównie na optymalizacji czasu, kosztu, wartości bieżącej netto pojedynczego przedsięwzięcia budowlanego oraz na metodach szacowania czasu procesów lub identyfikacji czynników ryzyka i ich wpływu na parametry (czas, koszt, jakość) procesów lub całość przedsięwzięć budowlanych. Niewiele jest natomiast prac z zakresu planowania i optymalizacji produkcji przedsiębiorstwa budowlanego. Było to głównym powodem powstania rozprawy, a jej celem było metodyki planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego (liczby i rodzaju brygad roboczych, liczby maszyn budowlanych itd.) w ramach planowania długookresowego oraz dostarczenia narzędzi wspierających pracę inżynieria-organizatora przy podejmowaniu decyzji na szczeblu operacyjnym.

Opracowany model symulacyjny realizacji planu produkcyjnego uwzględnia losowe terminy rozpoczęcia nowych zleceń (opisanych rozkładami prawdopodobieństwa) oraz losowy czas procesów budowlanych. W modelu zaimplementowano różne reguły heurystyczne rozdziału zasobów odnawialnych dla warunków stochastycznych. W celu dostosowania modelu do specyfiki budownictwa wprowadzono też opcję blokady zasobów na budowach (eliminowanie zbędnych przerzutów zasobów z budowy na budowę) oraz możliwość uwzględnienia horyzontu planowania – przy rozdziale zasobów są brane pod uwagę procesy, które mogą zakończyć się w najbliższej przyszłości (horyzoncie planowania), nie tylko w momencie alokacji zasobów. Przyjęta reguła heurystyczna rozdziału zasobów może być oceniana poprzez skrócenie czasu realizacji przedsięwzięć w stosunku do czasu obliczonego dla losowego wyboru procesu, czasem opóźnienia realizowanych zleceń, liczbą wykonanych przedsięwzięć w określonym czasie, liczbą czy kosztem „przerzutów” zasobów oraz stopniem wykorzystania zasobów odnawialnych – w zależności od celu zdefiniowanego przez zarząd przedsiębiorstwa. Możliwe jest stosowanie tych kryteriów łącznie.

Model planu produkcyjnego zaprezentowany w przykładzie był konsultowany z kierownikami budów jednego z lubelskich przedsiębiorstw budowlanych świadczących usługi deweloperskie, aby zapewnić maksymalną aproksymację analizowanych danych do warunków rzeczywistych.

Przeprowadzone badania symulacyjne dla różnych reguł heurystycznych rozdziału zasobów i różnych parametrów wejściowych (poziomów dostępności zasobów) wykazały, że istnieją strategie alokacji zasobów umożliwiające poprawę efektywności działalności przedsiębiorstwa budowlanego, przez co główny cel rozprawy został osiągnięty. Są to przede wszystkim dynamiczne reguły priorytetowe: minimalnego całkowitego zapasu czasu (zapas czasu jest obliczany na podstawie wylosowanego w przebiegu symulacyjnym czasu wykonania procesów zrealizowanych oraz czasu planowanego dla niezrealizowanych i zmienia się on w zależności od sposobu alokacji zasobów) oraz maksymalnego opóźnienia procesu. Dobre rezultaty daje także reguła minimalnego terminu najpóźniejszego rozpoczęcia procesu (*LST*). Niektóre z reguł heurystycznych,

np. największej liczby następników, dają rezultaty gorsze w stosunku do wyboru losowego procesów kierowanych do realizacji.

Reguły heurystyczne wykorzystane w modelu symulacyjnym realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego zostały w zaimplementowane także w systemie zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego (*SZOZOPB*). System *SZOZOPB* ma na celu ułatwienie pracy służb dyspozytorskich. Kierowanie się zweryfikowanymi na etapie badań symulacyjnych planu przedsiębiorstwa budowlanego regułami alokacji zasobów może zapewnić realizowanie robót w terminach określonych harmonogramami dyrektywnymi, jednocześnie umożliwiając uzyskanie wyższego stopnia harmonizacji pracy zasobów własnych przedsiębiorstwa budowlanego. System może być także wykorzystywany do harmonogramowania procesów jednego przedsięwzięcia.

Do oryginalnych rezultatów pracy można zaliczyć:

- opracowanie metodyki planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego, która pozwala na ustalanie limitu zasobów własnych przedsiębiorstwa budowlanego zapewniającego terminową realizację przedsięwzięć przy zapewnieniu wysokiego stopnia ich wykorzystania oraz operatywne planowanie zasobów,
- opracowanie modelu symulacyjnego realizacji planu produkcyjnego przedsiębiorstwa budowlanego, który uwzględnia specyficzne dla budownictwa ograniczenia: zmienność planu produkcyjnego przedsiębiorstwa, limity dostępności zasobów odnawialnych, konieczność przerzutów zasobów z jednego placu budowy na drugi, a przede wszystkim cykliczność planowania i realizacji przedsięwzięć w określonym przez decydenta horyzoncie czasu,
- opracowanie metody ustalania terminu dyrektywnego przedsięwzięć budowlanych na określonym przez decydenta poziomie niezawodności, która uwzględnia zmienny w czasie charakter zbioru zleceń przedsiębiorstwa, losowe czasy procesów budowlanych, limity dostępności zasobów oraz konieczność ich alokacji na różne place budowy,
- zastosowanie podobnego podejścia metodycznego do planowania zasobów odnawialnymi na poziomie strategicznym i operacyjnym,
- opracowanie systemu zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi przedsiębiorstwa budowlanego jako narzędzia wspomagania decyzji inżynierów-organizatorów,
- holistyczne ujęcie problematyki planowania zasobów odnawialnych przedsiębiorstwa budowlanego, obejmujące poziom strategiczny, taktyczny oraz planowania operatywnego.

Problem planowania realizacji zbioru zleceń jest na tyle ważny i złożony, że wymaga prowadzenia dalszych badań przede wszystkim w zakresie rozwoju i weryfikacji metod statystycznych prognozowania zbioru zleceń w warunkach rynkowych. Opracowywane modele planu produkcyjnego powinny łączyć me-

tody prognozowania wielkości produkcji budowlanej z modelami strategii przetargowych przedsiębiorstwa budowlanego. Ze względu na specjalizację przedsiębiorstw budowlanych oraz specyfikę rynków lokalnych, dane wejściowe do modelu symulacyjnego (typy realizowanych przedsięwzięć i ich modele sieciowe, typy i parametry rozkładów czasu realizacji procesów, limity dostępności zasobów itd.) muszą być zbierane i analizowane dla każdego analizowanego przedsiębiorstwa budowlanego.

Zaproponowany model symulacyjny nie wyczerpuje wszystkich ograniczeń realizacyjnych. Przy modelowaniu przedsięwzięć należy uwzględnić wpływ różnych ryzyk, przede wszystkim pory roku, na rozkład czasu procesów budowlanych czy też efektu uczenia się przy powtarzaniu tych samych procesów. W analizach pominięto też wpływ korelacji zmiennych losowych czasu procesów budowlanych. Zagadnienia te szczegółowo opisane w p. 4 niniejszej rozprawy. Wyznaczają one kierunek dalszych badań.

Model symulacyjny realizacji planu produkcyjnego i system zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi pozwala na implementację kolejnych reguł heurystycznych opisanych w literaturze przedmiotu. Ze względu na specyfikę modelowanego planu produkcyjnego przedsiębiorstwa (zmienność zakresu i ilości realizowanych robót oraz losowy czas realizacji procesów budowlanych), należy poszukiwać nowych, efektywnych heurystyk alokacji zasobów.

Zaproponowany system komputerowy zarządzania operatywnego zasobami przedsiębiorstwa (*SZOZOPB*) po wykonaniu testów na danych historycznych oraz przeszkoleniu dyspozytorów powinien być wdrożony w przedsiębiorstwach.

Niestety uzyskanie dużej liczby wiarygodnych danych (planowanych i rzeczywistych terminów rozpoczęcia i zakończenia zrealizowanych procesów budowlanych) jest utrudnione. Wynika z braku gromadzenia odpowiednich danych historycznych w małych i średnich przedsiębiorstwach. Dane te są często traktowane jako wrażliwe, decydujące o pozycji rynkowej przedsiębiorstwa, a więc dostępne jedynie dla menagerów przedsiębiorstwa.

Rozpoczęcie użytkowania *SZOZOPB* jest uwarunkowane wprowadzeniem informacji o bieżącym parametrach systemu roboczego przedsiębiorstwa (modele sieciowe realizowanych przedsięwzięć, stan zaawansowania rozpoczętych procesów oraz rodzaj i liczba wykorzystywanych zasobów, poziom i liczba zasobów dostępnych) stanowiących jego warunki brzegowe.

System *SZOZOPB* powinien być rozwijany, przede wszystkim poprzez implementację kolejnych reguł alokacji zasobów. Dalsze jego wersje powinny zapewniać możliwość wymiany danych z powszechnie stosowanymi w budownictwie programami do zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi.

Autor ma nadzieję, że zaproponowane podejście do planowania realizacji zleceń i alokacji zasobów przedsiębiorstwa budowlanego będzie rozwijane przez innych badaczy oraz znajdzie praktyczne zastosowanie w przedsiębiorstwach budowlanych.

Bibliografia

- AbouRizk S., Knowles, P., Hermann U.R., *Estimating labor production rates for industrial construction activities*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2001,127(6), p. 502–511.
- AbouRizk S.M., Wales R.J., *Combined discrete-event/continuous simulation for project planning*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1997, 123(1), p. 11–20.
- Ahuja H.N., Nandakumar, V., *Simulation model to forecast project completion time*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1985, 111(4), p. 325–342.
- Al-Khalil M.I., Al-Ghafly M.A., *Important causes of delay in public utility projects in Saudi Arabia*, "Construction Management and Economics", 1999, 17, p. 647–655.
- Anastasiou K., Tsekos C., *Operability analysis of marine projects based on Markov theory*, "Applied Ocean Research", 1996, 18, p. 329–352.
- Andi, *The importance and allocation of risks in Indonesian construction projects*, "Construction Management and Economics", 2006, 24, p. 69–80.
- Avramidis A. N., Wilson J. R., *Integrated variance reduction strategies for simulation*, "Operational Research", 1996, 44(2), p. 327–346.
- Avramidis A.N., Bauer K.W. Jr., Wilson J.R., *Simulation of stochastic activity networks using path control variates*, "Naval Research Logistics", 1991, 38(2), p. 183–201.
- Aziz R.F., *RPERT: Repetitive-Projects Evaluation and Review Technique*, "Alexandria Engineering Journal", 2014, 53(1), p. 81–93.
- Badiru A.B., *Project Management: Systems, Principles, and Applications*, "CRC Press", 2011.
- Bala W., Suliga J., *Planowanie i organizacja robót wodno-melioracyjnych*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1976.
- Ballard G., *Lookahead planning: the missing link in production control*, Technical Report No. 97-3, Construction Engineering and Management Program, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Berkeley, 1997, CA 9472.
- Banerjee A., Paul, A., *On path correlation and PERT bias*, "Applied Mathematics and Computation", 2008, 189(2), p. 1435–1447.
- Bień W., *Ekonomika i analiza działalności przedsiębiorstwa budowlanego*, Warszawa, PWE, 1989.
- Biernacki J., Cyunel B., *Metody sieciowe w budownictwie*, Warszawa, Arkady, 1989.
- Biruk S., Jaśkowski P., Czarnigowska A., *Modeling contractor's bidding decisions*, "Procedia Engineering", 2017, 182, p. 1–786.

- Biruk S., Jaśkowski P., *Ocena skuteczności wybranych metod redukcji wariacji w badaniach symulacyjnych modeli sieciowych przedsięwzięć budowlanych*. „*Studia Ekonomiczne*”, „Zeszyty Naukowe Wydziałowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, 2012, 97, s. 405–416.
- Biruk S., Jaśkowski P., *Simulation modelling construction project with repetitive tasks using Petri nets theory*, “*Journal of Business Economics and Management*”, 2008, 9(3), p. 219–226.
- Biruk S., Jaśkowski P., *The work continuity constraints problem in construction projects’ network models*, “*Archives of Civil Engineering*”, 2009, 55(1), p. 29–41.
- Biruk S., Jaśkowski P., *Zastosowanie metody losowania LHS w badaniach symulacyjnych modeli sieciowych*, „*Budownictwo i Inżynieria Środowiska*”, 2011, 2, s. 209–213.
- Biruk S., Jaworski K.M., Tokarski Z., *Podstawy organizacji robót drogowych*, Warszawa, WN PWN, 2007.
- Biruk S., *Modelowanie przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem sieci Petriego*, 48 KN KILiW PAN i KN PZITB Krynica, 2002, t.3, s. 315–322.
- Biruk S., *O statystycznym szacowaniu czasu procesów budowlanych*, 44 KN KILiW PAN i KN PZITB Krynica, 1998, t.7 s. 5–10.
- Biruk S., Rzepecki Ł., *Wpływ zjawiska uczenia się i zapominania na czas realizacji powtarzalnych procesów budowlanych realizowanych w warunkach losowych*, „*Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*”, 2017, 26 (2), s. 202–209.
- Biruk S., Sobotka A., *Symulacyjny model do wyboru strategii zaopatrzenia w przedsiębiorstwie budowlanym*, „*Metody Komputerowe w Inżynierii Łądowej*”, 1997, 3, s. 9–20.
- Bowers J., *Identifying critical activities in stochastic resource constrained networks*, Omega, “*International Journal of Management Science*”, 1996, 24(1), s. 37–46.
- Burt J.M. Jr., Garman M.B., *Conditional Monte Carlo: A simulation technique for stochastic network analysis*, “*Management Science*”, 1971, 18, p. 207–217.
- Cario M.C., Nelson B.L., *Modeling and generating random vectors with arbitrary marginal distributions and correlation matrix*. Technical Report, Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University, Evanston, 3, 1997.
- Carlson J.G.H., *Cubic learning curves-precision tool for labor estimating*, “*Manufacturing Engineering & Management*”, 1973, 71(5), p. 22–25.
- Carlson J.G.H., Rowe R.G., *How much does forgetting cost?* “*Industrial Engineering*”, 1976, 8(9), p. 40–47.
- Carr R.I., *Simulation of construction project duration*, “*Journal of the Construction Division*”, 1979, 105(2), p. 117–128.

- Chan A.P.C., Scott D., Chan A.P.L., *Factors affecting the success of a construction project*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2004, 130(1), p. 153–155.
- Chanas S., Kamburowski J., *The use of fuzzy variables in PERT*, "Fuzzy Sets and Systems", 1981, 5(1), p. 11–19.
- Chanas S., Radosiński E., *Model czasu realizacji czynności w świetle teorii zbiorów rozmytych*, „Problemy Organizacji”, 1976, 3, s. 68–75.
- Chanas S., Zieliński P., *Critical path analysis in the network with fuzzy activity times*, Fuzzy Sets and Systems, 2001, 122, p. 195–204.
- Chen C.T., Huang S.F., *Applying fuzzy method for measuring criticality in project network*, "Information Sciences", 2007, 177, p. 2448–2457.
- Chen Z, Shan B., *The application of Petri nets to construction project management*, "Affective Computing and Intelligent Interaction" Vol. 137 of the series: Advances in Intelligent and Soft Computing Springer, 2012, p. 151–158.
- Chi H., Jones E. L., *Computational investigations of quasirandom sequences in generating test cases for specification-based tests*, Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006, p. 975–980.
- Cho J.G., Yum, B.J., *An uncertainty importance measure of activities in PERT networks*, "International Journal of Production Research", 1997, 35(10), p. 2737–2758.
- Cho S., *An exploratory project expert system for eliciting correlation coefficient and sequential updating of duration estimation*, "Expert Systems with Applications", 2006, 30, p. 553–560.
- Chua D.K.H., Shen L.J., Bok S.H., *Constraint-based planning with integrated production scheduler over Internet*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2003, 29(3), p. 293–301.
- Chung T.H., *Modeling of construction scheduling with coloured Petri nets*, Proceedings of the International Conference on Process Automation, Control and Computing (PACC), 2011, p. 1–6.
- Cieszyński K., *W poszukiwaniu rynkowego ustroju budownictwa. Autonomiczne organizacje – uczestnicy rynkowej struktury budownictwa*, „Przegląd Budowlany”, 1999, 9, s. 11–13.
- Cottrell W.D., *Simplified Program Evaluation and Review Technique (PERT)*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1999, 125(1), p. 16–22.
- Couto J.P., Teixeira J.C., *Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction*, "Construction Management and Economics", 2005, 23(4), p. 355–364.
- Creemers S., Demeulemeester E., Van de Vonder S., *A new approach for quantitative risk analysis*, "Annals of Operations Research", 2014, 213(1), p. 27–65.
- Czarnigowska A., Sobotka A., *Przewidywalność czasu budowy: publiczne przedsięwzięcia drogowe*. „Czasopismo Techniczne”, 2010, 2(107), p. 23–43.

- Dai J., Goodrum P.M., Maloney W.F., *Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2009, 135(3), p. 217–226.
- Davis E.W., Patterson J.H., *A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling*, "Management Science", 1975, 21(8), p. 944–955.
- Davis R., *Teaching project simulation in Excel using PERT-beta distributions*, "Informs Transactions on Education", 2008, 8(3), p. 139–148.
- Dawood N., *Estimating project and activity duration: a risk management approach using network analysis*, "Construction Management and Economics", 1998, 16, p. 41–48.
- DeJong J.R., *The effect of increased skills on cycle time and its consequences for time standards*, "Ergonomics", 1957, 1, p. 51–60.
- Demeulemeester E.L., Herroelen W.S., *Project scheduling. A research handbook*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Dicesare F., Harhalakis G., Proth J. M., Silva M., Vernadat F. B., *Practice of Petri nets in manufacturing*, Londyn, Chapman & Hall, 1993.
- Dodin B. M., Elmaghraby S. E., *Approximating the criticality radices of the activities in the PERT network*, "Management Science", 1985, 31, p. 207–223.
- Doman R., *Zastosowanie Kopuli w modelowaniu dynamiki zależności na rynkach finansowych*, Poznań, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, 2011.
- Dubois D., Foulloy L., Mauris G., Prade H., *Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities*, "Reliable Computing", 2004, 10, p. 273–297.
- Dubois D., Prade H., *Operations on fuzzy numbers*, "International Journal of Systems Science", 1978, 9(6), p. 613–626.
- Dubois D., Prade H., Sandri S., *On possibility/probability transformations*, [In:] Fuzzy Logic, Theory and Decision Library (Series D: System Theory, Knowledge Engineering and Problem Solving), eds. Lowen R., Roubens M., Dordrecht, Springer, 1993, 12, p. 103–112.
- Dytczak M., Ginda G., Szklennik N., *Identification of weather insensitive to construction schedules*, "Czasopismo Techniczne", 2-B, s. 291–297.
- Dytczak M., Ginda., Wojtkiewicz T., *Identyfikacja roli czynników opóźnień realizacji złożonych przedsięwzięć budowlanych*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 2, s. 481–485.
- Dyżewski A., *Technologia i organizacja budowy*, Warszawa, Arkady, 1965.
- Dziadosz A., *Przegląd wybranych metod wspomagających analizę ryzyka przedsięwzięć budowlanych*, 55 KN KILiW PAN i KN PZITB, 2009, s. 708–714.
- Edwards P.J., Bowen P.A., *Risk and risk management in construction projects: Concepts, terms and risk categories re-defined*, "Journal of Construction Procurement", 2000, 5(1), p. 42–57.
- Eisner H., *A generalized network approach to the planning and scheduling of a research project*, "Operation Research", 1962, 10(1), p. 115–125.

- Elizabeth S, Sujatha L., *Critical path problem under fuzzy environment*, "International Journal of Computer Applications", 2013, 75(1), p. 8–12.
- Elmaghraby S.E., *On criticality and sensitivity in activity networks*, "European Journal of Operational Research", 2000, 127(2), p. 220–238.
- Elmaghraby S.E., *An algebra for the analysis of generalized activity networks*, "Management Science", 1964, 10(3), p. 494–514.
- Elmaghraby S.E., *Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting (EMQ/LaF)*, "Production Planning & Control", 1990, 1, p. 196–208.
- Enshassi A., Mohamed S., Mustafa Z.A., Mayer P.E., *Factors affecting labour productivity in building projects in the Gaza Strip*, "Journal of Civil Engineering and Management", 2007, 13 (4), p. 245–254.
- Evans G.W., Wallace G.F., Sutherland G. L., *Simulation using digital computers*, New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1967.
- Ezeldin A.S., Sharara L.M., *Neural networks for estimating the productivity of concreting activities*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2006, 132(6), p. 650–656.
- Faridi A.S., El-Sayegh S.M., *Significant factors causing delay in the UAE construction industry*, "Construction Management and Economics", 2006, 24, p. 1167–1176.
- Farnum N.R., Stanton L.W., *Some results concerning the estimation of beta distribution parameters in PERT*, "Journal of Operational Research Society", 1987, 38, p. 287–290.
- Fatemi Ghomi S.M.T., Ashjari B., *A simulation model for multi-project resource allocation*, "International Journal of Project Management", 2002, 20, p. 127–130.
- Fatemi Ghomi S.M.T., Teimouri E., *Path critical index in PERT networks*, "European Journal of Operational Research", 2002, 141, p. 147–152.
- Fayek A.R., Oduba A., *Predicting industrial construction labor productivity using fuzzy expert systems*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2005, 131(8), p. 938–941.
- Flanagan R., Norman G., *Risk management and construction*, Oxford, UK, Blackwell Publishing, 1993.
- Fortune, J., White, D., *Framing of project critical success factors by a systems model*, "International Journal of Project Management", 2006, 24, p. 53–65.
- Frees E.W., Valdez E.A., *Understanding Relationships using copulas*, "North American Actuarial Journal", 1998, 2, p. 1–25.
- Frimpong Y., Oluwoye J., *Significant factors causing delay and cost overruns in construction of ground-water projects in Ghan*, "Journal of Construction Research", 2003, 4 (2), p. 175–187.
- Gallagher C., *A note on PERT assumptions*, "Management Science," 1987, 33, p. 1360.

- Ganame P., Chaudhari P., *Construction building schedule risk analysis using Monte-Carlo simulation*, "International Research Journal of Engineering and Technology", 2015, 02(04), p. 1402–1406.
- Garner D. F., Borcharding J. D., Samelson N.M., *Factors influencing the motivation and productivity of craftsmen and foremen on large construction projects*. U.S. Dept. of Energy (DOE), Contract EQ-78-G-01-6333, Vol. 2, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Texas at Austin, 1979.
- Geer J.F., Klir G.J., *A mathematical analysis of information-preserving transformations between probabilistic and possibilistic formulations of uncertainty*, "International Journal of General Systems", 1992, 20(2), p. 143–176.
- Genest C., Favre A.C., *Everything You always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask*, "Journal of Hydrologic Engineering", 2007, 12(4), p. 347–368.
- Genest C., Ghoudi K., Rivest L.P., *A semiparametric estimation procedure of dependence parameters in multivariate families of distribution*, "Biometrika", 1995, 82(3), p. 543–552.
- Gentle J.E., *Random number generation and Monte Carlo methods*, New York, Springer, 2003.
- Georgy M.E., Chang L.M., Zhang L., *Prediction of engineering performance: A neurofuzzy approach*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2005, 131(5), p. 548–557.
- Gładysz B., *Metoda wyznaczania ścieżki krytycznej przedsięwzięć z rozmytymi czasami realizacji zadań*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, 2011, 238, s. 25–33.
- Globerson S., Levin N., *Incorporating forgetting into learning curves*, "International Journal of Operations & Production Management", 1987, 7(4), p. 80–94.
- Globerson S., Levin N., Shtub, A., *Impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task*, "IIE Transactions Institute of Industrial Engineers", 1989, 21(4), p. 376–381.
- Głowacz L., Kołton A., *Problemy ustalania i weryfikacji statystycznych wielkości szacowanych w budownictwie*, 37 KN KILiW PAN i KN PZITB Krynica, 1991, t.4, s. 125–130.
- Goldratt E.M., *Critical chain*, Great Barrington, MA, The North River Press, 1997.
- Golenko-Ginzburg D., Blokh D., *A generalized activity network model*, "Journal of Operation Research Society", 1997, 48, p. 391–400.
- Golenko-Ginzburg D., *On the distribution of activity times in PERT*, "Journal of Operational Research Society" 1988, 39, p. 767–771.
- Golenko-Ginzburg D., *Stochastic network models in innovative projecting*, Воронеж, 2011.
- Gordon G., *Symulacja systemów*, Warszawa, WNT, 1974.
- Greenberg D., Golenko-Ginzburg D., *Implementing beta-distribution in project management*, "Journal of Applied Quantitative Methods", 2010, 5(3), p. 460–466.

- Grubbs, F.E., *Attempts to validate certain PERT statistics or 'Picking on PERT*, "Operations Research", 1962, 10(6), p. 912–915.
- GUS, *Opracowanie sygnałne. Podmioty gospodarcze według rodzajów i miejsc prowadzenia działalności w 2016 r*, Warszawa, 2017.
- Hadad Y., Keren B., Laslo Z., *Multi-criteria methods for ranking project activities*, "Yugoslav Journal of Operations Research", 2016, 26 (2), p. 201–219.
- Hagstrom J.N., *Computing the probability distribution of project duration in a PERT network*, "Networks", 1990, 20, p. 231–244.
- Haldar A., Mahadevan S., *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*, John Wiley and Sons Ltd, 2000.
- Halpin D.W., Riggs L.S.L., *Planning and analysis of construction operations*, John Wiley and Sons Ltd, 1992.
- Háp I., Cais L., *Modelling of the production plan of building enterprises*, Konferencja Naukowo-Techniczna: Inżynieria Procesów Budowlanych, Bydgoszcz, 1997, p. 207–214.
- Harris R.B., Ioannou P.G., *Scheduling project with repeating activities*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1998, 124 (4), p. 269–278.
- Hartmann S., Briskorn D., *A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem*, "European Journal of Operational Research", 2012, 207(1), p. 1–14.
- Hassanein A., Moselhi O., *Planning and scheduling highway construction*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2004, 130(5), p. 638–646.
- Hejducki Z., Rogalska M., *Time coupling methods: construction scheduling and time/cost optimization*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- Hejducki Z., *Scheduling model of construction activity with time couplings*, "Journal of Civil Engineering and Management", 2003, 9(4), p. 284–291.
- Hejducki Z., *Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych*, „Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej”, Monografie, 2000, 77(34).
- Hillier F.S., Lieberman G.J., *Introduction to stochastic models in operations research*, McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- Hinze J., Olbina S., *Empirical analysis of the learning curve principle in prestressed concrete piles*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2009, 135 (5), p. 425–31.
- Hoła B., *Modelowanie jakościowe i ilościowe wypadkowości w budownictwie*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- Hoła B., Mrozowicz J., *Modelowanie procesów budowlanych o charakterze losowym*, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003.
- Hon-Siang L., Somarajan C., *A proposal on improved procedures for estimating task time distribution in PERT*, "European Journal of Operational Research", 1995, 85, p. 39–52.

- Howell G., *What is Lean Construction*-1999, Proceedings of 6th IGLC Conference, 26-28 July, California, Berkeley, 1999, p. 1–10.
- Hryniewicz O., *Teoretyczne aspekty opisy niepewności*, „Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Oeconomica”, 2004, 183, s. 49–58.
- Hu D., Mohamed Y., *Time-stepped, simulation-based scheduling system for large-scale industrial construction projects*, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 2013, p. 3249–3256.
- Ibadov N. Kulejewski J., *Rozmyte modelowanie czasów wykonania robót budowlanych w warunkach niepewności*, „Czasopismo Techniczne”, 2010, 107(1-B), s. 139–155.
- Iman R.L., Conover W.J., *A Distribution-free approach to inducing rank order correlation among input variables*, “Communications in Statistics-Simulation and Computation”, 1982, 11 (3), p. 311–334.
- Ingalls R.G., Morrice D.J., *PERT scheduling with resource using qualitative simulation graphs*, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000, p. 362–370.
- Ingalls R.G., Morrice D.J., Yücesan E., Whinston A.B., *Execution conditions: A formalization of event cancellation in simulation graphs*, “INFORMS Journal on Computing”, 2003, 15(4), p. 397–411.
- Ioannou P.G., Martinez J.C., *Comparison of construction alternatives using matched simulation experiments*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 1996, 122(3), p. 231–241.
- Ioannou P.G., Martinez J.C., *Project scheduling using state-based probabilistic decision networks*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998, p. 1287–1294.
- Jaber M.Y., Bonney M. C., *Production breaks and the learning curve: the forgetting phenomena*, “Applied Mathematical Modelling”, 1996, 20, p. 162–169.
- Jaber M.Y., Bonney M.C., *A comparative study of learning curves with forgetting*, “Applied Mathematical Modelling”, 1997, 21, p. 523–531.
- Janczura M., Kuchta D., *Harmonogramowanie reaktywne a ryzyko w projekcie*. Studia Ekonomiczne 97 Modelowanie preferencji a ryzyko, 2012, s. 253–269, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach.
- Janusz L., *Modelowanie wieloczynnikowe na przykładzie badania pracochłonności i kosztów montażu konstrukcji podatnych z blach falistych*. [W:] Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, red. Kapliński O., PAN, KILiW, IPPT Studia z Zakresu Inżynierii nr 57, Warszawa, 2007.
- Jarkas A.M., Horner M., *Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity*, “Construction Management and Economics”, 2011, 29, p. 483–493.
- Jarkas A.M., *Critical investigation into the applicability of the learning curve theory to rebar fixing Labor Productivity*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2010, 136(12), p. 1279–1288.

- Jaśkowski P., Biruk S., *Projektowanie odpornych harmonogramów budowlanych w oparciu o wieloatrybutową ocenę wpływu warunków realizacyjnych*. Projektu badawczy – N N506 254637 sfinansowany przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji, Politechnika Lubelska Wydział Budownictwa i Architektury, Lublin, 2011.
- Jaśkowski P., Biruk S., *The method for improving stability of construction project schedules through buffer allocation*, “Technological and Economic Development of Economy”, 2011a, 17(3), p. 429–444.
- Jaśkowski P., *Designing the structure of a construction project operating system using evolutionary algorithm*, “Archives of Civil Engineering”, 2008, 54, 2, p. 371–394.
- Jaśkowski P., *Methodology for enhancing reliability of predictive project schedules in construction*, “Eksploracja i Niezawodność”, 2015, 17(3), p. 470–479.
- Jaśkowski P., *Projektowanie realizacji przedsięwzięć budowlanych ze zmienną w czasie intensywnością wykonania procesów niekrytycznych*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych,” 2013, 1(167), s. 150–159.
- Jaśkowski P., Sobotka A., Czarnigowska A., *Selecting material supply channels for construction projects: a decision model*, International Scientific Conference: People, Buildings and Environment, 2014, Kroměříž, Czech Republic, p. 112 – 123.
- Jaśkowski P., Sobotka A., *Multicriteria construction project scheduling method using evolutionary algorithm*, “Operational Research”, 2006, 6(3), p. 283–297.
- Jaśkowski P., Tomczak M., *Problem minimalizacji przestoju w pracy brygad generalnego wykonawcy w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych*, „Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska”, 2017, 26(2), s. 193–201.
- Jaworski K. M., Biruk S., *A model of construction project based on Petri nets theory*, “Archives of Civil Engineering”, 2000, 46 (1), p. 71–82.
- Jaworski K.M., *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowe PWN, 1999.
- Jaworski K.M., *Problemy optymalizacyjne w wyrównywaniu wykresów sprawdzających*, Konferencja Naukowo-Techniczna: Problemy budowlane. Realizacja procesów i obiektów budowlanych, Gliwice-Kokotek, 2000, s. 75–80.
- Jeang A., *Project management for uncertainty with multiple objectives optimisation of time, cost and reliability*, “International Journal of Production Research”, 2015, 53(5), p. 1503–1526.
- Jerzak M., *Organizacja i ekonomika przedsiębiorstw budowlano-montażowych*, Warszawa, PWN, 1976.
- Johnson D., *The triangular distribution as a proxy for beta distribution in risk analysis*, “The Statistician”, 1997, 46(3), p. 387–398.

- Johnston D.W., *Linear scheduling method for highway construction*, "Journal of the Construction Division", 1981, 107(2), p. 247–261.
- Kaczmarek T.T., *Finanse przedsiębiorstw. Teoria i praktyka*, Warszawa, Oficyna Ekonomiczna Grupa Wolters Kluwer, 2014.
- Kadir M.R.A., Lee W.P., Jaafar M.S., Sapuan S.M., Ali A.A.A., *Factors affecting construction labour productivity for Malaysian residential projects*, "Structural Survey", 2005, 23 (1), p. 42–54.
- Kamburowski J., *An upper bound on the expected completion time of PERT networks*, "European Journal of Operational Research", 1985, 21, p. 206–212.
- Kamburowski J., *New validations of PERT times*, "International Journal of Management Science", 1997, 25(3), p. 323–328.
- Kanagasabapathi B., Ananthanarayanan K., *A simulation model for resource constrained scheduling of multiple projects*, [In:] 21st Annual ARCOM Conference, ed. Khosrowshahi F., SOAS, University of London. Association of Researchers in Construction Management, 2005, 2, p. 823–31.
- Kapliński O., *Modelling of construction processes. A managerial approach*, Studia z Zakresu Inżynierii nr 43, KILiW PAN, IPPT PAN, Warszawa, 1997.
- Kartam N.A., Kartam S.A., *Risk and its management in the Kuwaiti construction industry: a contractors' perspective*, "International Journal of Project Management", 2001, 19, p. 325–335.
- Kasprowicz T., *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*, KN Ekologia w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, Lublin-Kazimierz Dolny, 1998, t.2, s. 173–180.
- Kasprowicz T., *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*, Radom-Warszawa, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, 2002.
- Kasprowicz T., *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*, W Kapliński O. (red) *Metody i modele w inżynierii przedsięwzięć budowlanych*, PANKILiW, IPPT, Warszawa, 2007.
- Keefer D.L., Verdini W.A., *Better estimation of PERT activity time parameters*, "Management Science", 1993, 39, p. 1086–1091.
- Kerzner H., *Project Management. A systems approach to planning, scheduling, and controlling*, John Wiley and Sons Ltd, 2003.
- Kidd J.B., *A comparison between the VERT program and other methods of project duration estimation*, "International Journal of Management Science", 1987, 15(2), p. 129–134.
- Kleindorfer G.B., *Bounding distributions for a stochastic acyclic network*, "Operations Research", 1971, 19, p. 1586–1601.
- Klir G.J., *A principle of uncertainty and information variance*, "International Journal of General Systems", 1990, 17(2-3), p. 249–275.
- Knauff A., Olędzka D., *Wielokryterialna ocena frontu realizacyjnego przedsiębiorstwa budowlanego*, 42 KN KILiW PAN i KN PZITB Wrocław-Krynica, 1999, t.5, s. 35–42.

- Kokkaew N., Chiara N., *Modelling completion risk using stochastic critical path-envelope method: a BOT highway project application*, "Construction Management and Economics", 2010, 28, p. 1239–1254.
- Korde T., Li M., Russell A.D., *State-of-the-art review of construction performance models and factors*, ASCE Construction Research Congress, San Diego, California, 2005, p. 156–162.
- Körner H., Franz V., *Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse*, "Baumaschine und Bautechnik", 1989, 36(5), p. 247–256.
- Kotz S., van Dorp J.R., *Beyond beta. Other continuous families of distributions with bounded support and applications*, Singapore, World Scientific, 2004.
- Kuchta D., *Miękka matematyka w zarządzaniu. Zastosowanie liczb przedziałowych i rozmytych w rachunkowości zarządczej*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- Kuchta D., *Use of fuzzy numbers in project risk (criticality) assessment*, "International Journal of Project Management", 2001a, 19, p. 305–310.
- Kulejewski J., Ibadov N., *Metoda oceny dotrzymania terminu realizacji budowy w warunkach nieprecyzyjnego formułowania danych planistycznych*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 58(3/11/3), 276, s. 249–256.
- Kulejewski J., Ibadov N., Zieliński B., *Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych w harmonogramowaniu robót budowlanych metodą łańcucha krytycznego*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 2, s. 331–338.
- Kulejewski J., *Metody harmonogramowania budowy z uwzględnieniem rozmytego charakteru danych*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, 153, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- Kulejewski J., Zawistowski J., *Metoda symulacyjna wyznaczania wielkości buforów stabilizujących harmonogramy budowlane*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 2, s. 563–572.
- Lam K.C., Lee D., Hu T., *Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction*, "International Journal of Project Management", 2001, 19, p. 411–420.
- Łapuńka I., Pisz I., Marek-Kołodziej K., *Pragmatyzm krzywych uczenia się i doświadczeń w aspekcie organizacji projektowych*. [W:] Determinanty zarządzania projektami i procesami w organizacji, Przedsiębiorczość i Zarządzanie, red. Stroińska E., Łukasz Sułkowski Ł., 2015, 16 (5), część 2, s. 29–41.
- Law A.M., Kelton W.D., *Simulation Modeling & Analysis*, Mc-Graw Hill International Editions, 1991.
- Lee D.E., Bae T.H., Arditi D., *Advanced stochastic schedule simulation system*, "Civil Engineering and Environmental Systems", 2012, 29(1), p. 23–40.
- Lee D.E., *Probability of project completion using stochastic project scheduling simulation*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2005, 131(3), p. 310–318.

- Lee H.S, Shin J.W., Park M., Ryu H.G., *Probabilistic duration estimation model for high-rise structural work*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2009, 135(1), p. 289–298.
- Lee S., Halpin, D.W., *Predictive tool for estimating accident risk*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2003, 129(4), p. 431–436.
- Lee S.M., Moeller G.L., Digman L.A., *Network analysis for management decisions: A stochastic approach*, International Series in Management Science Operations Research, Springer, 1982.
- Lenkiewicz W., Olędzka D., *Ustalanie liczebności załogi budowy według przyjętego kryterium*, 40 KN KILiW PAN i KN PZITB. Rzeszów-Krynica-Warszawa, 1994, t.6, s. 157–164.
- Leung Y., *Maximum entropy estimation with inexact information*. [In:] Fuzzy Sets and Possibility Theory – Recent Developments, ed. Yager R.R., New York, Pergamon Press, 1980, p. 32–37.
- Li H., Liu K., *Resource management modelling and simulating of construction project based on Petri net*, “Computer Modelling & New Technologies”, 2014, 18(4) p. 178–183.
- Li M., *Diagnosing construction performance by using causal models*, PhD Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, 2009.
- Li S., Jia Y. Wang J., *A discrete-event simulation approach with multiple-comparison procedure for stochastic resource-constrained project scheduling*, “The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2012, 63, p. 65–76.
- Lichtenstein S., Fischhoff B., Philips L., *Calibration of probabilities: the state of the art to 1980*, [In:] Judgment under uncertainty: heuristics and biases, eds. Kahneman D., Slovic P., Tversky A., New York, Cambridge University Press, 1982.
- Lidelöw H., Simu K., *Understanding construction contractors and their operations strategies*, “Procedia Economics and Finance”, 2015, 21, p. 48–56.
- Lu M., AbouRitzk S.M., *Simplified CPM/PERT simulation model*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 1999, 126(3), p. 219–226.
- Lu M., *Enhancing Project Evaluation and Review Technique simulation through artificial neural network-based input modeling*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2002, 128(5), p. 438–445.
- Lucko G., *Productivity scheduling method compared to linear and repetitive project scheduling methods*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2008, 134(9), p. 711–20.
- Lutz, J., Halpin, D., Wilson, J., *Simulation of learning development in repetitive construction*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 1994, 120(4), p. 753–73.
- MacCrimmon K.R., Ryavec C., *An analytical study of PERT assumptions*, “Operational Research”, 1964, 12, p. 16–37.

- Madadi M, Iranmanesh H., *A management oriented approach to reduce a project duration and its risk (variability)*, "European Journal of Operational Research", 2012, 219, p. 751–761.
- Majid M.Z.A., McCaffer R., *Factors on non-excusable delays that influence contractors' performance*, "Journal of Management in Engineering", 1998, 14(3), p. 42–49.
- Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., *Application of a Technique of Research and Development Program Evaluation*, "Operations Research", 1959, 7(5), p. 646–669.
- Mályusz M., Pém A., *Prediction of the learning curve in roof insulation*, "Automation in Construction", 2013, 36, p. 191–195.
- Marcinkowski R., *Harmonogramowanie produkcji budowlanej*. [W:] Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych, red. Kapliński O., PAN, KILiW, IPPT: Studia z Zakresu Inżynierii nr 57, Warszawa, 2007.
- Marcinkowski R., *Harmonogramowanie produkcji przedsiębiorstwa budowlanego*, Konferencja Naukowo-Techniczna: Budownictwo polskie w rok po wstąpieniu do Unii Europejskiej. Wybrane problemy technologiczne i organizacyjne, Gdańsk, 2005, s. 147–154.
- Marcinkowski R., *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej*, Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2002.
- Marcinkowski R., *Planowane przedsięwzięć z analizą hierarchicznych struktur realizatorów*, 42 KN KILiW PAN i KN PZITB Kraków-Krynica, 1996, t.6, s. 173–180.
- Marcinkowski R., *Zarządzanie zasobami o strukturach złożonych w działalności inżynieryjno-budowlanej*, 48 KN KILiW PAN i KN PZITB, Opole-Krynica, 2002a, t.3, s. 341–348.
- Martinez J.C., Ioannou P.G., *General purpose systems for effective construction simulation*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1999, 125(4), p. 265–276.
- Mazur J.E., Hastie R., *Learning as accumulation: A reexamination of the learning curve*, "Psychological Bulletin", 1978, 85(6), p. 1256–1274.
- Mbachu J., Nkado R., *Factors constraining successful building project implementation in South Africa*, "Construction Management and Economics", 2007, 25, p. 39–54.
- McCombs E.L., Elam M.E., Pratt D.B., *Estimating task duration in PERT using the Weibull probability distribution*, "Journal of Modern Applied Statistical Methods", 2009, 8(1), p. 282–288.
- Mehrotra K, Chai J., Pillutla S., *A Study of approximating the moments of job completion time in PERT networks*, "Journal of Operations Management", 1996, 14, p. 277–289.
- Mezher T.M., Tawil W., *Causes of delays in the construction industry in Lebanon*, "Engineering, Construction and Architectural Management", 1994, 5(3), p. 252–260.

- Michnowski Z., *Nowoczesne sieciowe metody modelowania graficzno-matematycznego.*, [W:] Podstawy organizacji, zarządzania i technologii w budownictwie, Warszawa, Arkady, 1985.
- Mielczarek B., *Metody próbkowania w symulacji Monte Carlo*, Prace Naukowe Instytutu Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Studia i materiały, 2007, 25(83), p. 187–199.
- Mielczarek B., *Modelowanie symulacyjne w zarządzaniu. Symulacja dyskretna*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- Milian Z., *Dokładne rozwiązania problemu PERT z mieszanymi rozkładami czasu realizacji zadań*, „Czasopismo Techniczne”, 2010, 2(107), s. 277–291.
- Milian Z., *Monte Carlo simulation with exact analysis for stochastic pert networks*, Proceedings of the the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius, Lithuania, 2008, p. 598–603.
- Miłosz M., Muryjas P., Sobotka A., *Modelowanie działalności przedsiębiorstwa metodą dynamiki systemowej*, KN Aktualna tematyka i wyniki prac naukowo-badawczych z zakresu inżynierii procesów budowlanych, Białystok-Białowieża, 1995, s. 185–189.
- Miłosz M., Sobotka A., *Organizacja i zarządzanie w budownictwie, Cz. IV. Modelowanie procesów budowlanych*, Lublin, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1993.
- Moder J.J., Rodgers E.G., *Judgment estimates of the moments of PERT type distributions*, “Management Science”, 15(2), p. B76–B83.
- Moeller G.L., *Operations Planning with VERT*, “Operations Research”, 1968, 29(4), p. 676–697.
- Mohan S., *Expert systems applications in construction management and engineering*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 1990, 116(1), p. 87–99.
- Mohan S., Gopalakrishnan M., Balasubramanian H., Chandrashekhar A., *A lognormal approximation of activity duration in PERT using two time estimates*, “Journal of Operational Research Society”, 2007, 58, p. 827–831.
- Moret Y., Einstein H.H., *Modeling correlations in rail line construction*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2012, 138(9), p. 1075–1084.
- Moselhi O., Hegazy T., Fazio P., *Neural networks as tools in construction*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 1991, 117(4), p. 606–625.
- Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe*, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 1997.
- Nalepka A., *Struktura organizacyjna*, Kraków-Kluczbork, Antykwia, 2001.
- Nasir D., McCabe B., Hartono L., *Evaluating risk in construction–schedule model (ERIC–S): Construction schedule risk model*, “Journal of Construction Engineering and Management”, 2003, 129(5), p. 518–527.

- Nembhard D.A., Uzumeri M.V., *Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks*, "International Journal of Industrial Ergonomics", 2000, 25(4), p. 315–326.
- Nguyen L.D., Phan D.H., Tang L.C.M., *Simulating construction duration for multistory buildings with controlling activities*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2013, 139(8), p. 951–959.
- O'Brien J.J., *VPM scheduling for high rise buildings*, "Journal of the Construction Division", 1975, 101, p. 895–905.
- Ökmen Ö., Öztaş A., *Construction project network evaluation with correlated schedule risk analysis model*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2008, 134(1), p. 49–63.
- Oleđzka D., *Metoda określania frontu inwestycyjnego*, „Archiwum Inżynierii Ładowej”, 1988, 4, s. 577–590.
- Operation research applications*, red: Ravindran A.R., CRC Press: Taylor and Francis Group, 2009.
- Organizacja i sterowanie produkcją*, red. Brzeziński M., Warszawa, Agencja Wydawnicza Placet, 2002.
- Orihuela P., Orihuela J., Pacheco S., *Information and communications technology in construction: a proposal for production control*, "Procedia Engineering", 2016, 164, p. 150–57.
- Öztaş A., Önder Ö., *Judgmental risk analysis process development in construction projects*, "Building and Environment", 2004, 40, p. 1244–1254.
- Paczkowski W.M., Kaszyńska B., *Poliptymalny model produkcji przedsiębiorstwa budowlanego w warunkach gospodarki rynkowej*, 39 KN KILiW PAN i KN PZITB Warszawa-Krynica-Rzeszów, 1993, t.6, s. 169–176.
- Padilla E.M., Carr R.I., *Resource strategies for dynamic project management*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1991, 117(2), p. 279–293.
- Panas A., Pantouvakis J.P., *Simulation-based and statistical analysis of the learning effect in floating caisson construction operations*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2013, 140(1), p. 739–747.
- Pasławski J., *Elastyczność w zarządzaniu realizacją procesów budowlanych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2009.
- Pearson E.S., Tukey J.W., *Approximate means and standard deviations based on distances between percentage points of frequency curves*, "Biometrics", 1965, 52, p. 533–546.
- Pellegrino R., Costantino N., Pietroforte R., Sancilio S., *Construction of multi-storey concrete structures in Italy: patterns of productivity and learning curves*, "Construction Management and Economics", 2012, 30(2), p. 103–115.
- Perry C., Greig I.D., *Estimating the mean and variance of subjective distributions in PERT and decision analysis*, Management Science, 1975, 21(12), p. 1477–1480.
- Peterson J., *Теориясетей Петриимодилированиеисистем*, Москва, Мир, 1984.

- Platt C., *Problemy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*, Warszawa, PWN, 1974.
- Plebankiewicz E., *Construction contractor prequalification from polish clients' perspective*, "Journal of Civil Engineering and Management", 2010, 16(1), p. 57–64.
- PMBOK., *A guide to the project management body of knowledge*, Newtown Square, PA: Project Management Institute Inc., 2004.
- Połośński M., *Algorytm optymalnego wyrównania wykresu zatrudnienia z zastosowaniem grafu*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 2, s. 377–381.
- Połośński M., *Planowanie realizacji inwestycji melioracyjnych w funkcji czasu i środków na podstawie harmonogramów sieciowych*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 1997.
- Połośński M., Pruszyński K., *Impact of baseline terms on the course of critical paths and time buffers in the modified Goldratt's method*, "Archives of Civil Engineering", 2013, 59(3) p. 313–320.
- Połośński M., Pruszyński K., *Probabilistyczne aspekty procesu budowlanego* (cz. 2), „Przegląd Budowlany”, 2006, 12, s. 49–53.
- Pritsker A.A.B., Happ W.W., *GERT – Graphical Evaluation and Review Technique. Part 1, Fundamentals*, "Journal of Industrial Engineering", 1966, 17(5), p. 267–274.
- Pritsker A.A.B., Whitehouse C.E., *GERT – Graphical Evaluation and Review Technique. Part 2, Probabilistic and Industrial Engineering Applications*, "Journal of Industrial Engineering", 1966, 17(6) p. 293–300.
- Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania*, red. Cieślak M., Warszawa, WN PWN, 2005.
- Ranasinghe M., *Impact of correlation and induced correlation on the estimation of project cost of buildings*, "Construction Management and Economics", 2000, 18, p. 395–406.
- Reisig W., *Petri nets. An introduction*, Berlin, Springer-Verlag, 1997.
- Rivas R.A., Borcherdig J.D., González V., Alarcón L.F., *Analysis of factors influencing productivity using craftsmen questionnaires: Case study in a Chilean construction company*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2011, 137(4), p. 312–320.
- Rogalska M., *Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych*, Lublin, Politechnika Lubelska, 2016.
- Rommelfanger H., *FULPAL: An interactive metod for solving (multiobjective) fuzzy linear programming problems*, [In:] Stochastic Versus Fuzzy approaches to Multiobjective Mathematical Programming under Uncertainty, eds. Słowiński R, Teghem J., Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 1990, p. 279–299.
- Ross T.J., *Fuzzy Logic with Engineering Applicatios*, McGraw-Hill Inc., 1995.
- Rowiński L., *Organizacja produkcji budowlanej*, Warszawa, Arkady, 1982.

- Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa-Łódź, WN PWN, 1997.
- Rybalski W.I., *Cybernetyka w produkcji budowlanej*, Warszawa, Arkady, 1970.
- Rybka I., Bondar-Nowakowska E., Połoński M., *The influence of stoppages on productivity during construction of water supply and sewage systems*, "Czasopismo Techniczne", 2014, 2-B (6), p. 309–315
- Rybka I., Bondar-Nowakowska E., *Wpływ zmian regulacji prawnych na realizację budowlanego procesu inwestycyjnego*, „Acta Scientiarum Polonorum, Architectura”, 2017, 16(2), p. 39–45.
- Sadeghi N., Fayek A.R., Ingolfsson A., *Simulation-based approach for estimating project completion time of stochastic resource-constrained project networks*, "Journal of Computing in Civil Engineering", 2012, 26(4), p. 58–560.
- Savage E.L., Schruben L.W., Yücesan E., *On the generality of event-graph models*, "INFORMS Journal on Computing", 2005, 17(1), p. 3–9.
- Sawhney A., Abudayyeh O., Chaitavatputtiporn T., *Modeling and analysis of concrete production plant using Petri nets*, "Journal of Computing in Civil Engineering", 1999, 13(3), p. 178–186.
- Schatteman D., Herroelen W., Van de Vonder S., Boone A., *Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2008, 134(11), p. 885–893.
- Scherer R., Ismail A., *Process-based simulation library for construction project planning*. [In:] Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, eds. Jain S., Creasey R.R., Himmelspach J., White K.P., Fu M., 2011, p. 3488–3499.
- Schruben L. W., *Simulation modeling with event graphs*, "Communications of the ACM", 1983, 26, p. 957–963.
- Sekunda R., *Modelowanie pracy zasobów jednostki wykonawstwa budowlanego w aspekcie zintegrowanej analizy kosztów*, 47 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Opole-Krynica, 2001, t.3, s. 333–340.
- Shahin A., AbouRizk S.M., Mohamed Y., Fernando S., *Simulation modeling of weather-sensitive tunneling construction activities subject to cold weather*, "Canadian Journal of Civil Engineering", 2014, 41, p. 48–55.
- Shankar N.R., Sireesha V., *An approximation for the activity duration distribution, supporting original PERT*, "Applied Mathematical Sciences", 2009, 3(57), p. 2823–2834.
- Shankar N.R., Sireesha V., Rao K.S., Vani N., *Fuzzy critical path method based on metric distance ranking of fuzzy numbers*, "International Journal of Mathematical Analysis", 2010, 4(20), p. 995–1006.
- Shi J.J., *Activity-based construction (ABC) modeling and simulation method*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1999, 125(5), p. 354–360.

- Shi J.J., Halpin D.W., *Enterprise resource planning for construction business management*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2003, 129(2), p. 214–221.
- Singh A., *Resource constrained multi-project scheduling with priority rules and Analytic Hierarchy Process*, "Procedia Engineering", 2014, 69, p. 725–734.
- Sireesha V., Rao K.S., Shankar N.R., Babu S.S., *Critical path analysis in the network with fuzzy interval numbers as activity times*, "International Journal of Engineering Science and Technology", 2012, 4(3), p. 823–832.
- Skorupka D., *Harmonogramowanie robót budowlanych w warunkach niepewności i ryzyka*, 44 KN KILiW PAN i KN PZITB Opole-Krynica, 2002, t.3, s. 349–356.
- Skorupka D., *Identification and initial risk assessment of construction projects in Poland*, "Journal of Management in Engineering", 2008a, 24(3), p. 120–127.
- Skorupka D., *Metoda identyfikacji i oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć budowlanych*, Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2007.
- Skorupka D., *Zarządzanie ryzykiem w przedsięwzięciach budowlanych*, „Zeszyty Naukowe WSOWL”, 2008, 3(149), s. 120–129.
- Smaga J., *Bilansowanie zasobów produkcji budowlanej*, Konferencja Naukowo-Problemowa: Metody projektowania i realizacji budowy w warunkach gospodarki rynkowej, Wrocław-Szklarska Poręba, 1992.
- Sobotka A., Biruk S., Jaśkowski P., *Ewolucja struktur organizacyjnych przedsiębiorstw budowlanych*, „Przegląd Budowlany”, 2000, 9, s. 19–23.
- Sobotka A., *Wrażliwość decyzji logistycznych w przedsiębiorstwie budowlanym*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2000.
- Song L., Al-Battaineh H.Y., AbouRizk S.M., *Modeling uncertainty with an integrated simulation system*, "Canadian Journal of Civil Engineering", 2005, 32, p. 533–542.
- Sriprasert E., Dawood N.N., *Multi-constraint information management and visualisation for collaborative planning and control in construction*, "Electronic Journal of Information Technology in Construction", 2003, 8, p. 341–366.
- Sullivan R. S., Hayya J., C., Schaul R., *Efficiency of the antithetic variate method for simulating stochastic networks*, "Management Science", 1982, 28(5), p. 573–572.
- Taguchi G., *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*, Asian Productivity Organization, 1986.
- Tang P., Mukherjee A., *Construction schedule simulation for improved projectplanning: activity criticality index assessment*, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 2013, p. 3237–3248.
- Taroun A., Yang J. B., Lowe D., *Construction risk modeling and assessment: insights from a literature review*, "Journal of the Built & Human Environment", 2011, 4, (1), p. 87–97.

- Tezuka S., *Uniform Random Numbers, Theory and Practice*, IBM Japan, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Thabet W. Y., Beliveau Y. J., *Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1994a, 120(1), p. 96–116.
- Thabet W.Y., Beliveau Y. J., *HVLS: Horizontal and vertical logic scheduling for multistory projects*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1994, 120(4), p. 875–892.
- Thomas H. R., Yiakoumis I., *Factor model of construction productivity*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1987, 113(4), p. 623–637.
- Toor S.U.R., Ogunlana S.O., *Problems causing delays in major construction projects in Thailand*, "Construction Management and Economics", 2008, 26, p. 395–408.
- Touran A.T., *Probabilistic cost estimation with subjective correlations*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1993, 119(1), p. 58–71.
- Touran A.T., Wiser E.P., *Monte Carlo technique with correlated random variables*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1992, 118(2), p. 258–72.
- Tyszer J., *Symulacja cyfrowa*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1990.
- Van de Vonder S., Demeulemeester E., Leus R., Herroelen W., *The use buffers in project management: The trade-off between stability and makespan*, "International Journal of Production Economics", 2005, 97(2), p. 227–240.
- van Dorp J.R., Duffey M.R., *Statistical dependence in risk analysis for project networks using Monte Carlo methods*, "International Journal of Production Economics", 1999, 58, p. 17–29.
- van Dorp J.R., *Statistical dependence through common risk factors: With applications in uncertainty analysis*, "European Journal of Operational Research", 2005, 161, p. 240–255.
- Van Slyke, R.M., *Monte Carlo methods and the PERT problem*, "Operations Research", 1963, 11(5), 839–860.
- Vanhoucke M., *Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance*, "Omega", 2010, 38(5), p. 359–370.
- Venter G.G., *Tails of copulas*, "Proceedings of the Casualty Actuarial Society", 2002, Volume 89, p. 68–113.
- Vidalakis C., Tookey J.E., Sommerville J., *Logistics simulation modelling across construction supply chains*, "Construction Innovation: Information, Process, Management", 2011, 11 (2), p. 212– 228.
- Vose D., *Risk analysis: A quantitative guide*, John Wiley and Sons Inc, 2008.
- Wakefield R. R., Sears G. A., *Petri nets for simulation and modeling of construction systems*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1997, 123(2), p. 105–112.

- Wall D.M., *Distributions and correlations in Monte Carlo simulation*, "Construction Management and Economics", 1997, 15, p. 241–58.
- Wang W.C., Demsetz L.A., *Model for evaluating networks under correlated uncertainty – NETCOR*, "Journal of Construction Engineering and Management", 2006, 126(6), p. 458–466.
- Whitehouse G.E., *Systems analysis and design using network techniques*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1973.
- Więckowski A., *The NNM Method (Numerical Network Modelling)*, "Archives of Civil Engineering", 2000, 16(1), p. 207–224.
- Williams T.M., *Practical use of distributions in network analysis*, "Journal of the Operational Research Society", 1992, 43(3), p. 265–270.
- Williams, T.M., *Criticality in stochastic networks*, "The Journal of the Operational Research Society", 1992a, 43(4), p. 353–357.
- Winkler A., Sławecki J., *Symulacyjne modelowanie planu przedsiębiorstwa budowlanego w warunkach ograniczonego potencjału wykonawczego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo”, 1988, 68, s. 315–320.
- Wiorkowski J.J., *Some one parameter models for continuous random variables defined on the interval [0, 1]*, "Applied Mathematics", 2013, 4, p. 604–613.
- Woolery J.C., Crandall, K. C., *Stochastic network model for planning scheduling*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1983, 109(3), p. 342–354.
- Wright T.P., *Factors affecting the cost of airplanes*, "Journal of the Aeronautical Sciences", 1936, 3(4), p. 122–128.
- Yamada K., *Probability-possibility transformation based on evidence theory*, Proceedings of the IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, Canada, 2001, p. 70–75.
- Yang H., *Quasi random sampling for operations management*, "Seoul Journal of Business", 2006a, 12(1), p. 53–72.
- Yang I.T., *Risk modeling of dependence among project task durations*, "Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering", 2007, 22, p. 419–429.
- Yang I.T., *Using Gaussian copula to simulate repetitive projects*, "Construction Management and Economics", 2006, 24(9), p. 901–909.
- Yates J.K., *Construction decision support system for delay analysis*, "Journal of Construction Engineering and Management", 1993, 119(2), p. 226–244.
- Yücesan E., Schruben L.W., *Structural and behavioral equivalence of simulation models*, "ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation", 1992, 2, p. 82–103.
- Zadeh L.A., *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*, "Fuzzy Sets and System", 1978, 1, p. 3–28.
- Zadeh L.A., *Fuzzy sets*, "Information and Control", 1965, 8, p. 338–353.
- Zadeh, L.A., *Fuzzy logic = computing with words*, "IEEE Transactions on Fuzzy Systems", 1996, 4 (2), p. 103–111.

- Zammori F.A., Briaglia M., Frosolini M., *A fuzzy multi-criteria approach for critical path definition*, "International Journal of Project Management", 2009, 27(3), p. 278–291.
- Zayed T., Mohamed D., Srouf F., Tabra W., *Assessing time contingency of construction projects using simulation-based Analytic Hierarchy Process*, "International Journal of Architecture, Engineering and Construction", 2013, 2(4), p. 259–270.
- Zdanowicz R., *Dobór oprogramowania do modelowania i symulacji procesów wytwarzania*, „Pomiary, Automatyka, Robotyka”, 2006, 1, s. 10–17.
- Zoła M., *Zarządzanie czasem w projekcie z uwzględnieniem ryzyka*, „Organizacja i Zarządzanie, Kwartalnik Naukowy”, 2014, 2(26), s. 153–166.
- Zou P., Zhang G., Wang J., *Understanding the key risks in construction projects in China*, "International Journal of Project Management", 2007, 25, p. 601–614.

Streszczenie

Większość dotychczasowych prac badawczych z zakresu harmonogramowania produkcji budowlanej koncentrowała się na optymalizacji projektu realizacji pojedynczego przedsięwzięcia budowlanego, a pomijano zagadnienie planowania pełnego zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego w ujęciu holistycznym. Zwykle zakładano pełną znajomość zakresu i czasu wykonania robót realizowanych na wszystkich placach budów. W dynamicznie zmiennych warunkach działalności takie założenia są dużym uproszczeniem. Ponadto opracowanie optymalnego harmonogramu pojedynczego przedsięwzięcia może powodować trudności w realizacji innych zleceń i prowadzić do nieefektywnego wykorzystania odnawialnych zasobów własnych przedsiębiorstwa budowlanego. Jest to szczególnie niekorzystne przy wysokich kosztach pracy i w przypadku trudności w pozyskiwaniu kwalifikowanych pracowników lub ograniczonej dostępności sprzętu budowlanego. Konieczność dostosowania potencjału wykonawczego przedsiębiorstwa budowlanego do warunków rynkowych oraz deficyt metod alokacji zasobów w skali całej organizacji były głównymi powodami powstania niniejszej rozprawy.

W rozprawie przedstawiono autorską metodykę planowania realizacji zbioru zleceń przedsiębiorstwa budowlanego, która obejmuje metody planowania zasobów odnawialnych na poziomie strategicznym, ustalania terminów dyrektywnych na określonym przez decydenta poziomie niezawodności (wspomaganie decyzji o charakterze taktycznym) oraz planowania operatywnego zasobami odnawialnymi. Ze względu na złożone relacje między elementami struktury przedsiębiorstwa budowlanego oraz losowy charakter zbioru zleceń i procesów opracowano model symulacyjny umożliwiający ocenę wpływu poziomu zasobów własnych przedsiębiorstwa na czasy realizacji poszczególnych przedsięwzięć.

Przedstawiono badania symulacyjne planu produkcyjnego wykorzystujące dane pochodzące z jednego z lubelskich przedsiębiorstw prowadzących działalność deweloperską. Opracowano też komputerowy system zarządzania zasobami odnawialnymi jako narzędzie wspomaganie pracy inżynierów-organizatorów. W pracy przedstawiono przykłady harmonogramowania procesów budowlanych z wykorzystaniem zaimplementowanych reguł alokacji zasobów odnawialnych w warunkach ryzyka.

Opracowany model symulacyjny realizacji zbioru zleceń nie wyczerpuje wszystkich ograniczeń realizacyjnych. Dalsze prace powinny obejmować doskonalenie reguł alokacji zasobów zapewniających wysoki stopień harmonizacji ich pracy oraz metod prognozowania zbioru zleceń, a także zwiększenie dokładności przewidywania czasu realizacji procesów budowlanych. System zarządzania operatywnego zasobami odnawialnymi, po wykonaniu testów i przeszkoleniu kadry inżynierskiej powinien być wdrożony w przedsiębiorstwach budowlanych.

Abstract

Most research on construction scheduling has been focused on streamlining the workflow and optimizing resource allocation of an individual project. However, projects are not conducted in abstraction from other activities of the contractor, who needs to manage whole portfolios of projects. Typical scheduling approaches rested upon many assumptions, like a fully defined scope and duration of works at each construction site, but in the dynamically changing environment of the construction business such assumptions are a far going simplification. Moreover, the decision to optimize the plan of a particular project is likely to put extra constraints on other projects and negatively affect in-house resource utilization rates. If labour costs are high, skilled workforce or plant is in short supply, or specialty subcontractors are not easily available, this problem becomes serious.

The rationale for this research was provided, first, by recent reduction of the construction labour supply, and second, by the lack of resource allocation methods efficient enough to serve the whole construction organization, and not a single project.

The book presents an original methodology for scheduling construction project portfolios. It covers:

- strategic resource planning (so defining rational resource employment levels according to the expected future workload)
- at a tactical level, assessing project duration with a desired reliability to define contractual completion dates that are achievable and reasonable in terms of economic resource utilization,
- allocating resources at operational level.

As the contractor's project portfolio is randomly fed with new projects, and the relations between the elements of the construction organization are complex, a simulation model was developed to help the planner assess the effect of in-house employment levels on duration of each project. To illustrate the idea, the author presents a contractor's production plan simulated on the basis of real-life data provided by a developer operating in a local market.

A computer application of the method was developed to facilitate resource management. The author presents a number of examples to explain its operation – the effect of the resource allocation rules on the schedules of works in risky environment.

Naturally, the proposed simulation model for project portfolio scheduling and resource management does not account for all possible constraints. Its further development should focus on improving resource allocation rules to increase harmonization of works, as well as to considering more factors in forecasting future workload with new projects and estimating duration of construction processes. The system of operational-level resource management, after thorough testing and training the engineering staff, should be implemented in construction organizations.