

Dr inż. Piotr Jaśkowski

Faculty of Civil Engineering and Architecture
Lublin University of Technology
Nadbystrzycka str. 40, 20-816 Lublin, Poland
E-mail: p.jaskowski@pollub.pl

Metodyka zwiększenia niezawodności predyktywnych harmonogramów realizacji przedsięwzięć budowlanych

Methodology for enhancing reliability of predictive project schedules in construction

Słowa kluczowe: niezawodność projektu realizacji, harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych, realizacja i eksploatacja obiektów, odporność na zakłócenia realizacyjne, analiza i ocena ryzyka czasu, alokacja buforów czasu

Streszczenie: Przedsięwzięcia budowlane obejmują swym zakresem procesy związane z wznoszeniem nowych obiektów, jak i utrzymaniem istniejących zasobów. Inżynieria niezawodności w budownictwie obejmuje wszystkie fazy cyklu życia obiektu budowlanego, od przygotowania koncepcyjnego po jego likwidację. Na etapie planowania i projektowania jest dokonywany dobór rozwiązań technicznych i organizacyjnych, które zapewnią spełnienie wymagań stawianych przez inwestora i użytkownika, w tym również w odniesieniu do fazy realizacji obiektu. Rezultatem projektowania przebiegu realizacji przedsięwzięcia powinien być niezawodny harmonogram o wysokim prawdopodobieństwie dotrzymania zaplanowanych terminów i małej wrażliwości na wpływ zjawisk losowych. W artykule zaprezentowano proaktywne podejście metodyczne do projektowania predyktywnych harmonogramów realizacji przedsięwzięć budowlanych, w celu zwiększenia ich niezawodności. Obejmuje ono dwa zasadnicze etapy: ocenę ryzyka czasu realizacji procesów budowlanych w oparciu o wieloatrybutową ocenę warunków realizacyjnych oraz alokację buforów czasu w harmonogramie. Opracowano oryginalną metodykę wspomagającą podejmowanie decyzji na każdym etapie tej procedury, tj. metodykę oceny poziomu ryzyka czasu realizacji procesów, określania istotności warunków realizacyjnych, dyspersji czasu realizacji procesów budowlanych i krytyczności procesów w harmonogramowaniu predyktywnym. Zaproponowano zestaw mierników odporności harmonogramu, stanowiących zastępcze kryteria w problemie minimalizacji kosztu niestabilności i określania wielkości buforów czasu. Proponowane ujęcie uwzględnienia warunków ryzyka w harmonogramach predyktywnych zwiększa ich niezawodność i zapobiega dezaktualizacji terminu końcowego oraz terminów realizacji poszczególnych procesów lub etapów przedsięwzięcia.

1. Wprowadzenie

Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych, związanych ze wznoszeniem nowych obiektów budowlanych, jak i eksploatacją istniejących zasobów budowlanych (remonty, przebudowy, nadbudowy, rozbudowy), jest i było przedmiotem badań w wielu ośrodkach zagranicznych, a także w Polsce, m.in. [1, 3–5, 7, 10, 14, 16–18, 20, 22, 24, 26, 28–30]. 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).

Realizacja przedsięwzięcia odbywa się często w warunkach ryzyka, negatywnie oddziałującego na terminowość realizacji [8, 11, 14, 16–18, 21, 24, 26–27]. Dążenie do ograniczenia skutków zjawisk losowych przyczyniło się do rozwoju metod odpornych (ang. *robust*) w statystyce i w badaniach operacyjnych [2], mających zastosowania w wielu dziedzinach gospodarki. W zarządzaniu przedsięwzięciami należy do nich harmonogramowanie predyktywne (ang. *predictive scheduling*) z podejściem proaktywnym [29], w którym jest opracowywany harmonogram odporny na zakłócenia (ang. *robust schedule*). Podejście to jest oceniane w literaturze przedmiotu jako bardziej efektywne od postępowania reaktywnego, polegającego na aktualizacji harmonogramów, gdy w trakcie realizacji wystąpią zakłócenia wymagające zmian wcześniej sporządzonych planów.

Odporność harmonogramu na zakłócenia należy rozumieć jako zdolność do przeciwdziałania skutkom nieznaczących wydłużeń czasów wykonania procesów, które mogą być spowodowane przez czynniki ryzyka [1]. Stosowane są dwa podejścia optymalizacyjne [28], których celem nadrzędnym jest zwiększenie:

- odporności jakości harmonogramu (ang. *quality robustness*) – podejście, w którym kluczowym zadaniem jest dotrzymanie planowanego terminu zakończenia realizacji przedsięwzięcia (ang. *stability of makespan*);
- odporności harmonogramu (ang. *solution robustness*) – podejście, w którym dąży się do wykonania procesów zgodnie z planem; antycypacja zaburzeń produkcyjnych ma doprowadzić do minimalizacji odchyłeń rzeczywistych terminów rozpoczęcia zadań od ustalonych w harmonogramie.

Oba podejścia prowadzą do zwiększenia niezawodności harmonogramu, rozumianej jako prawdopodobieństwo spełnienia przez harmonogram stawianych mu wymagań w zakresie poprawności ustaleń terminów realizacji procesów (terminu zakończenia przedsięwzięcia i terminów realizacji poszczególnych procesów).

Większość istniejących metod planowania wykorzystywanych w budownictwie, w których czasy trwania procesów budowlanych są zmiennymi losowymi, koncentrują się najczęściej jedynie na określeniu terminu zakończenia realizacji przedsięwzięcia z zadaniem prawdopodobieństwem jego nieprzekroczenia [14, 20], w mniejszym stopniu na zagadnieniu tworzenia harmonogramu z dyrektywnymi terminami rozpoczęcia procesów. Analiza modelu sieciowego w funkcji czasu dostarcza zwykle informacji o charakterze probabilistycznym, co utrudnia planowanie produkcji pomocniczej i obsługi logistycznej. Dużym utrudnieniem może być również konieczność określania rozkładów prawdopodobieństwa czasu wykonania procesów.

Większość opracowanych metod (*PERT* – ang. *Program Evaluation and Review Technique*), *PNET* (ang. *Probabilistic Network Evaluation Technique*), *NRB* (ang. *Narrow Reliability Bounds method*) zakłada również niezależność zmiennych losowych czasów wykonania procesów. Dawood [6] opracował metodę umożliwiającą modelowanie zależności i zwiększenie dokładności oszacowań czasu realizacji przedsięwzięć, stosując podejście modelowania symulacyjnego. Zarówno przy modelowaniu czynników ryzyka czasu, jak ich wpływu na czas realizacji procesów, jest wykorzystywana wiedza ekspertów i dane historyczne. Badania symulacyjne umożliwiają wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji przedsięwzięcia (a także poszczególnych procesów) oraz określenie wpływu poszczególnych czynników ryzyka na przebieg jego wykonania. Możliwość praktycznego zastosowania opracowanej przez Dawooda metody jest ograniczone m.in. ze względu na konieczność posiadania dużego doświadczenia i wiedzy przy doborze typów i parametrów zmiennych losowych dla poszczególnych czynników, subiektywność dokonywanych ustaleń przy modelowaniu czynników ryzyka i ich wpływu na czas realizacji procesów, możliwość popełnienia błędów w tym zakresie, korzystanie z danych

historycznych, które są gromadzone w przedsiębiorstwach wykonawczych w ograniczonym zakresie.

Nasir i in. [19] opracowali metodę wspomagającą oszacowanie pesymistycznego i optymistycznego czasu realizacji procesów przy zastosowaniu modelu sieci przekonań. Wartości te można wykorzystać do analizy ryzyka czasu przedsięwzięcia z zastosowaniem metody *PERT* lub symulacji *Monte Carlo*. Procedura tworzenia sieci przekonań obejmuje cztery etapy wspomagane opiniami ekspertów: identyfikacja czynników ryzyka, ustalenie zależności między czynnikami oraz określenie struktury sieci oraz oszacowanie prawdopodobieństw warunkowych ryzyk. Pozyskiwanie danych i określenie struktury sieci w prezentowanym przykładzie trwało sześć tygodni, co ogranicza możliwość praktycznego stosowania metody.

Skorupka [26] 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. Ryzyko dla poszczególnych czynników 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 i mogą 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. Dużą zaletą metody *MOCRA* jest jej łatwość stosowania, co może zachęcić zespoły planujące realizację przedsięwzięć do jej wdrożenia w praktyce.

Schatteman i in. [25] 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 alokacji buforów czasu i tworzenia harmonogramów odpornych na zakłócenia (dla których koszty niestabilności są minimalne). Dokładność uzyskiwanych wyników w metodzie Schattemana 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.

Podjęmowane próby wykorzystania wyników analizy ryzyka w harmonogramowaniu mają na celu zwiększenie niezawodności harmonogramów.

Dążenie do zapewnienia odporności harmonogramów budowlanych na zakłócenia losowe wynika z następujących powodów:

1. Zawieranie kontraktów z podwykonawcami wymaga wcześniejszej akceptacji inwestora i ustaleń terminów ich zatrudnienia.
2. Racjonalna gospodarka zasobami przedsiębiorstwa wymaga dysponowania planami ich pracy lub zapotrzebowania oraz – w przypadku wyrobów na zamówienie – synchronizacji ustalonych terminów ich wbudowania i produkcji.
3. Za opóźnienia w realizacji poszczególnych etapów i całego przedsięwzięcia wykonawca coraz częściej płaci kary umowne.

Powyższe spostrzeżenia zainicjowały podjęcie tematu oraz próbę opracowania oryginalnej metodyki harmonogramowania robót budowlanych z uwzględnieniem zjawiska ryzyka czasu.

2. Propozycja metodyki predyktywnego harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych

Proponowana metodyka predyktywnego harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych stanowi próbę implementacji koncepcji zarządzania ryzykiem w budownictwie.

W literaturze przedmiotu są prezentowane różne definicje pojęcia ryzyka [23]. Według Williamsa i Heinsa [31] ryzyko jest związane ze zmiennością rezultatów i powiązane z rozkładem prawdopodobieństwa wystąpienia wszystkich wyników.

Żadne przedsięwzięcie budowlane nie jest pozbawione ryzyka. Ryzykiem należy zarządzać – można je minimalizować, współdzielić, transferować lub akceptować. Ryzyko nie może być jednak ignorowane [27]. Podejść definiujących etapy procesu zarządzania ryzykiem jest wiele. W większości ujęć, zarządzanie ryzykiem obejmuje oprócz identyfikacji źródeł ryzyka, analizy i oceny ryzyka, także projektowanie i wdrażanie środków zmniejszających prawdopodobieństwo wystąpienia i siłę oddziaływania niekorzystnych zdarzeń. Zgodnie z podejściem proaktywnym działania takie należy podejmować już na etapie tworzenia harmonogramu (np. poprzez alokację buforów czasu).

Zaproponowana w artykule metodyka harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych obejmuje dwa główne sprzężone etapy:

- ocenę ryzyka czasu realizacji procesów,
- alokację buforów czasu w harmonogramie.

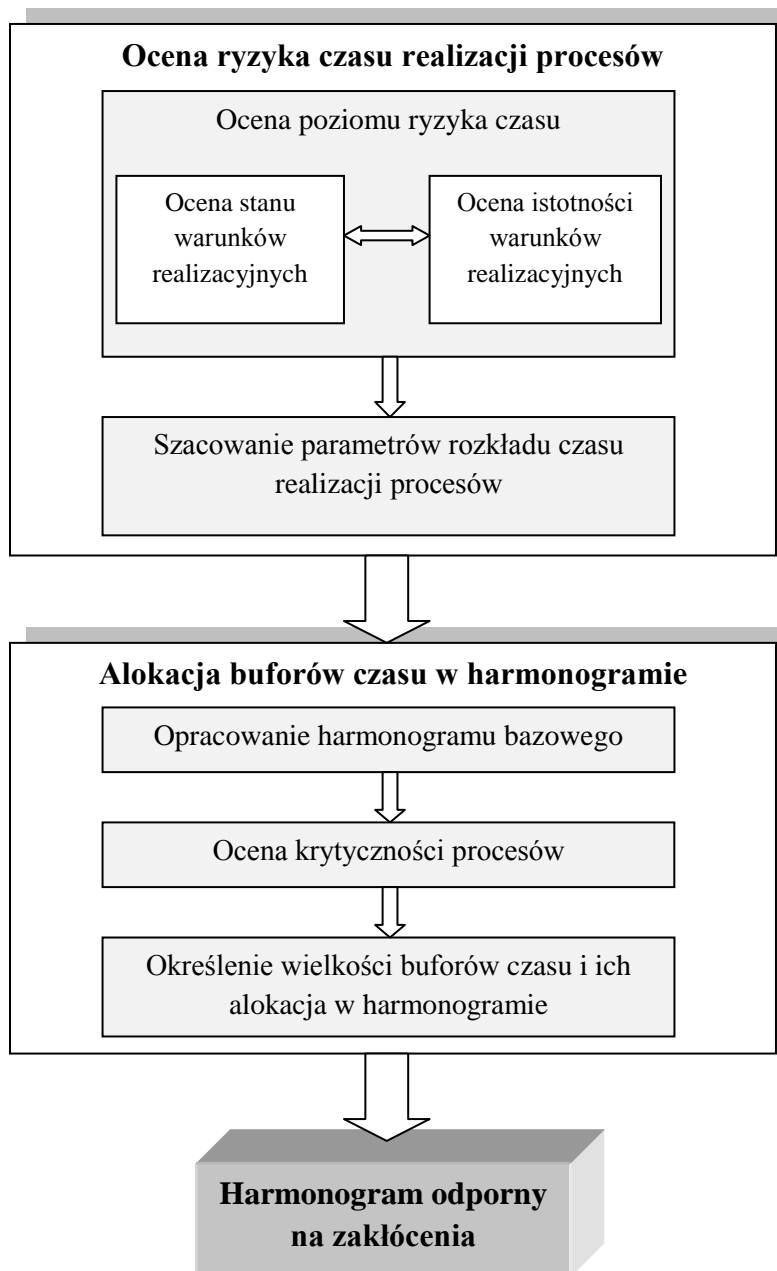
Ogólny schemat procedury przedstawiono na Rys. 1. Dla każdego wyszczególnionego na rysunku 1 etapu i podetapu opracowano metodykę wspomagającą podejmowanie decyzji.

Celem oceny ryzyka czasu procesów jest ustalenie profilu ryzyka, opisanego w sposób jednoznaczny przez funkcję gęstości rozkładu czasu ich realizacji. Pierwszy ze wskazanych etapów proponowanej metodyki jest zatem bardzo istotny, ponieważ determinuje dalsze działania i nakłady związane z zabezpieczeniem przed oszacowanymi skutkami oddziaływania źródeł ryzyka na czas realizacji procesów budowlanych.

Podstawą oceny ryzyka czasu – w tradycyjnym podejściu do zarządzania ryzykiem – jest identyfikacja i analiza źródeł ryzyka czasu, określanych mianem czynników ryzyka. Dostęp do danych o rzeczywistych rozkładach prawdopodobieństw oddziaływania czynników ryzyka na czas realizacji procesów jest ograniczony i trudny. Wymusza to konieczność korzystania z informacji i ocen subiektywnych jak: wiedza, doświadczenie, intuicja ekspertów.

W celu identyfikacji najważniejszych czynników ryzyka, które mogą wpływać na terminowość realizacji procesów budowlanych w warunkach polskich, przeprowadzono własne badania ankietowe [13].

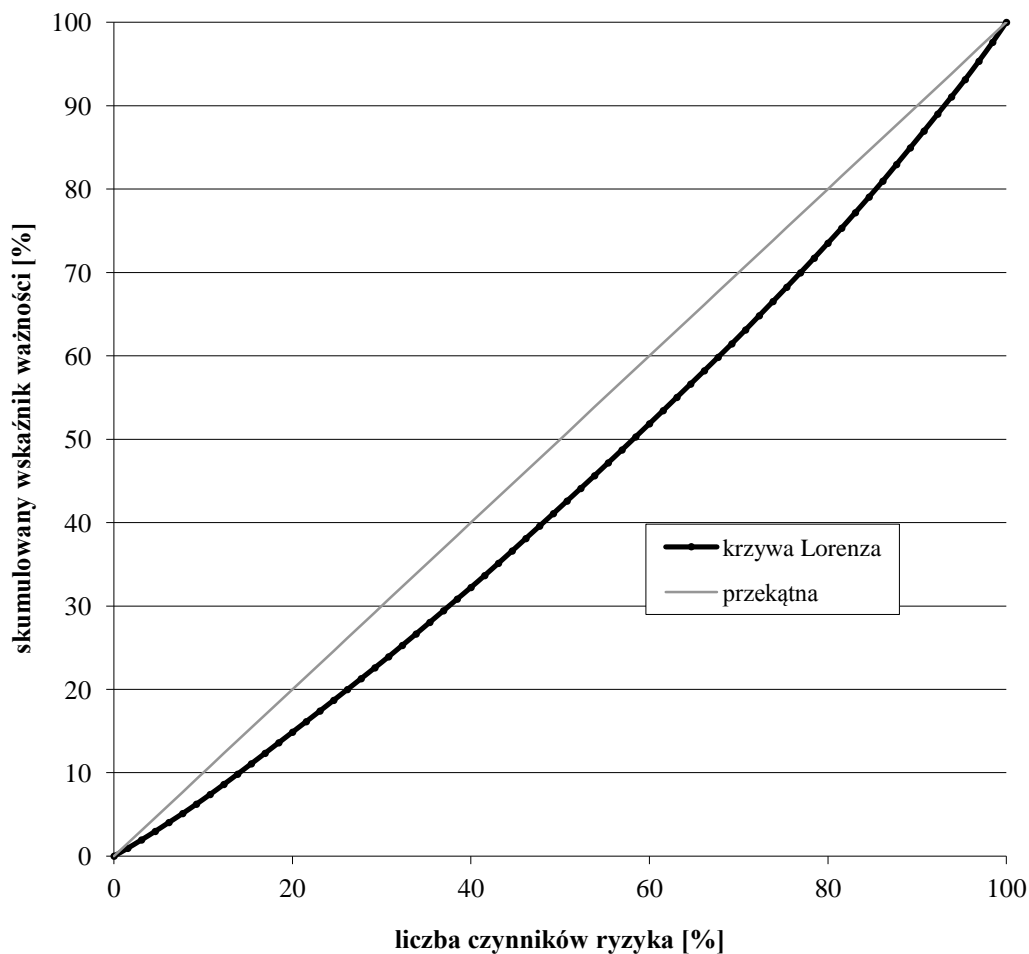
Na podstawie badań literaturowych oraz wywiadów bezpośrednich z różnymi uczestnikami procesu inwestycyjnego w budownictwie zidentyfikowano zestaw 63 czynników ryzyka. Łącznie pozyskano 91 poprawnie wypełnionych kwestionariuszy. Próbę badawczą stanowili przede wszystkim pracownicy przedsiębiorstw budowlanych z terenu województwa lubelskiego, którzy oceniali w pięciostopniowej skali punktowej (od 1 do 5) częstość występowania i siłę oddziaływania czynników ryzyka na czas realizacji procesów budowlanych. Liczba wypełnionych ankiet była większa od minimalnej wymaganej liczebności próby wynoszącej 83 ankiety, określonej zgodnie z zasadami statystyki matematycznej (dla maksymalnego błędu wartości wynoszącego 3% i dla przedziału ufności 90%).



Rys. 1. Etapy predyktywnego harmonogramowania przedsięwzięcia budowlanego (proponowana metodyka)

Dla każdego czynnika obliczono wskaźnik ważności jako iloczyn siły jego oddziaływania na terminowość realizacji procesów i częstości występowania. Zidentyfikowane najważniejsze czynniki ryzyka to m.in.: realizacja robót w okresie zimowym (średnia wartość wskaźnika ważności 11,89), opady atmosferyczne (11,29), nieterminowe przekazywanie frontów robót (10,91), trudność w pozyskiwaniu kwalifikowanych robotników (10,33), błędy i brak właściwej precyzji ustaleń dokumentacji technicznej (10,20), opóźnienia inwestora w podejmowaniu decyzji (10,13), rozszerzenie zakresu/ilości robót na skutek zmian projektowych (10,01), niemotywacyjny system płac (9,91), zmiany wymagań inwestora (9,89), trudność w pozyskaniu specjalizowanych brygad/podwykonawców (9,49) i in. Wszystkie czynniki uszeregowano według średniej wartości wskaźnika ważności od najmniej

do najbardziej istotnego. Wykres skumulowanej wartości wskaźnika ważności dla takiego uszeregowania czynników (krzywa Lorenza) przedstawiono na Rys. 2 [13].



Rys. 2. Krzywa Lorenza sporządzona dla średnich wartości wskaźnika ważności czynników ryzyka (wyniki badań ankietowych) [13]

Niewielkie odchylenie krzywej Lorenza od przekątnej świadczy o niewielkiej koncentracji ważności czynników (wartość współczynnika Giniego jest równy 0,116). Nie istnieje zatem niewielka liczebnie grupa czynników ryzyka o znaczącym wpływie na czas realizacji procesów. Ocena ryzyka czasu nie może być zatem ograniczona tylko do analizy oddziaływania najważniejszych czynników z pominięciem najmniej istotnych.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań ankietowych wykazała, że doświadczenia zawodowe osób ankietowanych różnią się (niskie wartości współczynnika konkordancji W Kendalla: 0,238 – w przypadku oceny siły oddziaływania, 0,236 – częstotliwości świadczą o niskim poziomie zgodności opinii ankietowanych). Zatem nie należy przyjmować jednakowej ważności czynników ryzyka (siły oddziaływania i częstotliwości występowania) przy analizie różnych przedsięwzięć.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione ograniczenia wady tradycyjnego podejścia do identyfikacji i analizy źródeł ryzyka czasu, w opracowanej metodyce zaproponowano przeprowadzenie oceny ryzyka czasu procesów w oparciu o wieloatrybutową ocenę stanu warunków realizacyjnych.

3. Metodyka oceny ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych

Metodyka oceny ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych obejmuje: ocenę stanu warunków realizacji procesów budowlanych, ocenę istotności warunków realizacyjnych i poziomu ryzyka czasu oraz oszacowanie parametrów rozkładu czasu realizacji procesów budowlanych.

3.1. Ocena stanu warunków realizacyjnych i poziomu ryzyka czasu

Zakres oddziaływania poszczególnych czynników ryzyka, których analiza jest podstawą oceny ryzyka czasu w wielu pracach [6, 25, 26], jest różny i jest niejednakowy dla różnych budów, ponieważ zależy od rzeczywistych warunków realizacyjnych oraz od określonej sytuacji decyzyjnej [14].

Całokształt uwarunkowań realizacyjnych, opisany zespołem cech, zjawisk, procesów kształtujących przebieg wykonania przedsięwzięcia, jest determinowany stanem otoczenia i wnętrza organizacji realizującej przedsięwzięcie.

Stan tych uwarunkowań może mieć istotny wpływ na realizację przedsięwzięć budowlanych [17]. Na przykład niekorzystna pora roku, w której są realizowane procesy, determinuje możliwość przerwania robót ze względu na złe warunki atmosferyczne (niska temperatura, opady itp.) silnie oddziałujące na przebieg i wydajność pracy. Na wydajność produkcji wpływa również stan wyposażenia technicznego; dysponowanie maszynami o złym stanie technicznym – ze względu na większe prawdopodobieństwo awarii – może być powodem opóźnień w realizacji.

Biorąc pod uwagę fakt, że częstość występowania oraz siła oddziaływania czynników ryzyka na czas realizacji procesów budowlanych zależy od – charakterystycznych dla danego przedsięwzięcia, wykonawcy oraz lokalizacji – warunków realizacyjnych, opracowano metodykę oceny poziomu ryzyka czasu realizacji przedsięwzięcia z uwzględnieniem stanu tych warunków [11, 13].

W tabeli 1 zestawiono 10 warunków realizacyjnych, wyłonionych na podstawie studiów literaturowych i bezpośrednich wywiadów z ekspertami i pracownikami przedsiębiorstw budowlanych.

Tabela 1. Warunki realizacji oddziałujące na poziom ryzyka czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych [11, 13]

Lp.	Warunek realizacyjny
1	Przewidywany okres realizacji (pora roku)
2	Stan zasobów ludzkich własnych i kooperantów (doświadczenie i dostępność)
3	Kompletność i jakość dokumentacji technicznej i technologiczno-organizacyjnej
4	Jakość systemu zarządzania przedsięwzięciem i budową
5	Warunki płacy i pracy
6	Kondycja finansowa inwestora, wykonawcy, warunki finansowania
7	Jakość systemu logistycznego zaopatrzenia
8	Warunki lokalizacyjno-przestrzenne placu budowy
9	Warunki otoczenia zewnętrznego (ekonomiczne, polityczne, prawne, geograficzne, rynek pracy, dostawcy, kooperanci)
10	Stan wyposażenia w maszyny i urządzenia techniczne (jakość i dostępność)

Analiza i ocena stanu warunków realizacyjnych stanowi podstawę oceny ryzyka czasu realizacji procesów budowlanych w proponowanej metodyce. Przyjęto, że stan każdego warunku realizacyjnego będzie oceniany punktowo przy zastosowaniu skali pięciostopniowej (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1). Ocena 0 oznacza stan wzorcowy (bardzo korzystne oddziaływanie na

przebieg realizacji, przyczyniające się do skrócenia realizacji procesu), ocena 0,5 – stan przeciętny (gwarantujący dotrzymanie norm pracochłonności), a ocena 1 – stan szczególnie niekorzystny (przyczyniający się do wydłużenia czasu realizacji). Pozostałe oceny należy stosować w przypadku stanów pośrednich.

Ocena stanu i istotności poszczególnych warunków realizacyjnych może być przeprowadzana dla grup procesów budowlanych, wyróżnionych ze względu na zbliżoną podatność przebiegu ich wykonania na oddziaływanie tych warunków.

Proces oceny stanu warunków realizacyjnych powinien być jak najbardziej obiektywny. W tym celu proponuje się udział w ocenie grupy specjalistów i zastosowanie metod wspomagających podejmowanie decyzji grupowych, m.in. metody Delphi.

Ponieważ liczba warunków realizacyjnych dla każdej grupy procesów jest znaczna zaproponowano ocenę zagregowaną PC stanu tych warunków w postaci następującej formuły:

$$PC = \sum_{i=1}^n pc_i \cdot w_i, \quad (1)$$

gdzie:

PC – ocena zagregowana stanu warunków realizacyjnych,

pc_i – ocena stanu warunku i ,

w_i – waga warunku i ,

n – liczba warunków realizacyjnych ($n=10$).

Ocena zagregowana warunków realizacyjnych stanowi miernik opisujący poziom ryzyka czasu realizacji procesów. Dokonane w taki sposób oszacowania ujmują całokształt uwarunkowań realizacyjnych oraz pozwalają na uwzględnienie znacznego skumulowanego wpływu czynników drugorzędnych.

3.2. Ocena istotności warunków realizacyjnych

O istotności poszczególnych warunków realizacyjnych w ocenie poziomu ryzyka czasu świadczą wartości przypisanych im wag. Wartości wag wszystkich warunków można ustalić za pomocą metody *AHP* (analityczny proces hierarchiczny). Metoda *AHP* nie umożliwi jednak w sposób bezpośredni uwzględnienia warunków ryzyka związanego z niepełnym dostępem do danych, subiektywizmem ocen i rozbieżnością opinii ekspertów. Dlatego zaproponowano rozmyte rozwinięcie tej metody do wspomagania decyzji grupowych [9].

W proponowanej metodyce przyjęto, że w procesie decyzyjnym uczestniczy K ekspertów. Każdy z nich dokonuje $m = n(n-1)/2$ porównań parami istotności warunków realizacyjnych, stosując skalę 1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1, 3, 5, 7, 9 rozszerzoną ewentualnie o oceny pośrednie 1/8, 1/6, 1/4, 1/2, 2, 4, 6, 8.

W wyniku operacji porównywania parami powstaje zbiór zawierający K macierzy $\mathbf{A}_k = \{a_{ijk}\}$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, $j = 2, 3, \dots, n$, $j > i$, $k = 1, 2, \dots, K$, gdzie a_{ijk} oznacza ocenę preferencji warunku i względem j (czyli iloraz wag warunków i i j), wyrażoną w przyjętej skali ocen i dokonaną przez eksperta k .

Celem zastosowania proponowanej metody jest określenie wektora ostrych wartości wag poszczególnych warunków realizacji $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ na podstawie wcześniej dokonanych porównań przez ekspertów.

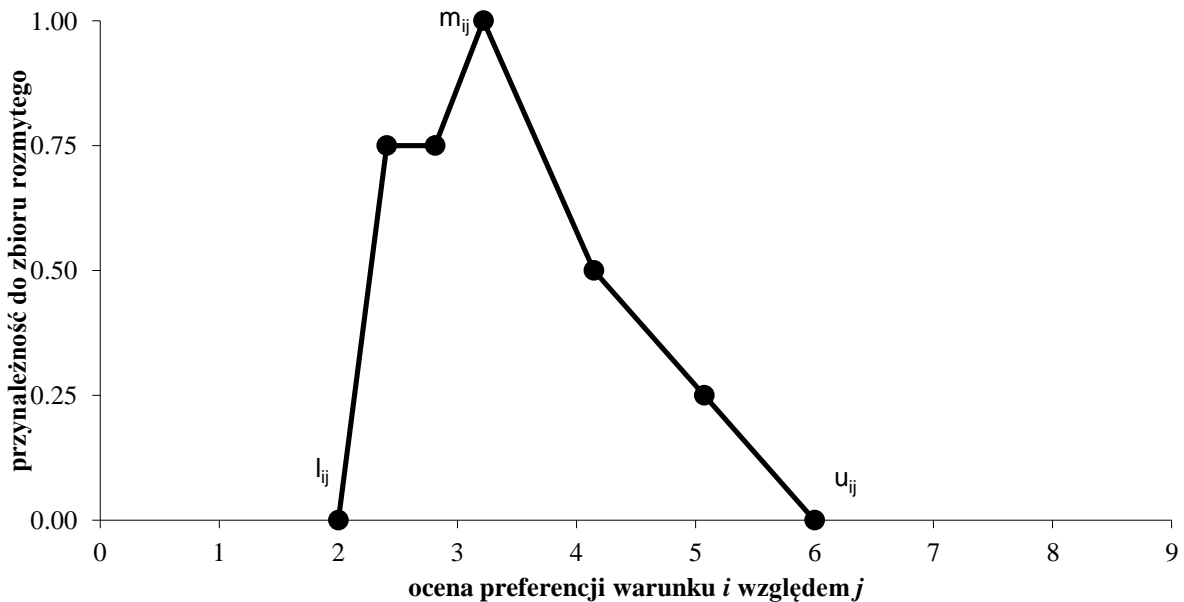
Oceny względnych preferencji warunków zagregowane dla wszystkich ekspertów są wyrażane w postaci liczb rozmytych \tilde{a}_{ij} o funkcjach przynależności $\mu_{\tilde{a}_{ij}}(x) \in [0, 1]$, których punkty charakterystyczne wyznacza się z zależności [9]:

$$l_{ij} = \min_{k=1,2,\dots,K} \{a_{ijk}\} \quad (2)$$

$$m_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K a_{ijk} \right)^{1/K} \quad (3)$$

$$u_{ij} = \max_{k=1,2,\dots,K} \{a_{ijk}\}. \quad (4)$$

Funkcje przynależności są konstruowane tak, tak aby modelowały nierównomierny rozkład preferencji ekspertów. Przykład takiej funkcji przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Funkcja przynależności dla zagregowanej opinii \tilde{a}_{ij} (przykład)

Wektor wag warunków realizacyjnych dla skończonej liczby przekrojów α funkcji przynależności jest ustalany w sposób taki, aby spełniona była nierówność (w sensie rozmytym – w największym stopniu):

$$l_{ij}(\alpha) \leq \frac{w_i}{w_j} \leq u_{ij}(\alpha), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad j = 2, 3, \dots, n, \quad j > i. \quad (5)$$

Zapewnia to spełnienie dla każdego eksperta równania $w_i/w_j = \tilde{a}_{ijk}$ i zwiększenie zgodności opinii poszczególnych ekspertów z opinią całej grupy.

3.3. Ocena dyspersji czasu realizacji procesów budowlanych

W celu utworzenia harmonogramu budowy jest konieczne założenie ostrych wartości czasów wykonania procesów. W rzeczywistości czas wykonania procesów budowlanych jest

zmienną losową opisaną rozkładem prawdopodobieństwa. Aby określić rzeczywiste typy i parametry rozkładów czasu wykonania procesów budowlanych konieczne jest przeprowadzenie wielu pracochłonnych i kosztownych pomiarów chronometrycznych. W przypadku braku wyników takich badań stosuje się pewne założenia upraszczające [6, 19, 25, 26].

Na przykład w metodzie *PERT* zakłada się, że czasy wykonania procesów są zmiennymi losowymi o rozkładzie beta-*PERT*, którego parametry określa się na podstawie oszacowań czasu pesymistycznego, optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego.

Według Johnsona [15] dobrym przybliżeniem rozkładu beta-*PERT* jest rozkład trójkątny, opisany za pomocą prostych zależności analitycznych zrozumiałych dla praktyków. Do jednoznacznego określenia kształtu funkcji gęstości rozkładu trójkątnego jest konieczne określenie trzech wartości zmiennej losowej – czasu minimalnego a_j , mody m_j i czasu maksymalnego b_j . W proponowanej metodyce zakłada się, że oszacowania czasu minimalnego i maksymalnego są dokonywane na podstawie danych historycznych gromadzonych przez przedsiębiorstwo. Wartość mody jest określana dla przeciętnych warunków realizacyjnych na podstawie norm pracochłonności.

W zaproponowanej w artykule metodyce ocena ryzyka czasu realizacji procesu budowlanego ma na celu określenie wielkości możliwych wydłużeń zaplanowanego czasu wykonania i prawdopodobieństwa wystąpienia takich sytuacji. Ryzyko czasu – zgodnie z definicją Williamsa i Heinsa [31] – może być opisane za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa opóźnień.

Założono, że miara ryzyka związanego z decyzją o ustaleniu czasu realizacji procesu j , jako równego wartości t_j , jest równa wartości oczekiwanej jego wydłużenia [11]:

$$r^{PC}(t_j) = \int_{t_j}^{b_j^{PC}} (x - t_j) \cdot f_j^{PC}(x) dx, \quad (6)$$

gdzie:

$r^{PC}(t_j)$ – miara ryzyka związanego z decyzją o ustaleniu czasu wykonania procesu j , jako równego wartości t_j , dla zagregowanej oceny stanu warunków realizacyjnych równej PC , obliczonej wg formuły (1),

$f_j^{PC}(x)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu realizacji procesu j , przy zagregowanej ocenie stanu warunków realizacyjnych równej PC .

Przyjęto, że w przypadku procesów, dla których brak danych historycznych uniemożliwia przeprowadzenie analiz statystycznych, funkcja gęstości prawdopodobieństwa ma rozkład trójkątny o następujących parametrach: $a_j^{PC}, m_j^{PC}, b_j^{PC}$ oznaczających odpowiednio czas minimalny, modę i czas maksymalny procesu j przy zagregowanej ocenie stanu warunków realizacyjnych PC .

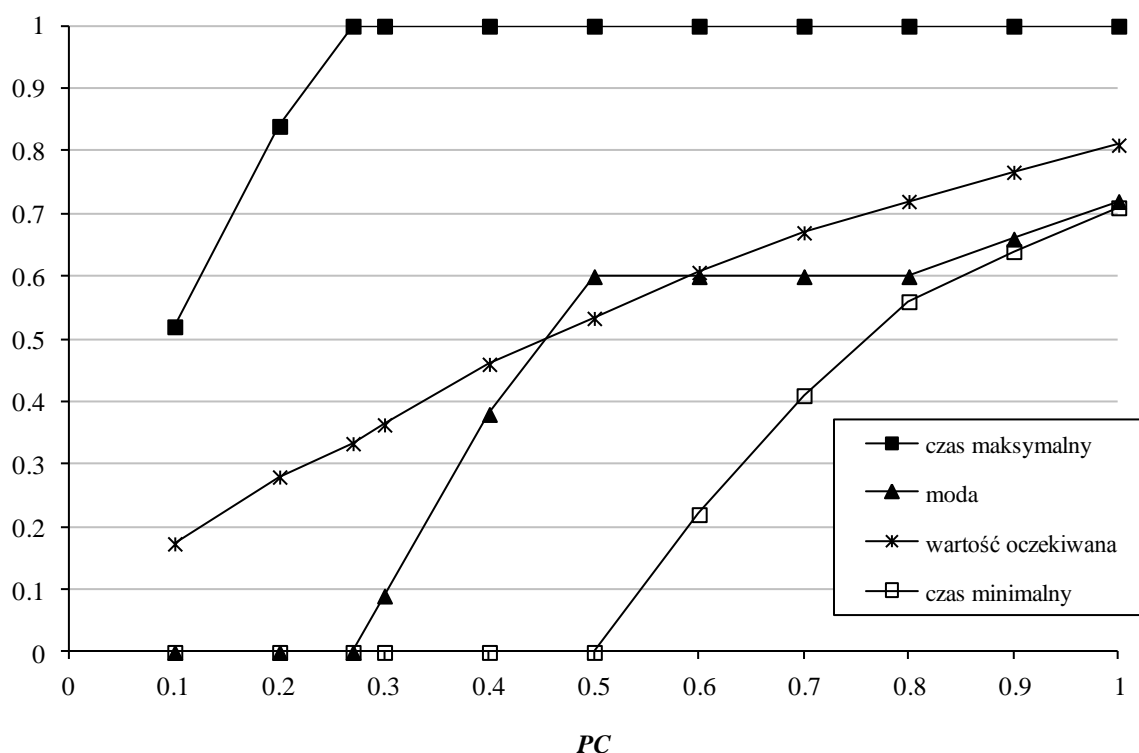
W celu określenia parametrów funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu wykonania procesu $f_j^{PC}(x)$ przy dowolnej ocenie stanu warunków realizacyjnych ($PC \neq 0,5$), obliczonej wg formuły (1), zastosowano metodę najmniejszych kwadratów, przyjmując następujące założenia [11]:

— Ryzyko związane z decyzją o ustaleniu czasu wykonania procesu jest wprost proporcjonalne do oceny stanu warunków realizacyjnych. W warunkach najbardziej korzystnych (idealnych) jego miara przyjmuje wartość 0. Zatem:

$$r^{PC}(t_j) = r^{0,5}(t_j) \cdot \frac{PC}{0,5}, \quad \forall t_j \in [a_j^{PC}, b_j^{PC}]. \quad (7)$$

- Jeżeli $PC > 0,5$, to czas minimalny a_j^{PC} i moda m_j^{PC} mogą przyjmować wartości większe niż przy $PC = 0,5$.
- Jeżeli $PC < 0,5$, to czas maksymalny b_j^{PC} i moda m_j^{PC} mogą przyjmować wartości mniejsze niż przy $PC = 0,5$.

Opracowano wykresy do ustalania wartości parametrów zmiennych losowych o standaryzowanych rozkładach trójkątnych dla różnych zagregowanych ocen stanu warunków realizacyjnych. Umożliwiają one ustalenie parametrów rozkładu trójkątnego dla dowolnych wartości oszacowań czasu minimalnego, mody i maksymalnego, dokonanych dla przeciętnych warunków realizacji. Dane te są niezbędne do przeprowadzenia symulacji *Monte Carlo* i wyznaczenia wartości miary krytyczności procesów budowlanych. Przykładowy wykres przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Zależność między zagregowanymi ocenami stanu warunków realizacyjnych PC a parametrami standaryzowanego rozkładu trójkątnego czasu wykonania procesu j w tych warunkach (dla $a_j^{0,5} = 0$, $m_j^{0,5} = 0,6$, $b_j^{0,5} = 1$)

4. Metodyka alokacji buforów czasu w harmonogramie

Etap alokacji buforów czasu obejmuje opracowanie harmonogramu bazowego, ocenę krytyczności procesów budowlanych uwzględnionych w harmonogramie, określenie wielkości buforów czasu i ich alokację w harmonogramie odpornym na zakłócenia.

4.1. Opracowanie harmonogramu bazowego

Przedsięwzięcie budowlane, dla którego jest projektowany harmonogram odporny na zakłócenia, należy opracować model w postaci skierowanego, niecyklicznego i spójnego unigrafu $G = \langle V, E \rangle$, bez pętli, w którym należy wyróżnić jeden wierzchołek początkowy i jeden końcowy. $V = \{1, 2, \dots, n\}$ jest zbiorem wierzchołków grafu (procesów budowlanych), $E \subset V \times V$ to relacja dwuczłonowa określająca zależności kolejnościowe o charakterze technologicznym i organizacyjnym między procesami (łuki grafu). Modele sieciowe są stosowane w budownictwie do odwzorowania przedsięwzięć o różnym charakterze: typu kompleks operacji, obejmujących procesy nie charakteryzujące się rytmicznością i cyklicznością, jak i przedsięwzięć realizowanych potokowymi metodami realizacji z procesami powtarzalnymi. Do harmonizacji procesów powtarzalnych na działkach roboczych stosuje się różne metody m.in. potokowej organizacji pracy ze sprzężeniami czasowymi. W przypadku takich przedsięwzięć, identyfikując zależności o charakterze organizacyjnym należy uwzględnić przepływ zasobów niezbędnych do ich realizacji oraz ustalenia w zakresie kolejności realizacji procesów czy działek przez jednostki organizacyjne. Procesom należy przyporządkować czasy wykonania równe wartościom oczekiwany d_j ($\forall j \in V$) zmiennych losowych, których parametry określono wg metodyki zaprezentowanej w rozdziale 3.3.

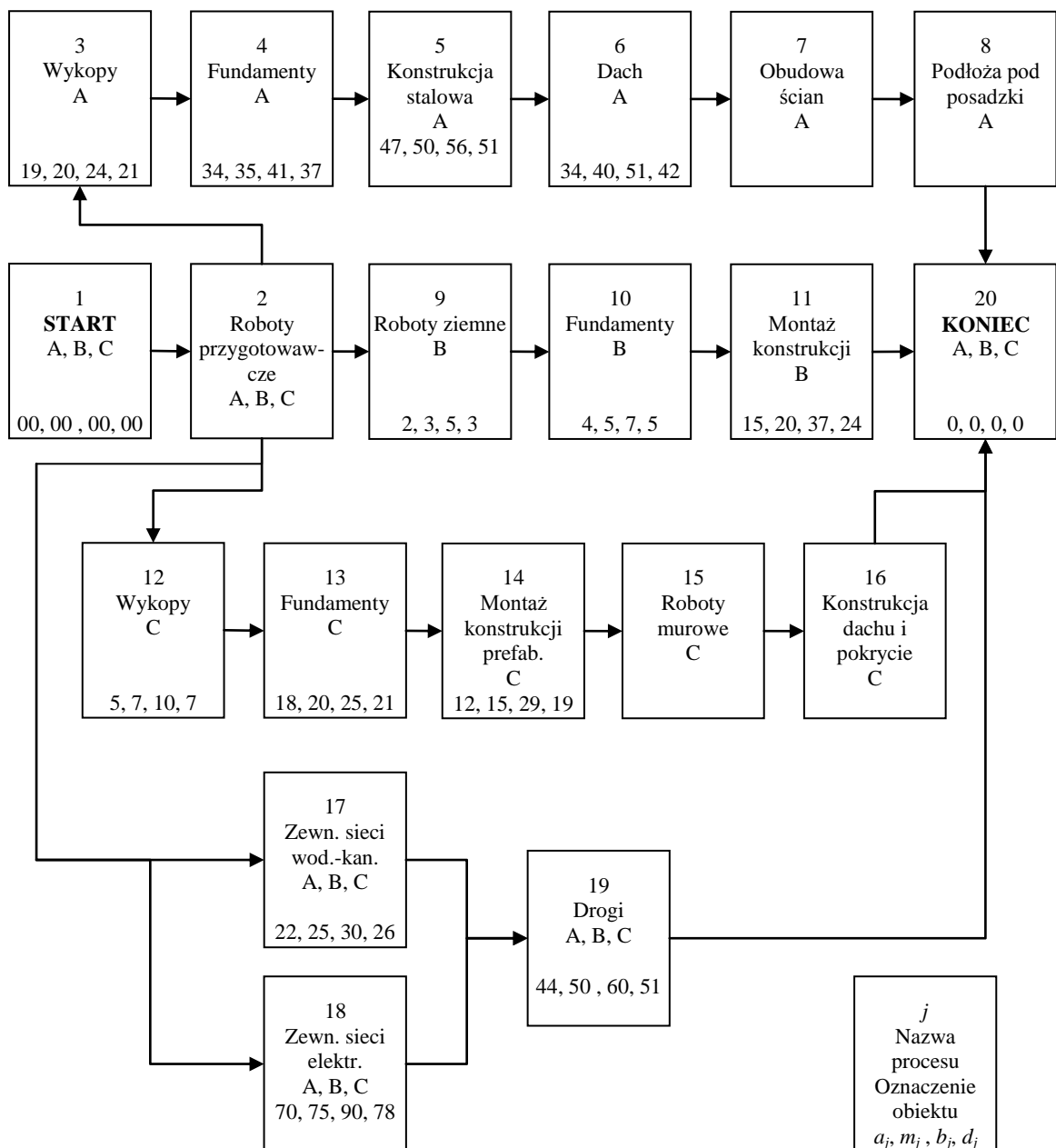
W ten sposób opracowany model sieciowy dla przykładowego przedsięwzięcia przedstawiono na Rys. 5. Analiza utworzonego modelu sieciowego w funkcji czasu umożliwi obliczenie minimalnego czasu trwania przedsięwzięcia T_{\min} , najwcześniejszych terminów rozpoczynania procesów i zapasów czasu. Dane te umożliwiają budowę harmonogramu bazowego z terminami rozpoczęcia procesów s_j^0 ($\forall j \in V$) nie wykraczającymi poza przedziały zapasów całkowitych czasu. W przykładzie harmonogram bazowy sporządzono dla najwcześniejszych terminów realizacji procesów. Minimalny czas realizacji przedsięwzięcia wynosi 277 dni.

4.2. Ocena krytyczności procesów budowlanych

W proponowanej metodyce przyjęto, że krytyczność procesu jest rozumiana jako podatność na dezaktualizację terminu jego rozpoczęcia (i dezaktualizację harmonogramu), a jej wielkość jest uzależniona od wielkości możliwych opóźnień. Procesy krytyczne – w takim ujęciu – wymagają podejmowania działań, których celem jest zabezpieczenie przed dezaktualizacją terminu rozpoczęcia.

Czynnikami determinującym krytyczność procesu są m.in. struktura modelu sieciowego, a także zmienność czasów wykonania procesów na drogach dochodzących do danego procesu. W celu uwzględnienia wpływu zmienności czasów realizacji poprzedników na termin rozpoczęcia procesu zastosowano symulację *Monte Carlo*. Umożliwia to uwzględnienie sytuacji, gdy niektóre procesy mogą rozpoczynać się nie wcześniej niż w ustalonym w harmonogramie terminie. Taką politykę harmonogramowania określa się w literaturze mianem kolejowej (ang. *railway*).

Procedura oceny krytyczności procesów wymaga przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych modelu sieciowego, przy założeniu, że czasy wykonania procesów są zmiennymi losowymi, których parametry określono z uwzględnieniem stanu warunków realizacyjnych, a procesy rozpoczynają się zgodnie z przyjętą polityką w terminach określonych w harmonogramie bazowym.



Rys. 5. Model sieciowy przedsięwzięcia (przykład)

Na podstawie symulacji można określić estymatory wartości oczekiwanych opóźnień procesów w stosunku do terminów zaplanowanych:

$$\Delta s_j = s_j^1 - s_j^0, \quad (8)$$

gdzie:

s_j^1 – średni termin rozpoczęcia procesu j określony na podstawie symulacji,

s_j^0 – termin rozpoczęcia procesu j określony w harmonogramie bazowym.

Miara podatności na opóźnienie terminu rozpoczęcia procesu j (ocena jego krytyczności) jest określona następująco:

$$k_j = \Delta s_j + 3\sigma_j, \quad (9)$$

gdzie:

σ_j – odchylenie standardowe terminów rozpoczęcia procesów $j = 1, 2, \dots, n$.

Mnożnik 3 przy wartości odchylenia standardowego przyjęto na podstawie nierówności Czebyszewa (ang. *one-sided Chebyshev inequality*) przy założeniu, że prawdopodobieństwo wystąpienia opóźnienia terminu rozpoczęcia procesu j większego od k_j jest mniejsze od 0,1, niezależnie od typu i parametrów rozkładu zmiennej losowej s_j terminu rozpoczęcia procesu j .

4. 3. Określanie wielkości buforów czasu

Zwiększenie odporności harmonogramu na wpływ zjawisk losowych jest możliwe przy zastosowaniu techniki redundancji, poprzez alokację buforów mających charakter czasu bezczynności (przerw), umieszczanych przed terminami rozpoczynania procesów.

W proponowanej metodyce przyjęto, że procesom $j = 1, 2, \dots, n$ jest przypisany c_j – jednostkowy koszt opóźnień ich terminów rozpoczęcia w stosunku do terminów określonych w harmonogramie bazowym. Dla procesów, dla których $c_j > 0$, określono miary krytyczności k_j . Rozpoczynają się one zgodnie z polityką kolejową (ang. *railway*).

Celem metody jest zaprojektowanie odpornego harmonogramu dla ustalonego dyrektywnego terminu zakończenia przedsięwzięcia T_d , dla którego funkcja kosztu niestabilności jest minimalna:

$$C = \sum_{j=1}^n c_j E(s_j - s_j), \quad (10)$$

gdzie:

s_j – zmienna losowa terminu rozpoczęcia procesu j ,

s_j – termin rozpoczęcia procesu j w harmonogramie odpornym na zakłócenia,

c_j – jednostkowy koszt opóźnień terminów rozpoczęcia procesu j w stosunku do terminu określonego w harmonogramie odpornym na zakłócenia.

Ze względu na przyjętą postać funkcji celu (minimalizacja wartości oczekiwanej kosztu opóźnień procesów) rozważany problem decyzyjny może być rozwiązany za pomocą metod programowania stochastycznego o dużej złożoności obliczeniowej. Z tego względu w literaturze przedmiotu poszukuje się zastępczych mierników odporności harmonogramów, które mogą stanowić podstawę do budowy efektywnych algorytmów harmonogramowania.

Wielkość buforów δ_j dla $j = 1, 2, \dots, n$ jest określana według procedury obejmującej następujące etapy [10]:

1. Obliczenie całkowitego zapasu czasu zc_j^0 procesów $j = 1, 2, \dots, n$ w harmonogramie bazowym. Całkowite zapasy czasu procesów $j = 1, 2, \dots, n$ dla dyrektywnego czasu realizacji przedsięwzięcia T_d są równe $zc_j = zc_j^0 + T_d - T_{\min}$. Istniejący całkowity zapas czasu ciągów procesów w harmonogramie bazowym powinien być rozdzielony (w postaci buforów) z uwzględnieniem wag procesów obliczanych zgodnie z wyrażeniem:

$$w_j = c_j \cdot k_j \quad (11)$$

2. Obliczenie wielkości buforów poprzez rozwiązanie następującego modelu matematycznego:

$$\max z : z = \min_{j \in H} \left\{ \frac{\delta_j}{zc_j \cdot w_j} \right\} \quad (12)$$

$$s_1 = 0 \quad (13)$$

$$s_j - \delta_j \geq s_i + d_i, \quad \forall (i, j) \in E \quad (14)$$

$$s_n + d_n \leq T_d \quad (15)$$

$$s_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (16)$$

$$\delta_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (17)$$

$$\delta_j = 0, \quad \forall j \in V \setminus H \quad (18)$$

$$\delta_j \in \text{int}, \quad \forall j \in H, \quad (19)$$

gdzie:

$H = \{j : w_j > 0\}$ – zbiór procesów, którym będą przydzielane bufory,

s_j – termin rozpoczęcia procesu j , $j = 1, 2, \dots, n$, w harmonogramie z buforami.

Funkcja celu (12) umożliwi maksymalizację wartości zaproponowanego miernika odporności. Warunek (13) i (14) umożliwiają obliczenie terminów rozpoczęcia procesów w harmonogramie z buforami. Termin zakończenia nie może przekroczyć terminu dyrektywnego zgodnie z zależnością (15).

Przyjęta postać funkcji celu umożliwi ona uzyskanie rozwiązań lepszych niż przy zastosowaniu innych metod prezentowanych w literaturze – potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań weryfikacyjnych, zaprezentowane w pracy [10].

W opracowanej metodyce zaproponowano dodatkowo dwa alternatywne zastępcze mierniki odporności harmonogramów:

$$\min_{j \in H} \left\{ \frac{\delta_j \cdot p_j}{zc_j \cdot w_j} \right\}, \quad (20)$$

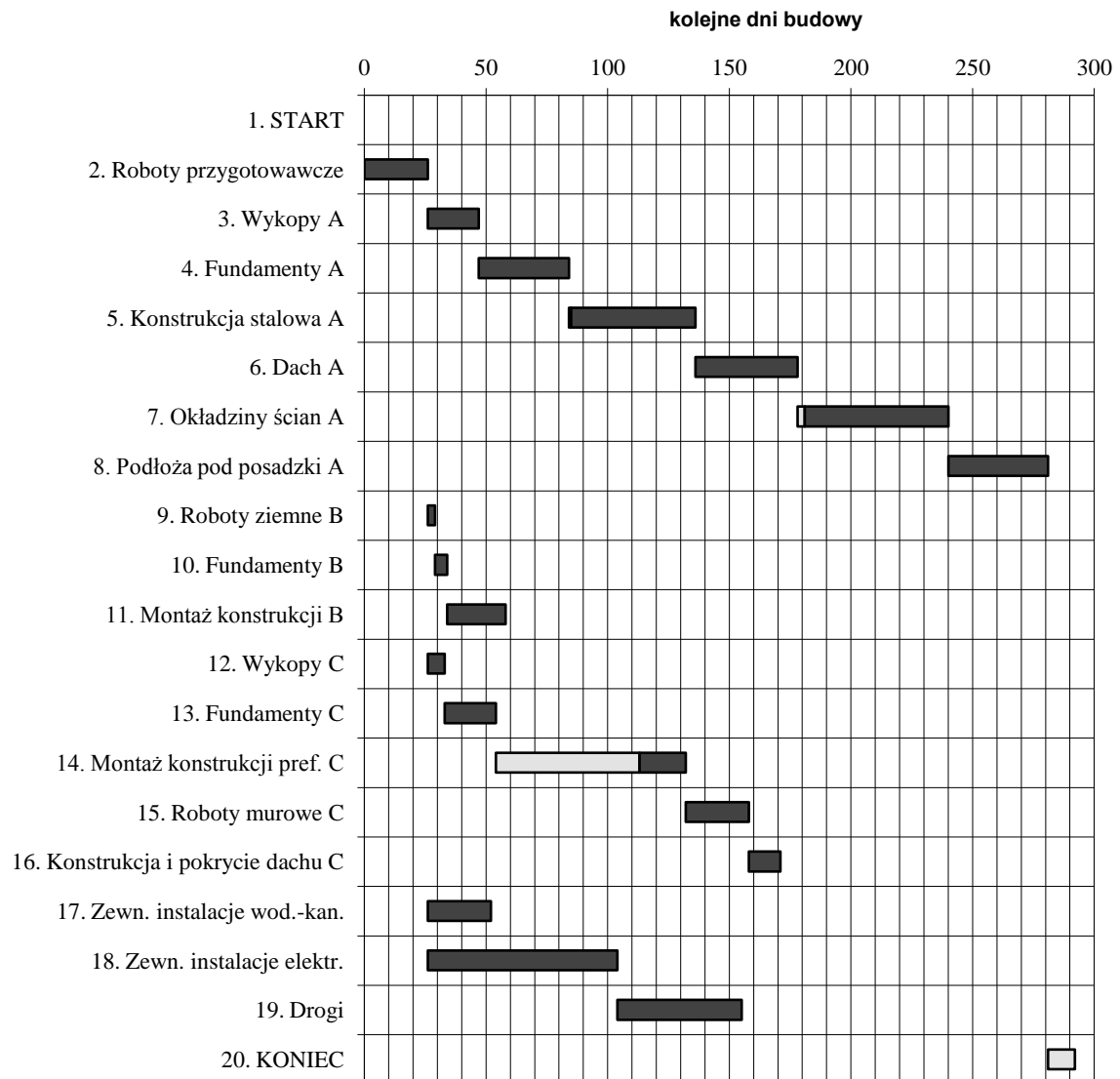
$$\min_{j \in H} \left\{ \frac{\delta_j}{zc_j \cdot c_j} \right\}. \quad (21)$$

gdzie: p_j – numer pozycji procesu j w ciągu procesów o zapasie całkowitym zc_j , dla których $c_j > 0$, znajdujących się na tej samej drodze.

Formuła (20) uwzględnia pozycję procesu na drodze, tym samym redukcję krytyczności procesu przez bufory poprzedzające, kompensujące część zakłóceń.

Jakość proponowanych mierników odporności oceniono dla różnych dyrektywnych czasów realizacji przedsięwzięcia, dla którego model sieciowy przedstawiono na Rys. 5. Badania przeprowadzono dla pięciu zestawów jednostkowych opóźnień procesów (wyniki dla jednego zestawu zaprezentowano w artykule [12]). Na Rys. 6 przedstawiono uzyskany harmonogram odporny na zakłócenia przy założeniu, że jednostkowe koszty

opóźnień procesów wynoszą: $c_5 = 1$, $c_7 = 3$, $c_{14} = 5$, $c_{20} = 10$, pozostałe 0, a dyrektywny czas realizacji przedsięwzięcia wynosi $T_d = 292$.



Rys. 6. Harmonogram przedsięwzięcia (przykład) z alokowanymi buforami czasu; szare belki obrazują bufor umieszczony przed terminem rozpoczęcia procesów

Obliczone zgodnie z prezentowaną metodyką wielkości buforów wynoszą $\delta_5 = 1$, $\delta_7 = 3$, $\delta_{14} = 59$, $\delta_{20} = 11$, zaś wartość funkcji kosztu niestabilności harmonogramu wynosi $C = 2,69$. Prezentowane rozwiązanie uzyskano przy zastosowaniu miernika (20).

Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Istotny wpływ na wielkość kosztu niestabilności harmonogramu ma wielkość czasu przeznaczony na realizację przedsięwzięcia. Wydłużenie terminu dyrektywnego szczególnie istotnie wpływa na odporność jakości harmonogramu.
2. Zwiększanie wielkości bufora umieszczonego przed terminem zakończenia przedsięwzięcia i zmniejszanie ochrony terminów pośrednich powodują zwiększanie kosztów niestabilności harmonogramu.

3. Najmniejsze wartości kosztów niestabilności harmonogramów uzyskano dla zestawów ze stosunkowo dużymi jednostkowymi kosztami opóźnień terminów pośrednich. Można przypuszczać, że bufony umieszczone w terminach pośrednich mają większy potencjał i efektywność zapobiegania propagacji zakłóceń w harmonogramie.
4. Mierniki (12), (20) i (21) można zaliczyć do tej samej rodziny funkcji określonych wzorem:

$$\min_{j \in H} \left\{ \alpha(p_j) \cdot \frac{\delta_j}{zc_j \cdot w_j} \right\}, \quad (21)$$

gdzie: $\alpha(p_j)$ – parametr, którego wartość jest zależna od pozycji procesu j na drodze w modelu sieciowym.

Zastosowanie zestawu mierników (12), (20) i (21) pozwala – w przypadku uzyskania rozwiązania niesatysfakcjonującego decydenta – na ograniczenie zakresu wartości tego parametru przy poszukiwaniu harmonogramów bardziej odpornych.

5. Podsumowanie

W praktyce zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi istnieje zapotrzebowanie na metody projektowania harmonogramów budowy zintegrowane z procedurą zarządzania ryzykiem [25, 26]. W szczególności na analizy ilościowe dokonywane na etapie identyfikacji i analizy źródeł ryzyka, które – mimo trudności w uzyskaniu obiektywnych danych – dostarczają wymiernych informacji do oceny podejmowanych decyzji w procesie zarządzania ryzykiem czasu przedsięwzięć budowlanych. Problematyka zwiększania niezawodności harmonogramów jest bardzo istotna w przypadku przedsięwzięć o charakterze niepowtarzalnym m.in. obejmujących roboty remontowe i dotyczące przebudowy obiektów istniejących w fazie ich eksploatacji (np. czynnych zakładów przemysłowych).

W artykule zaproponowano metodykę tworzenia harmonogramów budowlanych odpornych na zakłócenia realizacyjne, polegającą na alokacji zapasu czasu ciągów czynności w postaci buforów czasu. Harmonogram odporny z ustalonym terminem zakończenia zapewnia minimalizację funkcji kosztu niestabilności (wartości oczekiwanej kosztów opóźnień procesów) i cechuje go większa niezawodność – większe prawdopodobieństwo dotrzymania zaplanowanych terminów.

Tworząc metodykę harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych uzyskano oryginalne rezultaty teoretyczne, są to m.in.:

- 1) Implementacja koncepcji projektowania odpornego na zakłócenia do harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych, w tym.
 - Opracowanie mierników odporności harmonogramów i algorytmu harmonogramowania o małej złożoności obliczeniowej.
 - Zdefiniowanie pojęcia krytyczności procesów w warunkach ryzyka.
 - Wspomaganie decyzji na każdym etapie zarządzania ryzykiem przedsięwzięcia budowlanego (zintegrowany charakter opracowanej metodyki).
- 2) Opracowanie metodyki oceny poziomu ryzyka czasu bazującej na analizie całokształtu uwarunkowań realizacyjnych.
- 3) Opracowanie metodyki określania parametrów rozkładu czasu wykonania procesów w różnych warunkach realizacyjnych (zastosowanie w badaniach symulacyjnych i do oceny wariantów usprawnień).

- 4) Opracowanie rozmytego rozwinięcia metody AHP do wspomaganie decyzji grupowych w różnych obszarach budownictwa (zwiększenie obiektywizmu ocen, możliwość zastosowania w przypadku dużej rozbieżności opinii ekspertów).

Ponieważ koszt niestabilności harmonogramu w dużej mierze zależy od wielkości zapasu czasu ciągu procesów rozdzielanego w postaci buforów, istotne jest dalsze rozwijanie metod harmonogramowania minimalizujących czas realizacji przedsięwzięć, np. z uwzględnieniem relacji słabych (ang. *soft logic*) [30], wielozawodowości robotników (ang. *multi-skilling*) [5, 7], możliwości zmiany kolejności zajmowania działek przez brygady [4] oraz redukcji czasu wykonania poszczególnych procesów [22]. Ich zastosowanie w połączeniu z proponowaną metodyką umożliwi istotnie zwiększyć niezawodność harmonogramów budowlanych.

Podziękowania: Wyniki prac były finansowane z środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2015).

Literatura

1. Al-Fawzan M. A., M. Haouari M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Economics* 2005; 96(2): 175-187.
2. Bertsimas D., Sim M. The Price of Robustness. *Operations Research* 2004; 52(1): 35-53.
3. Bożejko W., Hejducki Z., Wodecki M. Applying metaheuristic strategies in construction projects management. *Journal of Civil Engineering and Management* 2012; 18(5): 621-630.
4. Bożejko W., Hejducki Z., Uchroński M., Wodecki M. Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic. *Journal of Civil Engineering and Management* 2014; 20(5): 649-659.
5. Burleson R. C., Hass C. T., Tucker R. L., Stanley A. Multiskilled labor utilization strategies in construction. *Journal of Construction Engineering and Management* 1998; 124(6): 480-489.
6. Dawood N. Estimating project and activity duration: a risk management approach using network analysis. *Construction Management and Economics* 1998; 16(1): 41-48.
7. Hegazy T., Shabeeb A. K., Elbeltagi E., Cheema T. Algorithm for scheduling with multiskilled constrained resources. *Journal of Construction Engineering and Management* 2000; 126(6): 414-421.
8. Hoła B., Schabowicz K. Estimation of earthworks execution time cost by means of artificial neural networks. *Automation in Construction* 2010; 19(5): 570-579.
9. Jaśkowski P., Biruk S., Bucoń R. Assessing contractor selection criteria weights with fuzzy AHP method application in group decision environment. *Automation in Construction* 2010; 19(2): 120-126.

10. Jaśkowski P., Biruk S. The method for improving stability of construction project schedules through buffer allocation. *Technological and Economic Development of Economy* 2011; 17(3): 429-444.
11. Jaśkowski P., Biruk S. The conceptual framework for construction project risk assessment. *Reliability: Theory & Applications* 2011; 2(3): 27-35.
12. Jaśkowski P., Biruk S., Kowalski T. Trade-off between robustness of a construction schedule and project completion time. *International Journal of Arts & Sciences* 2011; 20(4): 205-215.
13. Jaśkowski P., Biruk S., Painting N. Using of fuzzy AHP for assessing risk of construction projects. *International Journal of Arts & Sciences* 2011; 19(4): 257-268.
14. Jaworski K. M. *Metodologia projektowania realizacji budowy (Methodology of planning construction works)*. Warsaw: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
15. Johnson D. The triangular distribution as a proxy for beta distribution in risk analysis. *The Statistician* 1997; 46(3): 387-398.
16. Kapliński O. Planning instruments in construction management. *Technological and Economic Development of Economy* 2008; 14(4): 449-451.
17. Kasprowicz T. *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych (Construction project engineering)*. Radom–Warsaw: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, 2002.
18. Marcinkowski R. *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynierijno-budowlanej (Contractor's resource assignment in construction and civil engineering)*. Warsaw: Military University of Technology, 2002.
19. 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): 518-527.
20. Połoński 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): 313-320.
21. Rybka I., Bondar-Nowakowska E., Połoński M. The influence of stoppages on productivity during construction of water supply and sewage systems. *Technical Transactions* 2014; 2-B(6): 309-315.
22. Sakellariopoulos S., Chassiakos A. P. Project time-cost analysis under generalised precedence relations. *Advances in Engineering Software* 2004; 35(10-11): 715-724.
23. Samson S., Reneke J. A., Wiecek M. M. A review of different perspectives on uncertainty and risk and alternative modelling paradigm. *Reliability Engineering and System Safety* 2009; 94(2): 558-567.

24. Schabowicz K., Hoła B. Application of artificial neural networks in predicting earthmoving machinery effectiveness ratios. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 8(4): 73-84.
25. 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): 885-893.
26. Skorupka D. Identification and initial risk assessment of construction projects in Poland. *Journal of Management in Engineering* 2008; 24(3): 120-127.
27. 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): 87-97.
28. Van de Vonder S., Demeulemeester E., Leus R., Herroelen W. The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan. *International Journal of Production Economics* 2005; 97(2): 227-240.
29. Van de Vonder S., Demeulemeester E., Herroelen W. Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: an experimental analysis. *European Journal of Operational Research* 2008; 189(3): 723-733.
30. Wang W. – Ch. Impact of soft logic on the probabilistic duration of construction projects. *International Journal of Project Management* 2005; 23(8): 600-610.
31. Williams C. A., Heins R. M. *Risk management and insurance*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1971.