

# ANALIZA RYZYKA HARMONOGRAMOWANIA PROJEKTU Z WYKORZYSTANIEM METODY MONTE CARLO

Renata WALCZAK

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono zasady wykorzystania metody Monte Carlo do oceny prawdopodobieństwa ukończenia projektu w określonym terminie. Przedstawiono problemy związane z wykorzystaniem metody ścieżki krytycznej, PERT i łańcucha krytycznego oraz wynikające z tego zagrożenia. Opracowano model sieciowy przykładowego przedsięwzięcia, ustalono rozkłady prawdopodobieństwa dla poszczególnych zadań, wykonano symulację metoda Monte Carlo, wyznaczono rozkład prawdopodobieństwa dla całego projektu oraz ustalono prawdopodobieństwo znalezienia się poszczególnych zadań na ścieżce krytycznej. Dodatkowo przeprowadzono analizę wrażliwości dotyczącą wpływu poszczególnych czynności na termin ukończenia projektu.

**Słowa kluczowe:** Metoda Monte Carlo, harmonogram, analiza ryzyka projektu, CPM, PERT

## 1. Wprowadzenie

W 2012 roku podczas konferencji Synergy 2012 dotyczącej zarządzania projektami. Mark Langley, prezes amerykańskiego stowarzyszenia zajmującego się zarządzaniem projektami - Project Management Institute (PMI) poinformował, że na świecie coraz większa część działalności organizacji realizowana jest w formie jednorazowych przedsięwzięć, projektów. W związku z tym zwiększa się zapotrzebowanie na specjalistów z dziedziny zarządzania projektami (Project Management). Z szacunków PMI wynika, że corocznie na świecie będzie potrzebnych 1,5 mln nowych specjalistów z tej dziedziny [1]. Zwiększona liczba realizowanych projektów, częste porażki podczas ich realizacji, brak profesjonalnej wiedzy wśród osób zarządzających projektami doprowadziły do powstawania stowarzyszeń zawodowych zajmujących się zajmowaniem projektami m.in. IPMA [2], PMI [3] lub OGC [4]. Organizacje te wprowadzają na rynek metodyki zarządzania projektami (ICB [5], PMBoK [6], PRINCE2 [7]), które mają podnieść jakość zarządzania przedsięwzięciami oraz spowodować częściową regulację rynku. Metodyka PRINCE2 dotyczy przede wszystkim zarządzania dokumentacją, pozostałe metodyki oprócz uporządkowania procesów zarządzania projektami i związanej z nimi dokumentacji porządkują wiedzę dotyczącą zarządzania przedsięwzięciami, jednak jest to wiedza na podstawowym poziomie. Jednym z najważniejszych elementów spośród procesów prowadzenia projektów jest harmonogramowanie. Harmonogramy są podstawą do uzgodnień kontraktowych. W kontraktach wprost umieszcza się czynności i produkty, które znajdują się na ścieżce krytycznej. Decydenci, bazując na wiedzy zdobytej podczas szkoleń przygotowujących do certyfikacji, tworzą proste, deterministyczne modele sieciowe i czynią je podstawą do rozliczeń w długoterminowych i często wartych miliony kontraktach. Do planowania przedsięwzięć wykorzystuje się jedynie metodę ścieżki krytycznej (Critical Path Method – CPM). Powodem takiego postępowania jest brak wiedzy wśród decydentów oraz dostępność oprogramowania do zarządzania projektami, które wykorzystuje deterministyczną, jednopunktową estymację czasów trwania zadań. Nie

można wysnuć z tego powodu wniosku, że oprogramowanie jest złe. Programy do zarządzania projektami przeznaczone są do zarządzania operacyjnego, gdzie nie ma powodu uwzględniania zmienności projektu. Wykorzystywanie deterministycznego podejścia do wstępnego planowania projektu i oceny terminu jego ukończenia, a także ustalanie na tej podstawie zobowiązań kontraktowych wiąże się z dużym ryzykiem.

Bardzo często słyszy się o opóźnionych projektach. Jak podawała w lutym 2013 r. Rzeczpospolita opóźnienia w budowie warszawskiego metra wynosiły 200 dni. Inwestor tłumaczył, że powodem opóźnienia są znajdowane niewybuchy, niezaznaczone na planach instalacje, znaleziska archeologiczne, labilne warunki geologiczne i zalanie stacji Powiśle. Termin udostępnienia drugiej linii metra do ruchu ustalono na maj 2014 r., czyli zatwierdzono siedmiomiesięczne opóźnienie realizacji projektu [9]. 7. maja 2013 r. Ratusz Warszawski opublikował oświadczenie, w którym stwierdza, że opóźnienie budowy wyniesie 11 miesięcy. Prace tym razem zatrzymały znalezione niewybuchy, odkryte fundamenty fabryki z 1913 r, warunki pogodowe w zimie 2012/2013 [10].

Media również sukcesywnie donoszą o opóźnieniach w budowie autostrad. Jako przyczyny podaje się winę drogowców, rezygnację kontrahentów, problemy z przetargami, złe zaplanowanie ochrony środowiska i wstrzymanie z tego powodu finansowania ze środków unijnych. Przykładowe informacje dotyczące opóźnień w realizacji projektów można znaleźć w Rzeczpospolitej [11, 12, 13].

Przykłady opóźnionych projektów można mnożyć. Trudno znaleźć projekt, który wykonany jest w zaplanowanym terminie, po ustalonych w kontrakcie kosztach, z uwzględnieniem zaplanowanego zakresu i jakości.

Decydenci podpisujący kontrakty zdają sobie sprawę z zagrożeń, które mogą opóźnić realizację projektów. Już przed II Wojną Światową w Warszawie wykonano odwierty mające na celu ocenę warunków geologicznych i ustalenie strategii budowy metra. Już wtedy przewidziano zagrożenia, z którymi obecnie zmagają się budowniczowie metra warszawskiego. Na stronie internetowej Warszawskiego Metra przedstawiono historię budowy metra, w tym informacje o pracach przedwojennych [14].

Wiedza o możliwych ryzykach nie jest wykorzystywana przy strategicznym planowaniu inwestycji, a do tworzenia harmonogramów bazowych wykorzystuje się oprogramowanie przeznaczone do planowania operacyjnego. Szczególnie należy zwrócić uwagę na fakt, że harmonogramy wykonuje się na podstawie niepełnej wiedzy. Planiści powinni znać wszystkie detale, żeby móc ocenić, kiedy faktycznie projekt zostanie ukończony. Przed przyjęciem planu bazowego warto sprawdzić, jakie jest ryzyko wykonania go w terminie dyrektywnym, ocenić, jaki jest wpływ poszczególnych faz realizacji inwestycji na ten termin, jaka jest szansa, że zadania nie leżące na ścieżce krytycznej znajdą się na niej i będą miały wpływ na ukończenie inwestycji. Konieczne jest przygotowanie kilku scenariuszy projektu umożliwiających zatwierdzenie ostatecznego, realnego planu bazowego.

## **2. Problemy związane z tworzeniem harmonogramów projektów**

### **2.1. Problemy dotyczące harmonogramowania z wykorzystaniem metody ścieżki krytycznej (CPM)**

Metoda ścieżki krytycznej jest metodą deterministyczną, opracowaną w połowie XX w. i powszechnie wykorzystywaną w planowaniu przedsięwzięć. Do przygotowania harmonogramu konieczne jest zestawienie zadań składających się na przedsięwzięcie oraz wykonanie i obliczenie modelu sieciowego. Czas trwania poszczególnych zadań ustalany

jest jednopunktowo i uznawany jest za wartość sprawdzoną, pewną i nie podlegającą dalszym zmianom. Termin zakończenia projektu wyznaczany jest w drodze prostych obliczeń, zgodnie z logiką sieci. Rozszerzeniem sieci powiązań budowanych zgodnie z metodą ścieżki krytycznej są sieci PDM (Precedence Network Diagramming) uwzględniające nietypowe powiązania między czynnościami oraz przyspieszenia i opóźnienia [15 s. 14, 16 s. 85]. Obie metody nie pozwalają na uwzględnienie zmiennej wartości czasów trwania zadań oraz ryzyka zmiany terminu zakończenia projektu.

Opracowane na wstępnym etapie projektu plany są bardzo niedokładne. Planiści nie mają wystarczającej wiedzy na temat przedsięwzięcia, żeby precyzyjnie przewidzieć i zaplanować wszystkie szczegóły. Powodem może być zbyt wczesny etap planowania, żeby móc taką wiedzę zdobyć. Powodem może być również brak znajomości procesu technologicznego. Dopiero po rozpoczęciu prac nad projektem okazuje się, że wielu rzeczy nie wzięto pod uwagę przy planowaniu, nie przewidziano na to czasu oraz budżetu, nie przydzielono stosownych zasobów. Często decydenci naciskają na przygotowanie nierealnych harmonogramów. To, że czegoś nie zaplanowano nie oznacza, że nie będzie trzeba tego wykonać. W wyniku niedopatrzeń ukończenie projektów przeciąga się, koszty rosną, realizatorzy projektów tracą kontrakty i są obarczani karami umownymi.

## **2.2. Problemy związane z harmonogramowaniem z wykorzystaniem metody PERT**

Metoda PERT (Program Evaluation and Review Technique) [15 s. 30] została opracowana równoległe z metodą CPM. Tok obliczeń jest podobny jak w metodzie ścieżki krytycznej, jednak PERT zamiast deterministycznego określania czasów trwania zadań pozwala na ich trzypunktową estymację. Podawane są czasy: optymistyczny, pesymistyczny oraz najbardziej prawdopodobny, czyli realistyczny (moda). Zakłada się, że czas trwania czynności zgodny jest z rozkładem beta, symetrycznym, prawo lub lewoskośnym. Rozkład czasu trwania czynności uznawany jest za ograniczony w pewnym podanym przez planistę przedziale. Na podstawie formuł empirycznych wyznaczany jest oczekiwany czas trwania każdej czynności. Następnie zgodnie z topografią sieci wyznaczany jest oczekiwany czas trwania całego projektu. Odchylenie standardowe wyznaczone jest jako pierwiastek z sumy wariancji czynności leżących na ścieżce krytycznej [17 s. 225].

Metoda PERT pozwala na uwzględnienie zmienności czasów trwania czynności, jednak problematyczne jest stosowanie jej dla dużych sieci. W przypadku, kiedy ścieżki w sieci mają wspólne elementy konieczne jest uwzględnianie prawdopodobieństwa warunkowego, co nie jest łatwym zadaniem i wymaga profesjonalnej pomocy matematyków [18 s. 29]. Metoda PERT w przypadku dużych sieci prowadzi do zbyt optymistycznej oceny prawdopodobieństwa ukończenia projektu. Przykład obliczeń sieci za pomocą metody PERT jest w [17 s. 230].

## **2.3. Problemy dotyczące tworzenia harmonogramów z wykorzystaniem metody łańcucha krytycznego**

Metoda łańcucha krytycznego [19] wykorzystuje, podobnie jak metoda CPM, estymację deterministyczną. Założono tu, że czas trwania zadań pierwotnie przyjmowany przez planistów ma zapewnić stuprocentowe prawdopodobieństwo wykonania zadania. Jeśli któreś z zadań zostanie wykonane w dłuższym, niż planowano czasie, będzie to miało wpływ na termin ukończenia przedsięwzięcia. Jeśli przedłużą się czynności leżące na

ścieżce krytycznej, to przedsięwzięcie opóźni się o przynajmniej taką wartość. Jeśli czynności zostaną wykonane szybciej, żaden z realizatorów nie przyzna się, że został mu wolny czas, bo jeszcze zostaną mu zlecone inne zadania bez zwiększenia płacy. Żaden pracownik nie podejmie się dobrowolnie wykonywania dodatkowych zadań. Goltratt uważa, że czas trwania każdej czynności powinien być zredukowany o połowę tak, żeby dla każdej czynności prawdopodobieństwo jej wykonania wynosiło 50%. Likwiduje się wszelkie kamienie milowe, ponieważ ich istnienie powoduje, że pracownicy przez dłuższy czas nie pracują, a następnie mobilizują się przed terminem kontroli. Pracownicy są proszeni, żeby pracowali najszybciej jak to możliwe, a za opóźnienia nie są karani, jak w przypadku niedotrzymania terminów harmonogramowych kamieni milowych. W celu zabezpieczenia terminu zakończenia projektu wprowadza się bufor czasowy w każdym punkcie integracji (tzw. bufor yasilajace) oraz bufor dla całego projektu równy połowie czasu trwania projektu. Wykonanie projektu oceniane jest na podstawie wykorzystania poszczególnych buforów czasowych, a przede wszystkim bufora głównego projektu. Taki sposób planowania ma na celu zmianę postaw wykonawców prac projektu, nie zaś uwzględnienie zmienności czasu trwania zadań.

#### **2.4. Podsumowanie**

Analiza ryzyka w zarządzaniu projektami obejmuje przede wszystkim proces mający na celu wykrycie potencjalnych zagrożeń oraz określenie metod ich wyeliminowania lub złagodzenia. Metodyki zarządzania projektami zawierają szczegółowe procedury dotyczące tego zagadnienia [6, 8]. Procedurę zarządzania ryzykiem można prześledzić w publikacji Hilsona [20 s. 28].

Większość metod tworzenia modeli sieciowych i harmonogramów wykorzystuje estymację deterministyczną. Hulett [21] uważa, że jest to błędne podejście i zadaje pytania:

- Czy taka estymacja może być dokładna i odpowiadająca rzeczywistości?
- Czy przyczyny dotyczące ryzyk projektu mogą być odpowiednio wcześniej rozpoznane, zanim staną się problemami poprzez odpowiednie unikanie ryzyka?
- Czy można rozpoznać przyczyny opóźniania się wszystkich projektów?

Odpowiedzią na te pytania jest wykorzystanie metod harmonogramowania uwzględniających podejście statystyczne oraz rachunek prawdopodobieństwa. Przyjmowane deterministyczne założenia dotyczące czasów trwania zadań są tylko szacunkami i jako takie należy je traktować. Planiści zazwyczaj podchodzą do oceny czasów trwania czynności zbyt optymistycznie. Harmonogramy wstępne są przygotowywane w celu wygrania przetargów, a nierealne szacunki stają się częścią kontraktu i są w bezwzględny sposób wymagane. Konieczne jest uwzględnienie zmienności czasów trwania zadań i określenie na tej podstawie prawdopodobieństwa ukończenia przedsięwzięcia w założonym terminie. Podejście takie umożliwia metoda Monte Carlo.

#### **3. Ocena ryzyka harmonogramowego projektu metodą Monte Carlo**

Metoda Monte Carlo została opracowana w latach 40. przez zespół Stanisława Ulama, polskiego matematyka wywodzącego się ze Szkoły Lwowskiej. Metoda powstała podczas realizacji projektu Manhattan. Nazwa metody wiąże się z popularnym w latach 40. kasynem, w którym grywał wuj Stanisława Ulama. Celem metody jest aproksymacja prawdopodobieństwa modelowanego zjawiska na podstawie wartości zmiennych modelu losowanych z zakresów określonych dla nich rozkładów prawdopodobieństwa [22, 23].

Wynikiem analizy Monte Carlo dla projektu jest prawdopodobieństwo osiągnięcia celów projektu określane na podstawie dystrybucji rozkładu prawdopodobieństwa. W ten sposób określa się również prawdopodobieństwo osiągnięcia pośrednich kamieni milowych lub ukończenia poszczególnych pakietów prac. Dzięki ocenie różnych scenariuszy przedsięwzięć za pomocą metody Monte Carlo możliwy jest wybór najmniej ryzykownego rozwiązania [20 s. 42].

Jak wspomniano terminy zaistnienia poszczególnych zdarzeń w projekcie, ustalone metodą ścieżki krytycznej, traktowane są przez planistów, kierowników projektów i zarządy organizacji bardzo poważnie. Terminy te stają się częścią planów bazowych projektów oraz umieszczane są w kontraktach. Ostateczny termin ukończenia przedsięwzięcia staje się jednym z celów projektu. Niestety czasy trwania poszczególnych zadań, na podstawie których obliczany jest termin zakończenia projektu nie są i nie mogą być dokładne. Są one przyjmowane na podstawie wstępnych szacunków. Nawet, jeśli już kiedyś wykonywano podobny projekt i czasy realizacji poszczególnych czynności przyjęto na podstawie analogii, to i tak nie zmienia to faktu, że każdy projekt jest inny i nie można przyjmować takich założeń za pewne. Wykonanie harmonogramu projektu za pomocą specjalistycznego oprogramowania lub określenie przez kontrahentów nieprzekraczalnych terminów powodują, że planiści oraz kierownictwo przyjmuje takie założenia za wiążące. Czas trwania zadań może być dłuższy lub krótszy, niż przyjęta wstępnie wartość i powinien być określony za pomocą rozkładu prawdopodobieństwa dla ograniczonego przedziału wartości. Pomija się możliwość nie wykonania czynności wcale. Jeśli nie ma pewności, czy prawdopodobieństwo wykonania czynności jest różne dla różnych czasów jej trwania, można przyjąć do opisu tego czasu równomierny rozkład prawdopodobieństwa, jednak najczęściej wykorzystywanymi rozkładami są rozkład trójkątny lub rozkład beta. Rozkład trójkątny stosowany jest w przypadku pozyskiwania wiedzy od ekspertów, którym łatwo jest określić dolną i górną granicę przedziału rozkładu oraz wartość najbardziej prawdopodobną. Rozkład beta wymaga podania wartości średniej i odchylenia standardowego. Trudno jest takie dane pozyskać od decydentów, stąd rozkłady takie stosuje się, gdy planiści posiadają jakieś dane historyczne i można na ich podstawie dopasować rozkład prawdopodobieństwa. Jak podaje Hulett [20 s. 17] opracowano rozkład beta-PERT, który pozwala na przyjęcie trzypunktowej estymacji, jednak rozkład ten nie jest jednoznacznie określony w literaturze i zależy od inwencji producenta oprogramowania.

Czas realizacji poszczególnych czynności zależy od wielu czynników m.in. od dostępnych w projekcie zasobów, ich efektywności, zależności od innych zadań, czynników zewnętrznych. Konieczne jest więc określenie korelacji czasu trwania czynności z innymi elementami modelu. Ocena ryzyka wykonania projektu z wykorzystaniem metody Monte Carlo polega na:

- przygotowaniu modelu sieciowego przedsięwzięcia,
- określeniu rozkładów prawdopodobieństwa dla poszczególnych czynności,
- wielokrotnym obliczeniu sieci zgodnie z modelem sieciowym,
- wykonaniu rozkładu prawdopodobieństwa dla terminu zakończenia projektu oraz wybranych w symulacji zdarzeń,
- określeniu prawdopodobieństwa wykonania projektu i wybranych zdarzeń w określonym terminie,
- określeniu prawdopodobieństwa znalezienia się poszczególnych czynności na ścieżce krytycznej,
- wykonaniu analizy wrażliwości wpływu poszczególnych czynności na termin ukończenia projektu [20, 21, 22, 23].

#### 4. Analiza przypadku oceny ryzyka harmonogramowego z wykorzystaniem metody Monte Carlo

##### 4.1. Założenia przyjęte do symulacji metodą Monte Carlo

Przedmiotem badania jest złożona z 11 czynności sieć powiązań przedstawiona na rys. 1.

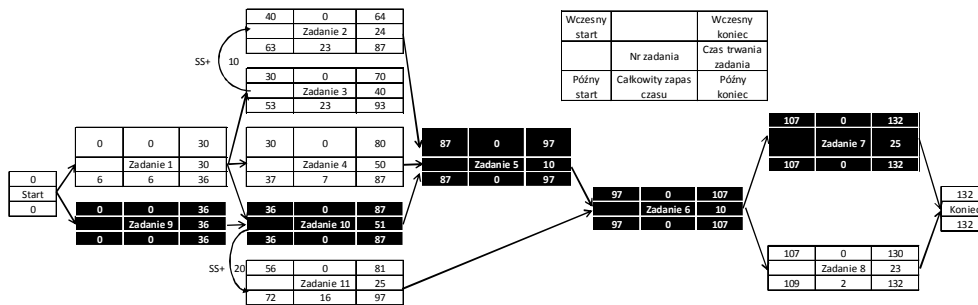
Celem analizy jest określenie z wykorzystaniem metody Monte Carlo, jakie jest prawdopodobieństwo wykonania przedstawionego przedsięwzięcia w terminie wyznaczonym metodą ścieżki krytycznej na podstawie czasów modalnych. Dodatkowo określone zostanie prawdopodobieństwo znalezienia się poszczególnych czynności na ścieżce krytycznej oraz zostanie przeprowadzona analiza wrażliwości wpływu poszczególnych czynności na termin zakończenia projektu.

Czynności leżące na ścieżce krytycznej oznaczono na rysunku 1 kolorem czarnym. W tabeli 1 przedstawiono obliczenia sieci wraz z podaniem wszystkich terminów zdarzeń. Zaznaczono również, które czynności znajdują się na ścieżce krytycznej. Czas trwania czynności określony w tabeli 1 jest czasem najbardziej prawdopodobnym, czyli najczęściej występującym.

Tab. 1. Zestawienie czynności modelowanego przedsięwzięcia. Oznaczenia: WS – wczesny start, WK – wczesny koniec, PS – późny start, PK – późny koniec, Zc – całkowity zapas czasu.

Nazwa zadania	Czynność poprzedzająca	Czas trwania czynności, dni	WS	WK	PS	PK	Zc	Ścieżka krytyczna
Zadanie 1	-	30	0	30	36	36	6	
Zadanie 2	Zadanie 3, SS+10	24	40	64	63	87	23	
Zadanie 3	Zadanie 1	40	30	70	53	93	23	
Zadanie 4	Zadanie 1	50	30	80	37	87	7	
Zadanie 5	Zadanie 2, Zadanie 4, Zadanie 10	10	87	97	87	97	0	X
Zadanie 6	Zadanie 5 Zadanie 11	10	97	107	97	107	0	X
Zadanie 7	Zadanie 6	25	107	132	107	132	0	X
Zadanie 8	Zadanie 6	23	107	130	109	132	2	
Zadanie 9	-	36	0	36	0	36	0	X
Zadanie 10	Zadanie 1, Zadanie 9	51	36	87	36	87	0	X
Zadanie 11	Zadanie 10 SS+20	25	56	81	72	97	16	
Czas trwania projektu		132		0	30	36	36	

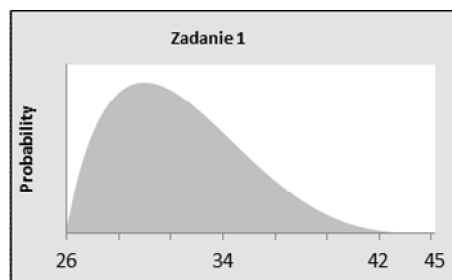
Zródło: Opracowanie własne.



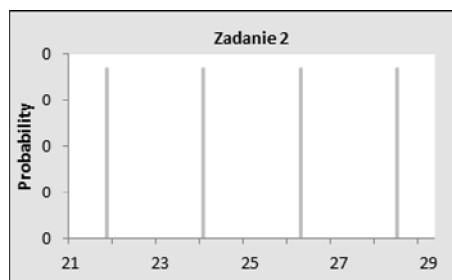
Rys. 1. Sieć powiązań modelowanego przedsięwzięcia. Czynności oznaczone kolorem czarnym leżą na ścieżce krytycznej.

Źródło: Opracowanie własne

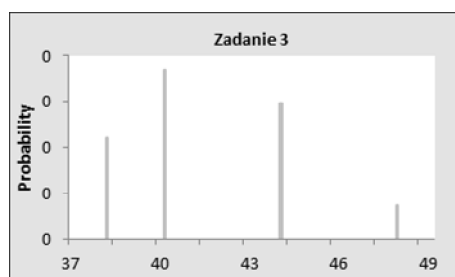
Założono, że czynności składające się na przedsięwzięcie nie będą miały przypisanego stałego czasu trwania. Każdej z czynności przypisano wybrany rozkład prawdopodobieństwa.



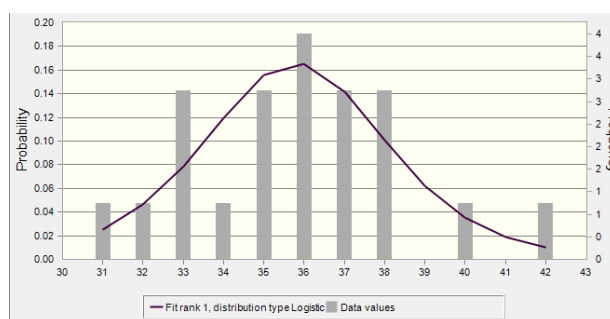
Rys. 2. Rozkład prawdopodobieństwa przyjęty dla zadania 1. Przyjęto rozkład BETA-PERT. Jako parametry rozkładu przyjęto: 26 dni – optymistyczny czas trwania zadania 1, 30 dni – czas najbardziej prawdopodobny, 45 dni – pesymistyczny czas trwania zadania 1. Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 3. Dyskretny rozkład prawdopodobieństwa dotyczący zadania 2. Podano 4 wartości rozkładu o równym prawdopodobieństwie wystąpienia. Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 4. Dyskretny rozkład prawdopodobieństwa dotyczący zadania 3. Podano 4 wartości rozkładu o różnym prawdopodobieństwie wystąpienia.  
Źródło: Opracowanie własne.



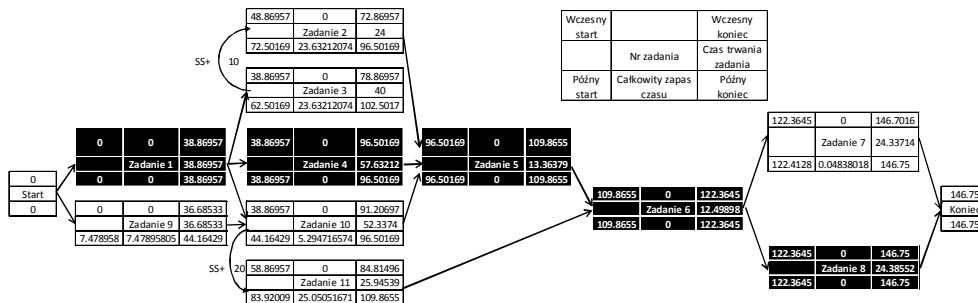
Rys. 5. Logistyczny rozkład prawdopodobieństwa dla zadania 9 został dopasowany na podstawie danych historycznych dotyczących wykonania podobnych zadań. Rozkład o średniej 36 i odchyleniu standardowym 1 dobrano na podstawie współczynnika zgodności rozkładu wg Anderson-Darling równego 0,2531.  
Źródło: Opracowanie własne.

Zadania 4÷8, 10,11 charakteryzują rozkłady trójkątne o różnych parametrach. W związku z tym, że czas trwania zadania 2 zależy od technologii przyjętej w zadaniu 3 rozkład prawdopodobieństwa zadania 2 jest skorelowany z rozkładem prawdopodobieństwa zadania 3 i czasy trwania zadania 2 ściśle zależą od określonego w każdym kroku symulacji czasu trwania zadania 3.

#### 4.2. Wyniki symulacji przeprowadzonej metodą Monte Carlo

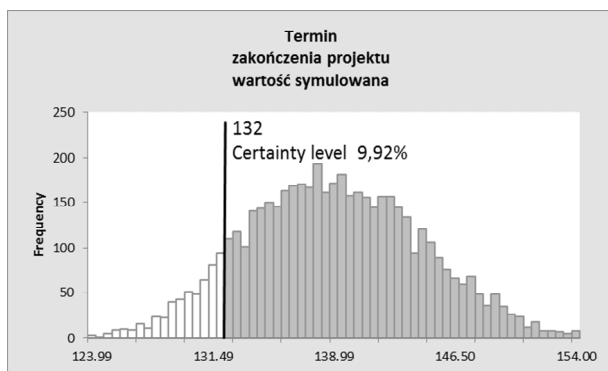
Obliczenia modelu sieciowego przeprowadzono zgodnie z metodą ścieżki krytycznej 10,000 razy losując za każdym razem wartości spośród zdefiniowanych dla poszczególnych czynności ciągłych zakresów z uwzględnieniem prawdopodobieństwa odpowiadającego wartościom z podanych przedziałów. Przykładowe obliczenia dla jednego z kroków symulacji przedstawiono na rysunku 6. Należy zwrócić uwagę, że ścieżka krytyczna zmienia swoje położenie i za każdym razem inne czynności mogą mieć wpływ na termin ukończenia projektu.





Rys. 6. Sieć powiązań modelowanego przedsięwzięcia dla jednego z kroków symulacji przeprowadzonej metodą Monte Carlo. Czynności oznaczone kolorem czarnym leżą na ścieżce krytycznej.

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Wykres gęstości prawdopodobieństwa rozkładu wyników symulacji dotyczących terminu zakończenia projektu

Źródło: Opracowanie własne

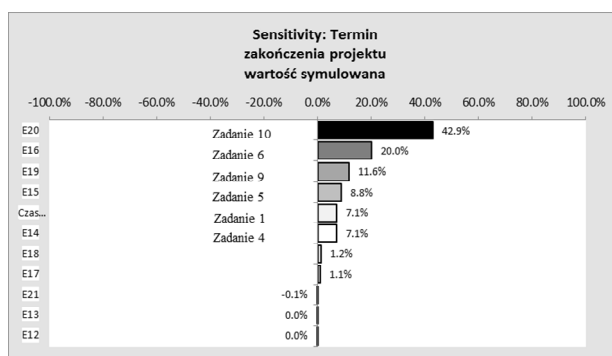
Po przeprowadzeniu symulacji wyznaczono rozkład prawdopodobieństwa wartości odpowiadających terminowi ukończenia projektu. Prawdopodobieństwo ukończenia projektu w terminie 132 dni, zgodnie z obliczeniami wykonanymi metodą ścieżki krytycznej dla założonych najbardziej prawdopodobnych terminów wykonania czynności wynosi niespełna 10%. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 7.

W związku z tym, że w czasie symulacji różne czynności mogą znaleźć się na ścieżce krytycznej, wyznaczono prawdopodobieństwo znalezienia się każdej czynności na tej ścieżce. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 2. Dodatkowo określono wpływ, jaki poszczególne zadania mają na termin ukończenia projektu. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 8.

Tab. 2. Zestawienie wartości prawdopodobieństwa znalezienia się wszystkich czynności projektu na ścieżce krytycznej

Nazwa zadania	Prawdopodobieństwo znalezienia się zadania na ścieżce krytycznej
Zadanie 1	0.3694
Zadanie 2	0
Zadanie 3	0
Zadanie 4	0.29
Zadanie 5	1
Zadanie 6	1
Zadanie 7	0.5694
Zadanie 8	0.4306
Zadanie 9	0.6306
Zadanie 10	0.71
Zadanie 11	0

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Wykres wrażliwości terminu ukończenia projektu w zależności od zadania  
Źródło: Opracowanie własne

#### 4.3. Wnioski dotyczące symulacji metodą Monte Carlo

Wykonanie obliczeń metodą ścieżki krytycznej dla najbardziej prawdopodobnych czasów wykonania zadań wskazało na termin ukończenia projektu w ciągu 132 dni. Po przeprowadzeniu symulacji, podczas której czasy trwania zadań były losowane 10,000 razy okazało się, że nie ma podstaw do przyjęcia jako terminu dyrektywnego terminu wyznaczonego w obliczeniach metodą ścieżki krytycznej, ponieważ jest tylko 10% prawdopodobieństwo, że termin ten zostanie dotrzymany. Również nie można przyjąć za pewne zestawienia czynności leżących na ścieżce krytycznej wyznaczonych metodą CPM. Z obliczeń przeprowadzonych metodą Monte Carlo wynika, że z prawdopodobieństwem ponad 60% jeszcze dwie czynności mogą znaleźć się na ścieżce krytycznej, co w

wybranych przypadkach może skutkować brakiem nadzoru nad czynnościami wstępnie nie zakwalifikowanymi jako krytyczne.

Na termin ukończenia projektów w 43% ma wpływ zadanie 10, a w dalszej kolejności zadania 6, 9, 5, 1 i 4. Na zadania te należy zwracać szczególną uwagę. Pozostałe zadania, zgodnie z prawem Pareto mają nieielki wpływ na termin ukończenia projektu.

Model obliczony metodą ścieżki krytycznej dla najbardziej prawdopodobnych czasów wykonania zadań nie powinien być przyjmowany do realizacji z uwagi na małe prawdopodobieństwo wykonania projektu w terminie.

## 5. Podsumowanie

Metoda Monte Carlo może znaleźć zastosowanie do strategicznej oceny różnych parametrów przedsięwzięć. W niniejszej pracy przedstawiono ocenę terminu ukończenia projektu w zależności od czasów trwania zadań składających się na projekt. Analiza ta może być bardziej skomplikowana i wieloaspektowa. Może dotyczyć m.in. kosztów projektu, wykorzystywanych zasobów, jakości wykonywanych prac, terminów osiągnięcia punktów kontrolnych (kamieni milowych). Wszystko zależy od przygotowanego modelu przedsięwzięcia i powziętych założeń.

Decydenci mając wiedzę o prawdopodobieństwie zaistnienia różnych zdarzeń w projekcie w większym zastanowieniem umieszczaliby w kontraktach zapisy trudne do wykonania, a skutkujące wysokimi karami i utratą wizerunku organizacji realizującej projekt.

## Literatura

1. M. Langley: 2012. Wypowiedź z 2012 r. na stronie portalu The PM Chanel. <http://www.thepmchannel.com/videoPlayer/?vid=504&cid=633>. Dostęp 13.08.2013.
2. <http://ipma.ch>, strona internetowa stowarzyszenia zarządzania projektami - International Project Management Association, dostęp 14.12.2013.
3. <http://www.pmi.org>, strona internetowa stowarzyszenia zarządzania projektami - Project Management Association, dostęp 14.12.2013.
4. Office of Government Commerce (OGC) – organizacja opracowująca metodykę PRINCE2, literatura dotycząca metodyki oferowane jest przez APMG: <http://www.apmgroupltd.com>, strona internetowa stowarzyszenia zarządzania projektami - Association of Project Management, dostęp 14.12.2013.
5. ICB: IPMA Competence Baseline. v. 3.0. International Project Management Association, Nijkerk, the Netherlands, 2006.
6. PMBoK: A Guide to the Project Management. Body of Knowledge. Project Management Institute Standard Committee, Upper Derby, 2008
7. PRINCE2. Skuteczne zarządzanie projektami. OGC, [tł. i oprac.wersji polskiej zespół red. Iwona Semik-Żbikowska], TCO, Londyn, 2005.
8. PRINCE2. Skuteczne zarządzanie projektami. OGC, [tł. i oprac.wersji polskiej zespół red. Iwona Semik-Żbikowska], TCO, Londyn, 2009.
9. Opóźnienie w budowie drugiej linii metra w Warszawie. Rzeczpospolita, 23-02-2013, <http://www.rp.pl/artykul/983726-Opoznienie-w-budowie-drugiej-linii-metra-w-Warszawie.html>, dostęp 14.12.2013.
10. Zmiana terminu zakończenia budowy II linii metra. Oświadczenie na stronie internetowej Urzędu Miasta Stołecznego Warszawy, 8.12.2013,

- <http://www.um.warszawa.pl/aktualnosci/zmiana-terminu-zako-czenia-budowy-ii-linii-metra>, dostęp 14.12.2013.
11. I., Kacprzak: Teraz opóźnienia na A1? Rzeczpospolita, 16.06.2011  
<http://archiwum.rp.pl/artykul/1057230-Teraz-opoznienia-na-A1-.html>, dostęp 14.12.2013.
  12. A., Stefańska: Zatrzymane autostrady. Rzeczpospolita, 08.07.2008,  
<http://www.ekonomia.rp.pl/artykul/159727-Zatrzymane-autostrady-.html>, dostęp 14.12.2013.
  13. A., Stefańska, A., Cieślak-Wróblewska: Budowa autostrad się opóźni. Rzeczpospolita 06.03.2008,  
<http://www.ekonomia.rp.pl/artykul/102628-Budowa-autostrad-sie-opozni.html>, dostęp 14.12.2013.
  14. Strona internetowa Warszawskiego Metra, informacja o historii budowy metra.  
<http://www.metro.waw.pl/historia-budowy-metra-w-warszawie.html>, dostęp 14.12.2013.
  15. M., Vanhoucke: Project Management with Dynamic Scheduling. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
  16. C., Desmond: Project Management for Communication Managers. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
  17. R., Walczak: Podstawy zarządzania projektami. Metody i przykłady. Difin, Warszawa, 2014.
  18. J.C., Goodpasture: Quantitative Methods in Project Management. J. Ross Publishing, Incorporated, Boca Raton, FL, USA, 2003
  19. E., Goldratt: Łańcuch krytyczny: projekty na czas. Mint Books, Warszawa, 2009.
  20. D., Hilson: Managing Risk in Projects. Ashgate Publishing Group, Abingdon, Oxon, GBR, 2009.
  21. D., Hulett: Practical Schedule Risk Analysis. Ashgate Publishing Group, Abingdon, Oxon, GBR, 2009.
  22. I., Dimov, D., McKee: Monte Carlo Methods for Applied Scientists. World Scientific, River Edge, NJ, USA, 2007.
  23. J. Anderson: Quantum Monte Carlo : Origins, Development, Applications. Oxford University Press, Cary, NC, USA, 2007.

Dr hab. inż. Renata Walczak  
Kolegium Nauk Ekonomicznych i Społecznych  
Politechnika Warszawska  
09-400 Płock, ul. Łukasiewicza 17  
tel. +48 692 411 881  
tel./fax: +48 24 262 90 08  
e-mail: [rpwalcza@pw.plock.pl](mailto:rpwalcza@pw.plock.pl)