



Robin Cahierre

École des Ponts ParisTech
robincahierre@gmail.com

Dorota Kuchta

Politechnika Wroclawska
Wydział Informatyki i Zarządzania
Katedra Systemów Zarządzania
dorota.kuchta@pwr.wroc.pl

Anna Ślusarczyk

Politechnika Wroclawska
Wydział Informatyki i Zarządzania
Katedra Systemów Zarządzania
anna.slusarczyk@pwr.wroc.pl

ZASTOSOWANIE BUFORÓW W HARMONOGRAMOWANIU PROJEKTÓW¹

Streszczenie: W artykule analizuje się buforów czasowe jako narzędzie zapewnienia stabilności harmonogramu projektu. Bufory czasowe są znane w literaturze, ale nie ma zgodności co do sposobu wyznaczania ich wielkości. Większość znanych w literaturze metod nie uwzględnia cech charakterystycznych projektu i jego zadań bądź uwzględnia je w sposób niewystarczający. W artykule omawia się kilka metod wyznaczania wielkości buforów uwzględniających te charakterystyki, a następnie, na podstawie analizy rzeczywistego projektu, poddaje się te metody weryfikacji.

Słowa kluczowe: zarządzanie czasem projektu, stabilność harmonogramu, buforów czasowe.

Wprowadzenie

Truizmem jest stwierdzenie, że w zarządzaniu projektem bardzo ważny jest czas. Projekt trzeba rozplanować w czasie, aby móc zapewnić odpowiednie zasoby i odpowiednie warunki realizacji projektu w odpowiednim momencie. Ale dodatkowo zazwyczaj niezbędne jest zadbanie o to, by plan był stabilny (np.

¹ Praca finansowana z grantu Narodowego Centrum Nauki nr 2011/01/B/HS4/02821 „Rozmiar i rozmieszczenie buforów w proaktywnym i reaktywnym zarządzaniu ryzykiem przekroczenia czasu przez projekt”.

[Herroelen i Leus, 2004]). Istnieją różne definicje stabilności planu czy harmonogramu (tutaj plan projektu zawężamy do harmonogramu), która czasem jest nazywana odpornością czy elastycznością (np. [Herroelen i Leus, 2004; Sabuncuoglu i Goren, 2009; Kuchta, 2014; Kobylański i Kuchta, 2007]), ale generalnie ich istotą jest to, by w razie zmian czy nieprzewidywanych wydarzeń uniknąć zbyt dużych zakłóceń w terminach realizacji danego projektu czy pozostałej działalności danej organizacji – takich, które podważyłyby wiarygodność organizacji wobec kluczowych interesariuszy czy spowodowały zagrożenie dla jej podstawowych interesów czy celów.

W niniejszym artykule omawiane jest jedno z narzędzi pozwalających zapewnić stabilność harmonogramu: bufory czasowe. Omówiono i rozszerzono znane z literatury metody wyznaczania buforów i przedstawiono wyniki eksperymentu, jakim była próba zastosowania tych metod w rzeczywistym projekcie z sektora publicznego. Celem artykułu jest nie tyle wskazanie gotowych rozwiązań dotyczących wyznaczania wielkości buforów, ile raczej wskazanie na problem, jakim jest niejednoznaczność i brak gotowych rozwiązań w tym zakresie oraz na konieczność weryfikacji każdej metody w rzeczywistym środowisku, na konkretnych projektach realizowanych przez daną organizację.

1. Sformułowanie problemu

W niniejszym artykule harmonogram stabilny to taki harmonogram, w którym w przypadku nieprzewidywanych wydarzeń zostaną naruszone jedynie terminy zakończenia pojedynczych zadań (czyli czynności – te dwa pojęcia traktujemy jako synonimy) projektu, ale terminy rozpoczęcia wszystkich czynności i planowany termin zakończenia całego projektu pozostaną niezmiennione.

Jak już wspomniano, jednym z narzędzi pomagających w zapewnieniu stabilności harmonogramu są bufory czasowe. Bufory to dodatkowa ilość czasu zaplanowana w projekcie na wypadek nieprzewidywanych czy niepewnych zdarzeń, która nie jest podawana wszystkim zainteresowanym. Zna ją kierownik projektu, ale osoby bezpośrednio wykonujące dane zadania niekoniecznie. Osoby te zdają sobie zazwyczaj sprawę z istnienia buforów, ale nie znają ich wielkości. Psychologicznie oznacza to najczęściej, że starają się one dotrzymać podanego im terminu (nieuwzględniającego bufora) i nawet jeśli ostatecznie bufor zostanie jednak w jakimś stopniu wykorzystany, to rzeczywisty termin zakończenia zadania czy projektu jest wcześniejszy niż w przypadku, gdyby bufory były włączone do czasów znanych zespołowi projektowemu i traktowane tak samo, jak czasy podstawowe.

Pod pojęciem czasu podstawowego rozumiemy tutaj czas trwania zadania oszacowany dla warunków „normalnych”, przy założeniu niewystępowania problemów i zakłóceń. Pojęcie to nie jest ściśle zdefiniowane i w przypadku każdego projektu może być interpretowane nieco inaczej. Czas podstawowy to czas, który będzie przekazany zespołowi projektowemu jako oficjalnie będący do jego dyspozycji. Czynniki ludzkie będą decydowały o tym, czy w danym przypadku ten czas będzie bardziej czy mniej restrykcyjny.

Bufory, jak wspomniano, są czasem dodatkowym, znanym tylko wyższemu szczeblowi zarządzania. Problem polega na tym, w których miejscach harmonogramu należy wstawić bufor i jaka powinna być ich wielkość. W niniejszym artykule przyjmujemy jedno z możliwych podejść co do umiejscowienia buforów – będą one umieszczane po każdej czynności projektu, co wynika z przyjętej definicji stabilności harmonogramu. Rozważany tutaj problem dotyczy wielkości buforów. Różne metody wyznaczania wielkości buforów zostały zastosowane w rzeczywistym projekcie z sektora publicznego i zestawione z czasami rzeczywistymi oraz czasami wygenerowanymi za pomocą generatora losowego. Pytanie brzmiało, czy bufor, wyznaczone za pomocą różnych metod, byłyby:

- a) wystarczające dla zapewnienia stabilności harmonogramu (zgodnie z podaną wyżej definicją);
- b) nie za duże – bufor nie powinny zmuszać organizacji do nadmiernej ostrożności, która oznaczałaby niepotrzebną blokadę czasu i zasobów, chyba że jest to uzasadnione charakterem projektu i szczególnymi konsekwencjami ewentualnych opóźnień.

2. Przegląd stanu wiedzy

Jeśli chodzi o problem umiejscowienia buforów w harmonogramie projektu, to można wyróżnić dwa główne podejścia [Vonder i in., 2005]. Pierwsze wywodzi się z metody łańcucha krytycznego i polega na tym, że bufor jest umieszczany na końcu pewnego ciągu zadań następujących jedno po drugim. Jest to zatem bufor wspólny dla większej liczby zadań, który ma absorbować problemy związane z wykonywaniem wszystkich tych zadań. To podejście nie zapewnia stabilności harmonogramu w sensie definicji z poprzedniego rozdziału, która wymaga, by chronione były również terminy rozpoczęcia poszczególnych zadań – czyli, jeśli podczas wykonywania jednego z zadań wystąpi opóźnienie, to nie powinno ono wpłynąć na realizację innych zadań. Niemniej jednak metoda łańcucha krytycznego, choć przyjmuje inną, słabszą definicję stabilności harmono-

gramu, najbardziej przyczyniła się do wzrostu zainteresowania buforami czasowymi. Przede wszystkim dla tej metody zostały sformułowane różne sposoby wyznaczania wielkości buforów [Tukel i in., 2006; Kuchta i Ślusarczyk, 2013; Ślusarczyk i in., 2013]. Wielkość bufora w dotychczasowej literaturze jest zawsze funkcją podstawowych długości zadań oraz, w zależności od podejścia, współczynnika ryzyka poszczególnych czynności czy wariancji oszacowania ich długości. Parametry te mają być podawane przez ekspertów. W literaturze nie ma niestety żadnych dokładniejszych wytycznych, jak te parametry wyznaczać.

W niniejszym artykule zakładamy takie rozmieszczenie buforów, które zapewni stabilność harmonogramu w sensie definicji z poprzedniego rozdziału. Bufory mogą być zatem potencjalnie umieszczane po każdym zadaniu (w [Vonder i in., 2005] można znaleźć porównanie tych dwóch podejść do rozmieszczenia buforów). W literaturze nie ma wielu informacji na temat wyznaczania wielkości tak umieszczanych buforów. Podobnie jak w przypadku metody łańcucha krytycznego, autorzy proponują zazwyczaj uzależnienie wielkości bufora od podstawowego czasu trwania zadania i od jego stopnia ryzyka, szacowanego przez ekspertów [Herroelen i Leus, 2004; Kobyłański i Kuchta, 2007]. W [Ślusarczyk i Kuchta, 2012, 2013] został zaproponowany bardziej złożony sposób wyznaczania buforów, pozwalający na uwzględnienie różnorodności sytuacji, typów projektów i rodzajów problemów występujących w praktyce. W kolejnym rozdziale podejście to zostanie przedstawione i uzupełnione.

3. Wybrane podejście do wyznaczania wielkości buforów i jego uzupełnienie

Podejście zaproponowane w [Ślusarczyk i Kuchta, 2012, 2013] można streścić następująco:

Niech $\{A_i\}_{i=1}^N$ będzie zbiorem zadań projektu. Dla każdego zadania definiujemy podstawową długość $d_i, i = 1, \dots, N$ (czyli podstawowe oszacowanie długości trwania zadania, ustalone przy współdziałaniu bezpośrednich wykonawców zadania i podawane im potem do wiadomości jako obowiązujące) i współczynnik $C_i, i = 1, \dots, N$, reprezentujący stopień ryzyka, że dane zadanie będzie trwało dłużej niż d_i . Współczynnik C_i , nazywany odąd współczynnikiem ryzyka zadania, jest funkcją parametrów $v_{ij}, w_{ij}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M_i$, gdzie M_i jest liczbą czynników ryzyka (będą one dokładniej omówione w kolejnym rozdziale) dla zadania A_i , których zbiór oznaczany będzie jako $F_i = \{F_{ij}\}_{j=1}^{M_i}$, v_{ij} wartością j -tego czynnika ryzyka dla zadania A_i , reprezentującą względną wielkość moż-

liwego przedłużenia czasu trwania zadania A_i ponad oszacowanie d_i , spowodowanego j -tym czynnikiem ryzyka dla zadania A_i , a w_{ij} wagą wpływu tego czynnika.

Czynniki ryzyka, ich siła i względna wielkość wpływu na rzeczywisty czas trwania zadania są określane przez ekspertów. W [Ślusarczyk i Kuchta, 2012] można znaleźć przykładowe czynniki ryzyka, są one również podane w następnym rozdziale. Ważne jest to, że zbiory F_i dla różnych $i = 1, \dots, N$ nie muszą być rozłączne. Zazwyczaj będzie nawet tak, że zbiór $\bigcap_{i=1}^N F_i$ będzie niepusty. Będzie on reprezentował cechy całego projektu, które mogą mieć wpływ na czasy trwania wszystkich zadań.

Przyjmujemy, że współczynnik C_i ma być wyznaczony w taki sposób, by wielkość $C_i d_i$, $i = 1, \dots, N$ z dużym prawdopodobieństwem była nie mniejsza od rzeczywistego czasu trwania zadania A_i . Oczywiście jednocześnie chodzi o to, by nie była ona zbyt duża, by niepotrzebnie nie blokować czasu i zasobów. Czas i zasoby dla zadania A_i będą bowiem zarezerwowane właśnie na okres $C_i d_i$, przy czym czas d_i będzie podany do wiadomości zespołowi projektowemu, a pozostały czas, $B_i = C_i(d_i - 1)$, będzie buforem znanym tylko wyższemu szczeblowi zarządzania.

Ślusarczyk i Kuchta [2012, 2013] podają następującą propozycję wyznaczania współczynnika C_i , a tym samym bufora B_i ($i = 1, \dots, N$):

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} w_{ij} v_{ij}}{\sum_{j=1}^{M_i} w_{ij}}. \quad (1)$$

W eksperymencie opisanym w kolejnym rozdziale wykorzystano dwie nowe propozycje wyznaczania współczynnika ryzyka zadania. Potrzeba sformułowania nowych propozycji jest zainspirowana badaniami zamieszczonymi w literaturze, dotyczącymi wielkości buforów w metodzie łańcucha krytycznego, a zebranych np. w [Kuchta i Ślusarczyk, 2013] i [Verhulst i in., 2013]. W badaniach tych eksperymentalnie sprawdza się uzasadnienie stosowania różnych formuł, bowiem wybór jednej obowiązującej w każdym przypadku formuły wydaje się niemożliwy – w różnych typach projektów i organizacji mogą się lepiej sprawdzać różne zależności. Formuła (1) reprezentuje średnią ważoną wpływu czynników ryzyka, ale warto rozważyć inne jeszcze zależności. W formułach (2) i (3) zaproponowano dwie z nich.

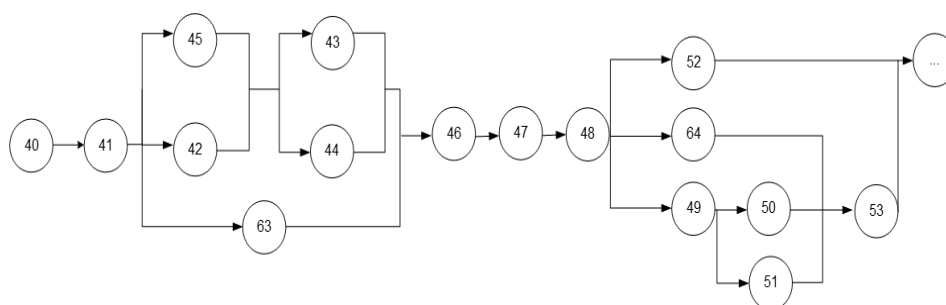
$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} v_{ij}}{M_i} \quad (2)$$

$$C_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^{M_i} w_{ij} (v_{ij})^{p_{ij}}}{\sum_{j=1}^{M_i} w_{ij}} \right)^{\frac{1}{\sqrt{\prod_{j=1}^{M_i} p_{ij}}}} \quad (3)$$

Formuła (2) nie uwzględnia wag (bądź opiera się na założeniu, że wagi wszystkich czynników ryzyka są równe), formuła (3) pozwala zmniejszyć lub wzmacnić wpływ poszczególnych czynników poprzez rozpatrywanie uogólnionej średniej potęgowej. Oczywiście możliwe byłyby inne jeszcze formuły. Celem badań było sprawdzenie, w jakim stopniu wybór formuły na wpływ na wyniki. Eksperyment został tak zaprojektowany, by weryfikacji poddać formułę najprostszą (formułę (2), nazywaną odtąd metodą I), formułę o średniej trudności (formułę (1), nazywaną odtąd metodą II) i formułę najbardziej skomplikowaną (formułę (3), nazywaną odtąd metodą III). Proponowane podejście ma być stosowane w praktyce, m.in. w samorządach realizujących projekty publiczne, a przy takich zastosowaniach problem prostoty stosowanych wzorów ma znaczenie psychologiczne [Ślusarczyk i Kuchta, 2012].

4. Weryfikacja wybranego podejścia

Podejście zaproponowane w literaturze i uzupełnione w niniejszym artykule, zebrane w formułach (1), (2), (3), zostało zastosowane w jednym z samorządów w Polsce do fragmentu projektu, którego celem była modernizacja sieci tramwajowej [Ślusarczyk i Kuchta, 2012]. Schemat sieciowy rozpatrywanego fragmentu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Sieć przykładowego projektu

Źródło: Ślusarczyk i Kuchta [2012].

Dla projektu z rys.1 zostały określone podstawowe czasy trwania zadań ($d_i, i = 1, \dots, N$) dla warunków normalnych (tabela 1). Zostały one określone przed rozpoczęciem projektu. Harmonogram projektu został opracowany w sposób tradycyjny, bez zastosowania buforów, i był oparty właśnie na tych czasach.

Po zakończeniu projektu część zespołu projektowego została poproszona o podanie oszacowań czasów trwania zadań na przypadek niekorzystny. Czasy

te, oznaczane jako $D_i, i \in I = \{40, 41, \dots, 52, 53, 63, 64\}$ (tabela 1), miały reprezentować ostrożne, wolne od ryzyka czasy trwania, takie, w których wykonanie odpowiednich zadań powinno się z dużym prawdopodobieństwem „zmieścić”. Zatem $D_i, i = 1, \dots, N$ miały *de facto* reprezentować czas trwania zadania obejmujący bufor (tak jak został on zdefiniowany w poprzednim rozdziale), tyle że wyznaczony intuicyjnie, bez bezpośredniego i systematycznego uwzględniania czynników ryzyka. Czasy $D_i, i = 1, \dots, N$ były potrzebne w drugiej części eksperymentu, aby na podstawie par $(d_i, D_i), i = 1, \dots, N$ wygenerować rozkłady prawdopodobieństwa czasów trwania poszczególnych zadań dla celów symulacji.

W pierwszej części eksperymentu należało zidentyfikować i oszacować czynniki ryzyka dla zadań projektu z rys.1. Poproszono o to (również po zakończeniu projektu) drugą część zespołu projektowego.

Czynniki ryzyka podzielono na czynniki globalne (dotyczące potencjalnie całego projektu, czyli każdej czynności) i lokalne (dotyczące pojedynczych czynności). Wyróżniono pięć globalnych czynników ryzyka: nowość czynności, jej złożoność, nowość (brak doświadczenia, brak zgrania z zespołem) zasobów ludzkich wykonujących daną czynność, brak elastyczności tych zasobów, nierzetelność zasobów ludzkich. Wartość wpływu każdego czynnika $(v_{ij}, i \in I, j = 1, \dots, 5)$ mogła przyjąć wartość od 1 do 5, przy czym wyższa wartość oznacza wyższy stopień występowania danej cechy. Podobny zakres wartości miały wagi $w_{ij}, i \in I, j = 1, \dots, 5$. Odpowiednie wartości można znaleźć w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe i wolne od ryzyka oszacowania czasu trwania zadań oraz wartości wpływu i wagi globalnych czynników ryzyka dla zadań projektu z rys. 1

i	D_i	d_i	Nowość		Złożoność		Nowość zasobów ludzkich		Brak elastyczności zasobów ludzkich		Nierzetelność zasobów ludzkich	
			v_{ij}	w_{ij}	v_{ij}	w_{ij}	v_{ij}	w_{ij}	v_{ij}	w_{ij}	v_{ij}	w_{ij}
40	10	7	1	2	2	3	2	2	1	1	2	2
41	9	5	1	2	3	3	2	1	1	1	1	2
42	17	9	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
43	17	8	1	1	2	3	2	1	1	1	1	2
44	14	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	13	7	2	2	2	3	2	1	1	1	1	2
46	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	10	6	1	2	2	3	2	2	1	1	2	2
48	9	5	1	2	3	3	2	1	1	1	1	2
49	13	6	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
50	16	8	1	1	2	3	2	1	1	1	1	2
51	16	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
52	4	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1	2
53	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
63	23	13	3	2	2	2	3	2	1	1	2	3
64	14	12	3	2	2	2	3	2	1	1	2	3

Źródło: Ślusarczyk i Kuchta [2012].

Zidentyfikowano również i oszacowano czynniki lokalne, mające wpływ tylko na niektóre zadania. Były to problemy ze sprzętem komputerowym, problemy organizacyjne, problemy z dostawcami, problemy pogodowe, problemy dotyczące fizycznych charakterystyk placu budowy, problemy związane ze stosowaniem nowej technologii. Rozróżnienie lokalnych i globalnych czynników ryzyka pozwala na odróżnienie cech charakterystycznych całego projektu (cechy globalne, które mogą się przydać przy konstruowaniu baz danych służących gromadzeniu doświadczeń dla różnych typów projektów) od cech poszczególnych zadań (które mogą zostać wykorzystane przy opracowywaniu typologii zadań mogących występować w różnego typu projektach). Odpowiednie wartości zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości wpływu i wagi lokalnych czynników ryzyka dla zadań projektu z rys. 1

<i>i</i>	<i>D_i</i>	<i>d_i</i>	Sprzęt komputerowy		Problemy organizacyjne		Dostawcy		Pogoda		Plac budowy		Technologia	
			<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>	<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>	<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>	<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>	<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>	<i>v_{ij}</i>	<i>w_{ij}</i>
40	10	7			3	4			2	4				
41	9	5	3	3							3	4		
42	17	9					2	4						
43	17	8					2	4						
44	14	8					2	4						
45	13	7	3	2										
46	3	2											3	4
47	10	6			3	4			2	4				
48	9	5	3	3							3	4		
49	13	6					2	4						
50	16	8					2	4						
51	16	9					2	4						
52	4	2	3	2										
53	3	2											3	4
63	23	13									3	4		
64	14	12									3	4		

Źródło: Ślusarczyk i Kuchta [2012].

Następnie zastosowano wzory (1) (metoda II), (2) (metoda I), (3) (metoda III, przy założeniu dla celów eksperymentu $p_{ij} = \frac{4}{3}, i \in I, j = 1, \dots, 11$) – w rzeczywistych zastosowaniach powinny być testowane różne wartości p_{ij} do określenia wielkości buforów dla ścieżki krytycznej projektu z rys. 1, wyznaczonej na podstawie podstawowych czasów trwania. Wielkości buforów przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości buforów dla ścieżki krytycznej projektu przy różnych sposobach wyznaczania współczynnika ryzyka zadania

Czynność na ścieżce krytycznej	Wielkość bufora B_i		
	metoda I	metoda II	metoda III
40	6	7	7,7
41	5	7	6,9
42	3	5	5,4
43	4	5,33	5,6
46	0,67	1,78	2,0
47	5	5	6,6
48	5	7	7,0
49	2	3,33	3,6
51	1,5	4	4,5
53	0,67	1,78	2,0

W tabeli 4 zaprezentowano długości poszczególnych czynności ze ścieżki krytycznej obejmujące bufor (czyli długości $d_i + B_i$, $i \in I$, niepodawane zespołowi projektowemu, lecz znane wyłącznie wyższemu szczeblowi zarządzania), wyznaczone zgodnie z trzema proponowanymi sposobami wyznaczania współczynników ryzyka, a tym samym buforów. W drugiej kolumnie tabeli 4 podano rzeczywiste czasy trwania poszczególnych zadań. Druga liczba w kolumnach 3, 4 i 5 jest różnicą między rzeczywistym czasem trwania zadania (tr_i , $i \in I$) a oszacowaniem $d_i + B_i$, $i \in I$.

Tabela 4. Rzeczywisty czas trwania i czas oszacowany jako suma oszacowania podstawowego i buforów dla ścieżki krytycznej projektu z rys. 1 przy różnych sposobach wyznaczania współczynnika ryzyka zadania

i	Rzeczywisty czas trwania tr_i	$d_i + B_i / (d_i + B_i) - tr_i$		
		metoda I	metoda II	metoda III
40	9	13/4	14/5	14,7/5,7
41	8	10/2	12/4	11,9/3,9
42	11	12/1	14/3	14,4/3,4
43	11	12/1	13,33/2,33	13,6/2,6
46	2	2,7/0,7	3,78/1,78	4/2
47	8	11/3	11/3	12,6/4,6
48	8	10/2	12/4	12/4
49	10	8/-2	9,33/-0,67	9,6/-0,4
51	9	10,5/1,5	13/4	13,5/4,5
53	2	2,7/0,7	3,78/1,78	4/2
Maksymalne odchylenie od czasu rzeczywistego w procentach	$\max_{i \in I} \left[\frac{(d_i + B_i) - tr_i}{tr_i} \right]$	44%	89%	100%
Przeciętne odchylenie od czasu rzeczywistego w procentach	$\frac{\sum_{i \in I} (d_i + B_i) - tr_i}{tr_i} / 10$	22%	46%	52%

Jak widać, bufor okazałyby się wystarczające dla wszystkich zadań poza zadaniem 49, dla którego w przypadku wszystkich trzech metod bufor byłby niewystarczający. W przypadku tego zadania najmniejsze problemy wystąpiłyby przy metodzie III. Jednak metoda III, z punktu widzenia całego projektu, okazała się zbyt ostrożna – ogólnie bufor byłyby zbyt duże, co spowodowałyby, przy ich zastosowaniu w harmonogramie, niepotrzebnie długą blokadę czasu i zasobów – pokazują to ostatnie dwa wiersze ostatniej kolumny. Podobnie metoda II wykazałaby zbyt dużą ostrożność. Metoda I byłaby mniej „szczodra” przy generowaniu buforów i przy niej straty poniesione na niepotrzebną blokadę czasu i zasobów byłyby najmniejsze, jednak w jej przypadku bufor dla zadania 49 okazałyby się na tyle krótki, że różnica między rzeczywistym czasem trwania zadania, wynoszącym $tr_{49} = 10$, a wartością $d_{49} + B_{49}$, stanowiłaby 25% czasu rzeczywistego, co mogłoby spowodować znaczne perturbacje w organizacji ze względu na konieczność naglego zapewnienia zasobów i czasu, które nie były zaplanowane. Przy podejmowaniu ostatecznej decyzji trzeba brać pod uwagę fakt, że metoda I jest najprostsza w zastosowaniu, stawia ekspertom najmniej wymagań co do koniecznych informacji. Jeśli problemy z zadaniem 49 byłyby problemami o małej wadze, metoda ta byłaby w rozpatrywanym przypadku najlepsza.

Jak wspomniano wyżej, w drugiej części eksperymentu wykorzystano pary $(d_i, D_i), i = 1, \dots, N$ do określenia rozkładów czasów trwania poszczególnych zadań dla celów symulacji. Przyjęto założenie, że rozkłady czasów trwania zadań mają rozkład normalny, d_i reprezentuje wartość średnią czasu trwania zadania A_i , a D_i jest wartością, dla której dystrybuanta odpowiedniego rozkładu normalnego przyjmuje wartość 0,9. Następnie wygenerowano 5 losowych wartości długości zadań ze ścieżki krytycznej projektu z rys. 1 (za pomocą algorytmu zaproponowanego w [Kinderman i Monahan, 1977]) i porównano je z długościami podstawowymi powiększonymi o bufor przy różnych metodach wyznaczania współczynnika ryzyka (długości te są widoczne w tabeli 4). Wyniki zostały przedstawione w tabelach 5 i 6.

Tabela 5 pokazuje długości zadań wygenerowane za pomocą generatora losowego (było 5 przebiegów symulacji) oraz maksymalną i średnią wartość wygenerowaną dla każdego z zadań (oznaczoną, odpowiednio, $Maks g_i$ i $\acute{S}rg_i$):

Tabela 5. Długości zadań ze ścieżki krytycznej projektu z rys. 1 wygenerowane losowo, ich wartości maksymalne i średnie

i	Przebieg 1	Przebieg 2	Przebieg 3	Przebieg 4	Przebieg 5	$Maks g_i$	$\acute{S}rg_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
40	8,41	7,52	6,1	4,16	5,82	8,41	6,40
41	6,1	6,96	4,2	5,21	4,5	6,96	5,39
42	16,64	13,77	7,2	7,51	7,01	16,64	10,43
43	9,76	6,34	12,24	18,81	11,04	18,81	11,64

cd. tabeli 5

1	2	3	4	5	6	7	8
46	1,86	3,22	2,02	1,18	2,56	3,22	2,17
47	9,21	5,4	6,62	3,35	7,44	9,21	6,40
48	3,27	5,05	6	4,58	5,34	6,00	4,85
49	7,75	3,01	7,47	4,55	5,25	7,75	5,61
51	9,29	14,3	9,81	5,36	10,39	14,30	9,83
53	3,08	1,75	2,57	2,62	2,37	3,08	2,48

Tabela 6 zawiera procentowe odchylenia długości zadań z buforami wyznaczonymi różnymi metodami od długości zadań generowanych losowo.

Tabela 6. Procentowe odchylenia długości zadań z buforami wyznaczonymi poszczególnymi metodami od długości generowanych losowo

<i>i</i>	$\frac{(d_i + B_i) - Maks_{g_i}}{Maks_{g_i}}$			$\frac{(d_i + B_i) - \hat{S}r_{g_i}}{\hat{S}r_{g_i}}$		
	metoda I	metoda II	metoda III	metoda I	metoda II	metoda III
40	55%	66%	75%	103%	119%	130%
41	44%	72%	71%	85%	122%	121%
42	-28%	-16%	-13%	15%	34%	38%
43	-36%	-29%	-28%	3%	15%	17%
46	-16%	17%	24%	25%	74%	85%
47	19%	19%	37%	72%	72%	97%
48	67%	100%	100%	106%	148%	148%
49	3%	20%	24%	43%	66%	71%
51	-27%	-9%	-6%	7%	32%	37%
53	-12%	23%	30%	9%	53%	61%
Wartość maksymalna	67%	100%	100%	106%	148%	148%
Wartość minimalna	-36%	-29%	-28%	3%	15%	17%

Można zauważyć, że żadna z rozpatrywanych metod wyznaczania buforów nie zapewniłaby całkowitego uniknięcia problemów związanych z wydłużeniem czasu trwania zadań ponad czasy planowane wraz z buforami – pierwsze trzy kolumny ostatniego wiersza pokazują, że w przypadku każdej z metod istnieje zadanie, dla którego bufor by nie wystarczył. Zadania 42, 43 i 51 sprawiałyby problemy przy każdej z metod, zadania 46 i 53 tylko przy metodzie I. Z tabeli 6 można również odczytać, że dla niektórych zadań zapas wymuszony przez bufor byłby niepotrzebnie duży – zwłaszcza w przypadku metody II i metody III (przedostatni wiersz tabeli).

Zatem obie części eksperymentu doprowadziły do podobnych wniosków: metoda I, najprostsza w zastosowaniu, zapewnia najmniejszą ochronę harmonogramu przed utratą stabilności. Jednak, z drugiej strony, oszczędza ona zasoby i czas organizacji, nie wprowadzając zbyt dużych buforów. Metoda III, najbar-

dziej skomplikowana w praktycznym zastosowaniu, chroniłaby harmonogram znacznie lepiej niż metoda I, ale wprowadzałaby niepotrzebnie duże bufory. Metoda II jest nieco lepsza od metody III pod kątem ostatniego kryterium i równie skutecznie zapewnia stabilność harmonogramu, a jest prostsza w zastosowaniu niż metoda III. Zatem w rozpatrywanym przypadku metodę III należałoby odrzucić, a decydent musiałby dokonać wyboru między metodą I i metodą II.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wyniki eksperymentu będącego próbą weryfikacji różnych sposobów wyznaczania wielkości buforów czasowych w projekcie. Weryfikacja pokazała, że różne metody wyznaczania buforów zapewniają potencjalnie różny stopień stabilności harmonogramu, zatem wybór metody może mieć istotne znaczenie dla skuteczności i kosztu procesu zarządzania czasem w projektach realizowanych w danej organizacji. Różne metody mają również różne stopnie trudności, co w przypadku zastosowań praktycznych (np. tak w niniejszym artykule, w sektorze publicznym) nie jest bez znaczenia.

Należy zaznaczyć, że zaprezentowany w niniejszym artykule eksperyment wymaga kontynuacji – w tej samej organizacji i w innych. Potrzeba znacznie więcej projektów realizowanych przez daną organizację, aby móc rzetelnie zidentyfikować czynniki ryzyka, wartości ich wpływu i ich wagi, a także przyjęty tutaj do symulacji rozkład wartości długości poszczególnych zadań projektu. Jednak warto zauważyć, iż nawet tak prosty eksperyment, przeprowadzony wraz z pracownikami urzędu, pozwolił zwrócić ich uwagę na przydatność różnych proponowanych przez naukę o zarządzaniu projektami narzędzi, które nadzwyczaj rzadko są stosowane w praktyce. W tym przypadku chodzi o bufory oraz o systematyczną identyfikację (przez ekspertów, a więc w tym przypadku właśnie przez pracowników samorządów) czynników ryzyka. Eksperyment uwodnił im, że stosowanie narzędzi zarządzania we współpracy z pracownikami naukowymi może okazać się, po pierwsze, przydatne z praktycznego punktu widzenia (w omawianym przypadku analiza projektu *post factum* pozwoliła zespołowi projektowemu na uświadomienie sobie wielu zjawisk i zależności w projekcie i organizacji, z których nie zdawali sobie sprawy), a po drugie, nie takie trudne i „naukowe”, jak to się mogłoby wydawać.

Literatura

- Herroelen W., Leus R. (2004), *The construction of stable project baseline schedules*, „European Journal of Operational Research”, Vol. 156, Iss. 3.
- Kinderman A.J., Monahan J.F. (1977), *Computer Generation of Random Variables Using the Ratio of Uniform Deviates*, „ACM Transactions on Mathematical Software”, Vol. 3, Iss. 3.
- Kobyłański P., Kuchta D. (2007), *A note on the paper by M. A. Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling*, „International Journal of Production Economics”, Vol.107, Iss. 2.
- Kuchta D. (2014), *A New Concept of Project Robust Schedule – Use of Buffers*, „Procedia Computer Science”, Vol. 31.
- Kuchta D., Ślusarczyk A. (2013), *Size of buffers in critical chain method – case study*, Project Management Development – Practice and Perspectives: Second International Scientific Conference on Project Management in the Baltic Countries, April 11-12, 2013, Riga, University of Latvia; Professional Association of Project Managers, Riga.
- Sabuncuoglu I., Goren S. (2009), *Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research*, „International Journal of Computer Integrated Manufacturing”, Vol. 22, Iss. 2.
- Ślusarczyk A., Kuchta D. (2012), *Propozycja zmiany sposobu zarządzania ryzykiem projektów realizowanych w sektorze publicznym*, Zeszyty Naukowe – Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki, nr 44(4).
- Ślusarczyk A., Kuchta D. (2013), *The new approach for the project activities classification and its application in the critical chain buffer management method*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Wydziałowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, nr 137.
- Ślusarczyk A., Kuchta D., Verhulst P., Huyghe W., Lauryssen K., Debal T. (2013), *A comparison of buffer sizing techniques in the critical chain method – case study*, „Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems”, Vol. 7, Iss. 3.
- Tukel O.I., Rom W.O., Eksioğlu S.D. (2006), *An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling*, „European Journal of Operational Research”, Vol. 172, Iss. 2.
- Vonder S. van de, Demeulemeester E., Herroelen W., Leus R. (2005), *The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan*, „International Journal of Production Economics”, Vol. 97, Iss. 2.

APPLICATION OF BUFFERS IN PROJECT MANAGEMENT

Summary: The paper presents 3 methods of time buffer size determination and an attempt to verify these methods in a real world project. The methods were compared using 3 criteria: their ability to ensure a schedule stability, the amount of time unnecessarily reserved in buffers with respect to the actual needs and the simplicity of their practical application.

Keywords: project time management, project schedule stability, time buffers.