

Monitoring i kontrola buforów czasu w metodzie mp-kp¹

Dr hab. inż. Roman Marcinkowski, prof. PW,

Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii

Dr hab. inż. Mieczysław Połoński, prof. SGGW, dr inż. Kamil Pruszyński

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Podjęta w pracy problematyka związana jest z projektowaniem realizacji przedsięwzięć budowlanych w funkcji czasu. Wnikliwej analizie poddano metodykę opracowania harmonogramów robót inżynierijno-budowlanych, uwzględniającą występujące aspekty probabilistyki w planowaniu budowy w ujęciu czasowym. Specyfika realizacji przedsięwzięć inżynierskich [3], występujące nagminnie ryzyko w budownictwie [6] oraz stosowane obecnie metody planowania [2] świadczą dobitnie o tym, że deterministyczne podejście bezzwłocznie należy zastąpić probabilistycznym planowaniem realizacji przedsięwzięć inżynierijno-budowlanych [5]. Dopiero takie podejście do zarządzania realizacją budowy będzie prowadzić do podniesienia jego efek-

tywności oraz skuteczności, u którego podstaw znajduje się rzeczowo-czasowe sterowanie (kierowanie) robotami, zamówieniami i produkcją. Podstawą takiego kierowania jest harmonogram uwzględniający zachodzące podczas realizacji zmiany i mechanizmy, pozwalający je kontrolować oraz skutecznie na nie reagować, zgodnie z wcześniej przygotowanym scenariuszem.

Przedmiotem artykułu jest zagadnienie monitorowania ryzyka niedotrzymania terminów węzłowych (planowanych lub dyrektywnych) realizacji przedsięwzięcia budowlanego, do realizacji którego opracowano harmonogram według założeń metody Goldratta [1]. Sposób wykorzystania tej metody w budownictwie wraz z niezbędnymi modyfikacjami przedstawiono w rozprawie doktorskiej „Metoda harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu” [7].

¹ metoda mp-kp – metoda opracowania harmonogramów realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu opracowana przez zespół: Roman Marcinkowski, Mieczysław Połoński i Kamil Pruszyński.

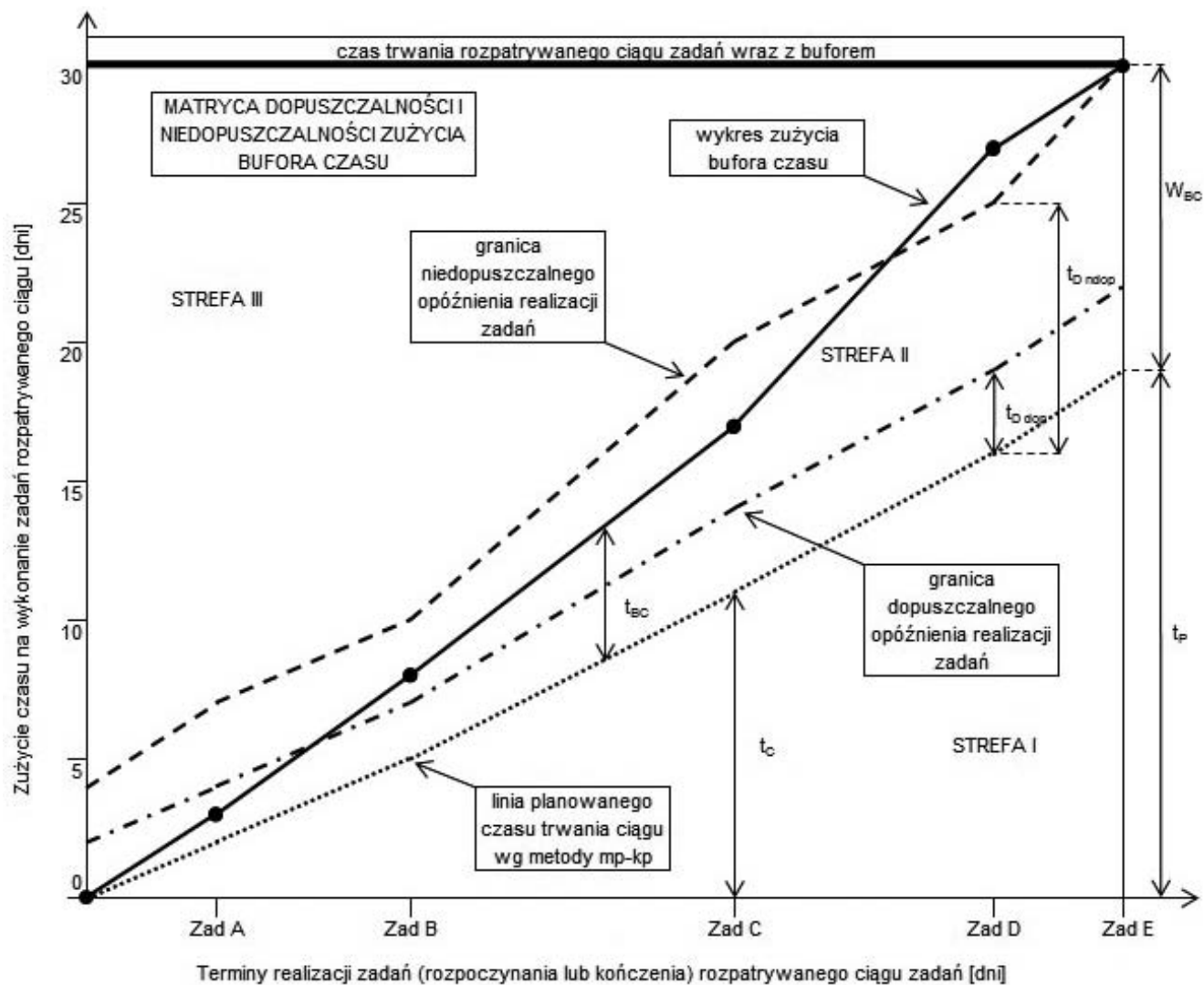
Utylitarnym efektem tej dysertacji jest metoda mp-kp, która służy do planowania i kontroli realizacji przedsięwzięć z analizą ryzyka czasu i terminów osiągnięcia określonych stanów. W metodzie tej proponuje się definiowanie w harmonogramie tzw. „buforów czasu”, będących rezerwą czasu w realizacji ciągów zadań. Bufory te w toku realizacji przedsięwzięcia są dystrybuowane w zakresie różnic między terminami rzeczywistymi a planowanymi realizacji zadań. W pracy przedstawiono technikę monitorowania tempa tej dystrybucji. Koncepcja metody jest wynikiem współpracy autorów niniejszego artykułu.

MONITORING I KONTROLA

Wizualnemu przedstawieniu wykorzystywania bufora czasu podczas trwania realizacji budowy służy wykres zużycia tego bufora na tle akceptowanego ryzyka. Składa się on z dwóch elementów: matrycy, która nosi nazwę dopuszczalności i niedopuszczalności zużycia poszczególnych buforów czasu oraz nałożonego na nią wykresu zużycia bufora czasu tworzonego już podczas trwania budowy. W sposób schematyczny przedstawiono to na rys. 1.

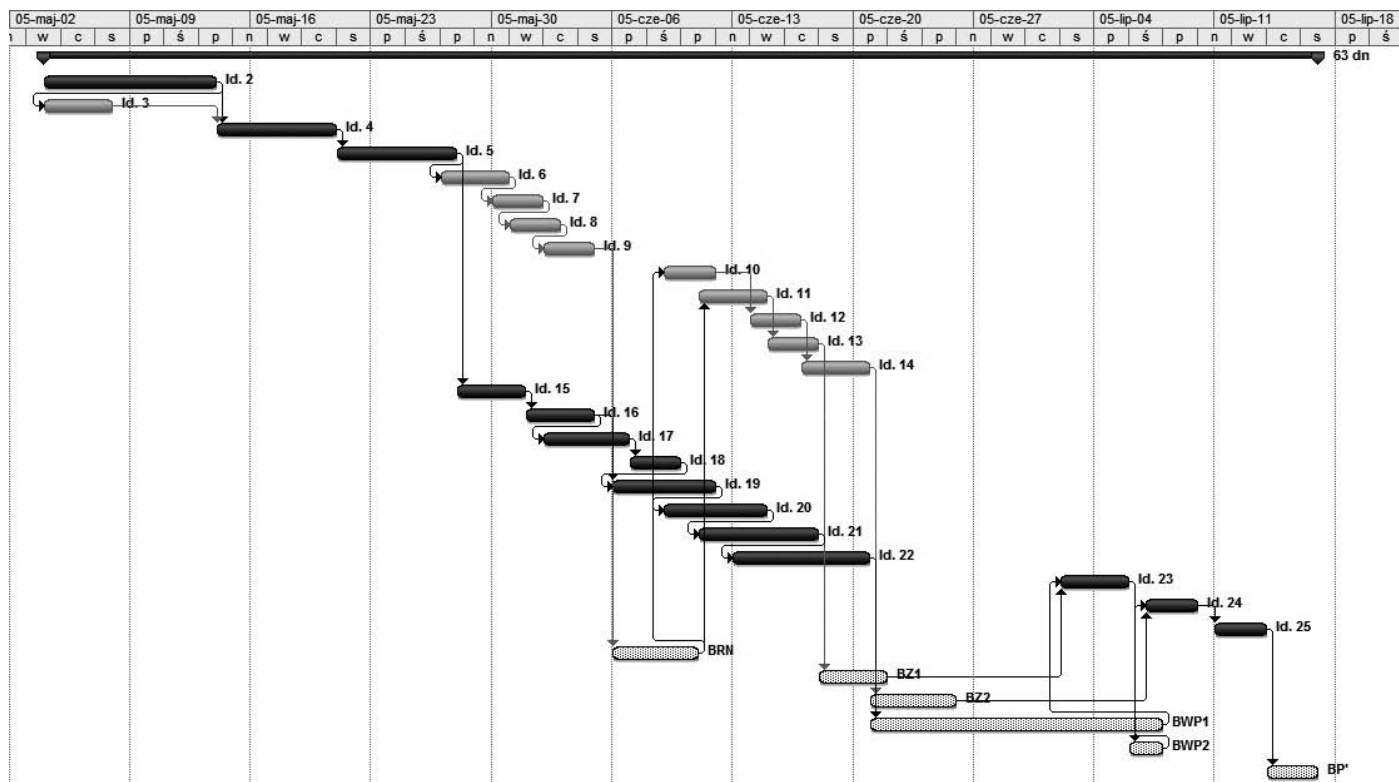
Matrycę opracowano w wyniku stworzenia dwóch granic: dopuszczalnego oraz niedopuszczalnego opóźnienia realizacji poszczególnych zadań wchodzących w skład rozpatrywanego ciągu. Na osi odciętych należy zaznaczyć terminy zakończenia lub rozpoczęcia poszczególnych zadań T_i – już po ich skróceniu według zasad przedstawionych w [7]. Z kolei, na osi rzędnych zaznacza się wielkość dopuszczalnego i niedopuszczalnego opóźnienia terminów realizacji zadań rozpatrywanego ciągu (t_{dop} , t_{ndop}). Do oszacowania każdego rodzaju czasu (dopuszczalnego i niedopuszczalnego) należy skorzystać z wiedzy eksperckiej. Tylko wtedy bowiem będą właściwie określone granice dopuszczalnego i niedopuszczalnego wydłużenia poszczególnych zadań wchodzących w skład rozpatrywanego ciągu. Tym samym będą uwzględnione w nich warunki technologiczno-organizacyjne realizowanego zamierzenia inżynierijno-budowlanego oraz, przede wszystkim, mogące w nim wystąpić ryzyko, które będzie zdefiniowane i właściwie określone.

Z wyznaczenia tych granic powstaną trzy strefy, tworząc w ten sposób matrycę dopuszczalności i niedopuszczalności zużycia bufora czasu. Dolny jej obszar – pod granicą dopuszczalnego opóźnienia terminów realizacji zadań w danym ciągu



Rys. 1. Wykres zużycia bufora czasu na tle akceptowanego ryzyka – schemat powstawania

t_c – suma czasu trwania zadania C i poprzedników według założeń metody mp-kp (narastająco), $t_{D\,dop}$ – czas dopuszczalny trwania zadania D, $t_{D\,ndop}$ – czas niedopuszczalny trwania zadania D, t_{BC} – wartość zużycia bufora czasu (narastająco), t_p – czas trwania rozpatrywanego ciągu zadań po skróceniu, W_{BC} – wyliczona (przyjęta) wartość bufora czasu



Rys. 2. Harmonogram robót ziemnych stacji metra A19 Marymont w Warszawie z wstawionymi odpowiednio właściwymi buforami czasu oraz z zastosowaniem skrócenia czasów trwania poszczególnych zadań i relacji czasowych między nimi o 50%

(pod linią typu kreska – kropka) – oznacza ryzyko pomijalne (strefa I), które jest na tyle znikome, że może nie być brane pod uwagę w dalszych rozważaniach dotyczących realizacji budowy. Strefa II – obszar środkowy pomiędzy granicami dopuszczalnego i niedopuszczalnego opóźnienia terminów realizacji zadań w rozpatrywanym ciągu (między liniami typu kreska-kropka a kreska) – oznacza ryzyko umiarkowane, czyli dopuszczalne (ale warunkowo), które trzeba brać pod uwagę podczas dalszej analizy. Ostatnie, trzecie pole (strefa III), znajdujące się nad granicą niedopuszczalnego opóźnienia terminów realizacji zadań w danym ciągu (nad linią typu kreska) przedstawia ryzyko nieakceptowalne, któremu należy przeciwdziałać.

Kolejnym elementem matrycy jest linia przedstawiająca planowany, zgodnie z harmonogramem opracowanym według założeń metody mp-kp, czas trwania ciągu zadań (linia typu kropka) – bez uwzględnienia wartości bufora czasu. Powinno się stworzyć ją na samym początku powstawania matrycy, gdyż to od niej najlepiej odmierzać czas t_{dop} i t_{ndop} . Powstaje ona w wyniku przypisania narastająco terminom zakończenia poszczególnych zadań z rozpatrywanego ciągu T_i czasu t_i .

Następnie buduje się wykres zużycia bufora czasu. Powstaje on sukcesywnie podczas trwania realizacji zamierzenia budowlanego (ciągu zadań, którego dotyczy). Zaznacza się na nim wykorzystywanie bufora czasu podczas wykonania ciągu, który on chroni t_{BC} .

Ideę powstania matrycy dopuszczalności i niedopuszczalności zużycia bufora czasu zaczerpnięto z metody FMEA² do analizy ryzyka. Matryca powstaje osobno dla każdego bufora czasu. Zagrożenia, które są w niej zawarte, powinny zostać

zidentyfikowane każdorazowo przed rozpoczęciem realizacji przedsięwzięcia tak, by nie zmieniać kryteriów oceny ryzyka już w czasie jego trwania. Może to bowiem prowadzić do końcowego zafałszowania jej wyników. Należy zatem zawsze poddawać analizie proces zużywania rozpatrywanego bufora czasu na tle tej samej matrycy.

Należy przy tym zaznaczyć, że maksymalna wartość, jaką może osiągnąć granica niedopuszczalnego wydłużenia czasu trwania zadań, nie może być większa od wyliczonego wcześniej czasu trwania rozpatrywanego ciągu zadań – przedsięwzięcia t_p , licząc razem z buforem czasu W_{BC} . W tym celu zaznaczono dopuszczalną wyliczoną jej wartość pogrubioną czarną linią. W przypadku, gdy wykres zużycia bufora czasu przekroczy ją, lokalizacja ścieżki krytycznej w harmonogramie może ulec zmianie.

ZASTOSOWANIE INŻYNIERSKIE

W celu zaprezentowania praktycznego stosowania w przedsięwzięciu inżynierskim monitoringu i kontroli w metodzie mp-kp będzie rozwiązane przykładowe zadanie.

Do pozyskanego w tym celu harmonogramu robót ziemnych stacji metra A19 Marymont w Warszawie [4, 8] wstawiono odpowiednie bufory czasu oraz zastosowano skrócenie czasów trwania poszczególnych zadań i relacji czasowych między nimi o 50%, co przedstawiono na rys. 2 oraz w tabl. 1. Przedsięwzięcie to będzie podlegać kontroli pod względem terminowości realizacji poszczególnych zadań. Przyjęto, że punkty kontrolne, tzw. kamienie milowe, będą monitorowane na cotygodniowych naradach, na których będą podejmowane ewentualne środki za-

² FMEA - Failure Mode and Effects Analysis [9].

Tabl. 1. Zestawienie terminów realizacji zadań do harmonogramu przedstawionego na rys. 2

Id.	Nazwa zadania	Czas trwania	Rozpoczęcie	Zakończenie	Następniki	Całkowity zapas
1.	Budowa stacji metra A19 Marymont w Warszawie – roboty ziemne (fragment harmonogramu)	63 dni	śro, 05-05-04	sob, 05-07-16		0 dni
2.	MOBILIZACJA I PRZYGOTOWANIE SPRZĘTU	9 dni	śro, 05-05-04	pią, 05-05-13	3ZR-9 dn;4	0 dni
3.	PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT	4 dni	śro, 05-05-04	sob, 05-05-07	4	5 dni
4.	WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 11-18 i 37-44	6 dni	sob, 05-05-14	pią, 05-05-20	5	0 dni
5.	WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 19-26 i 31-36	5 dni	sob, 05-05-21	pią, 05-05-27	6ZR-1 dzień;15	0 dni
6.	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	3 dni	pią, 05-05-27	pon, 05-05-30	7ZR-1 dzień	9 dni
7.	WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 5A i 5B	3 dni	pon, 05-05-30	śro, 05-06-01	8ZR-2 dn	9 dni
8.	SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 18-25 i 32-37	3 dni	wto, 05-05-31	czw, 05-06-02	9ZR-1 dzień	9 dni
9.	SZALOWANIE SEKCJI 5A	3 dni	czw, 05-06-02	sob, 05-06-04	26	9 dni
10.	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A	3 dni	czw, 05-06-09	sob, 05-06-11	12ZR+1 dzień	9 dni
11.	SZALOWANIE SEKCJI 5B	3 dni	sob, 05-06-11	wto, 05-06-14	13	9 dni
12.	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B	3 dni	wto, 05-06-14	czw, 05-06-16	14	9 dni
13.	SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A	3 dni	śro, 05-06-15	pią, 05-06-17	27	9 dni
14.	ZBROJENIE I BETONOWANIE PRZEWYŻSZENIA SEKCJI 5A	3 dni	pią, 05-06-17	pon, 05-06-20	28	9 dni
15.	WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 27-30 i 58-59	3 dni	sob, 05-05-28	wto, 05-05-31	16	0 dni
16.	WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 8-10 i 45-47	4 dni	śro, 05-06-01	sob, 05-06-04	19;17ZR-3 dn	0 dni
17.	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	4 dni	czw, 05-06-02	pon, 05-06-06	18	0 dni
18.	TYMCZASOWE PRZEŁOŻENIE KABLI ENERGETYCZNYCH I TRAKCYJNYCH – WIĄZKA 2	3 dni	wto, 05-06-07	czw, 05-06-09	19ZR-4 dn	0 dni
19.	WYKONANIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH – SEKCJE 1-7 i 48-57	6 dni	pon, 05-06-06	sob, 05-06-11	20ZR-3 dn	0 dni
20.	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	5 dni	czw, 05-06-09	wto, 05-06-14	21ZR-3 dn	0 dni
21.	WYKONANIE WYKOPU WSTĘPNEGO SEKCJE 1, 2A, 2B	6 dni	sob, 05-06-11	pią, 05-06-17	22ZR-5 dn	0 dni
22.	SKUCIE ŚCIAN SZCZELINOWYCH ORAZ USZCZELNIENIE POŁĄCZENIA ZE STROPEM ZEWNĘTRZNYM – SEKCJE 1-8 i 47-57	7 dni	pon, 05-06-13	pon, 05-06-20	29	0 dni
23.	SZALOWANIE SEKCJI 1	3 dni	sob, 05-07-02	wto, 05-07-05	30	0 dni
24.	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1	3 dni	czw, 05-07-07	sob, 05-07-09	25	0 dni
25.	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B	3 dni	pon, 05-07-11	śro, 05-07-13	31	0 dni
26.	BRN	5 dni	pon, 05-06-06	pią, 05-06-10	10ZR-2 dn;11	9 dni
27.	BZ1	3 dni	sob, 05-06-18	wto, 05-06-21	23	9 dni
28.	BZ2	5 dni	wto, 05-06-21	sob, 05-06-25	24	9 dni
29.	BWP1	15 dni	wto, 05-06-21	czw, 05-07-07	23ZR-5 dn	0 dni
30.	BWP2	2 dni	śro, 05-07-06	czw, 05-07-07	24ZR-1 dzień	0 dni
31.	BP	3 dni	czw, 05-07-14	sob, 05-07-16		0 dni

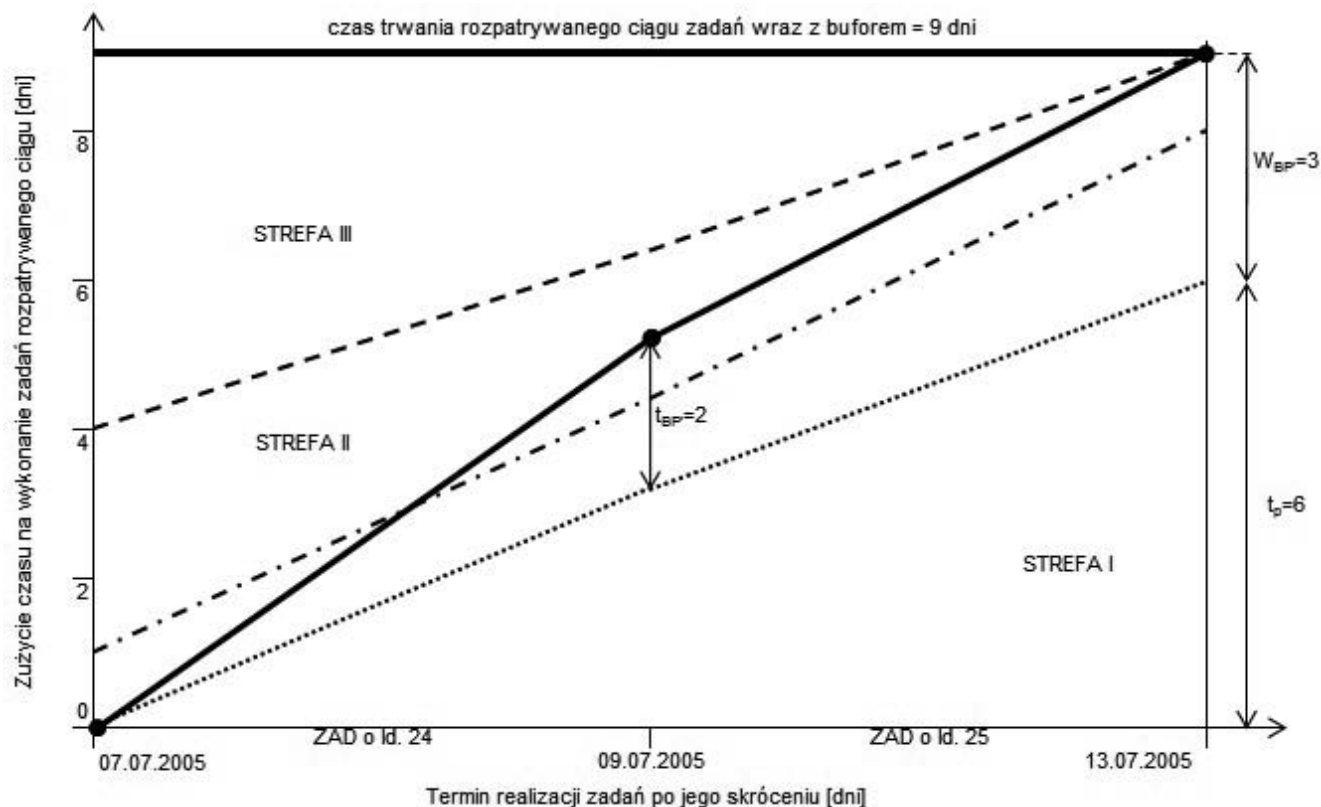
Tabl. 2. Zestawienie stosowanych w przykładzie buforów czasu wraz z chronionymi przez nie ciągami zadań

Lp.	Nazwa bufora czasu wraz z chronionym przez niego ciągiem zadań	Rozpoczęcie ciągu	Zakończenie ciągu	Wartość bufora czasu
1.	BRN ciąg Id. 6-7-8-9	27.05.2005	04.06.2005	5
2.	BZ1 ciąg Id. 11-13	11.06.2005	17.06.2005	3
3.	BZ2 ciąg Id. 10-12-14	09.06.2005	20.06.2005	5
4.	BWP1 ciąg Id. 2-4-5-15-16-17-18-19-20-21-22	04.05.2005	20.06.2005	15
5.	BWP2 ciąg Id. 23	02.07.2005	05.07.2005	2
6.	BP' ciąg Id. 24-25	07.07.2005	13.07.2005	3

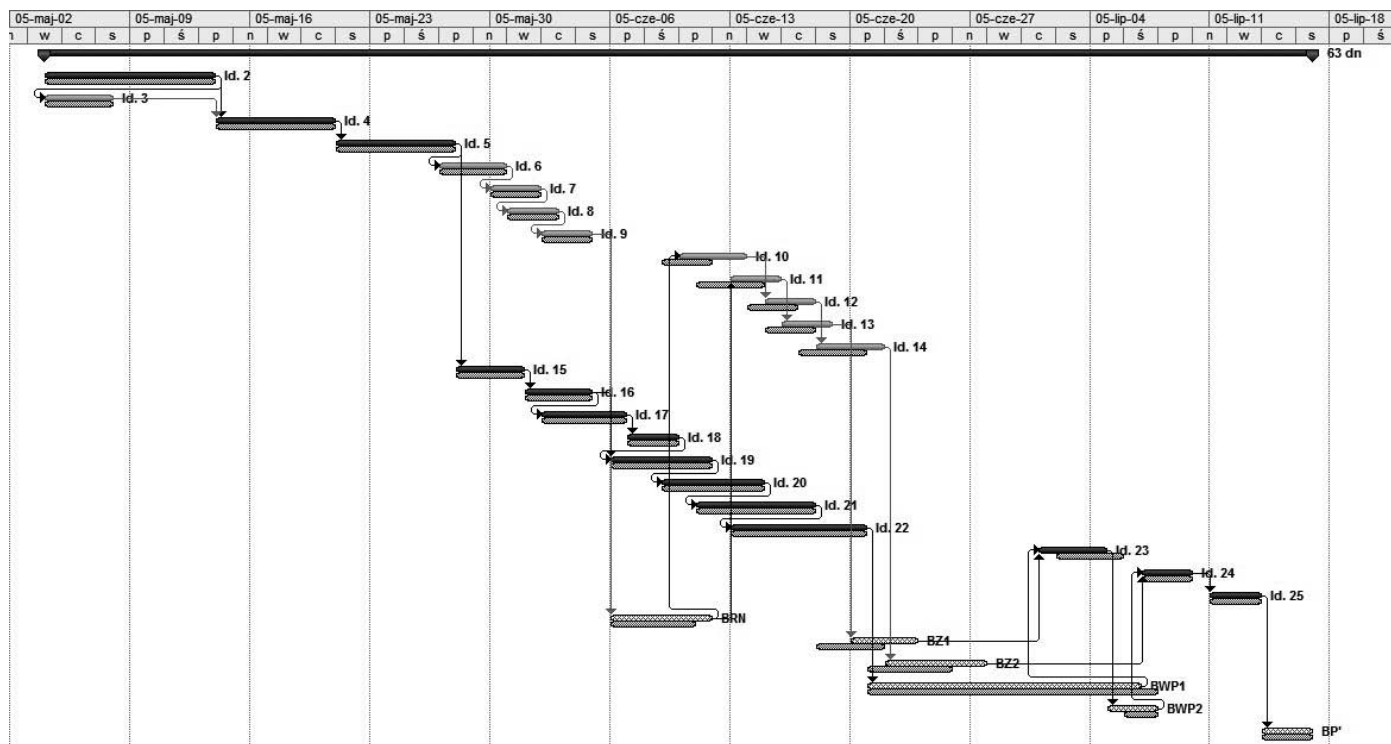
radcze w przypadku przekroczenia przez któryś z buforów czasu strefy I na rys. 1.

Na zakończenie planowania przystąpiono do sporządzenia wykresów zużycia buforów czasu na tle akceptowanego ryzyka dla każdego ciągu, które one chronią. Początkowo, do każdego występującego w przykładzie bufora czasu opracowano matrycę dopuszczalności i niedopuszczalności ich zużycia. Do ich stworzenia potrzebne są oszacowania eksperckie granic dopuszczalnego i niedopuszczalnego opóźnienia zakładanych terminów realizacji zadań. Do wyróżnionych w tabl. 2 buforów czasu i poszczególnych zadań oszacowuje się opóźnienia (t_{dop} , t_{ndop}). Przykładowo, na rys. 3, przedstawiono matrycę dla ciągu chronionego buforem czasu BP'.

Po przystąpieniu do realizacji przedsięwzięcia buduje się linie zużycia buforów czasu. W opisywanym przedsięwzięciu okazało się, że wiele zadań trwało dłużej niż zakładano. Na przykład, nie udało się na czas przełożyć kabli energetycznych (zadanie o nr. Id. 18) oraz nie dostarczono na czas stali zbrojeniowej dla sekcji 1 (zadanie o nr. Id. 24). Korzystano wówczas z zapasu czasu, jaki zarezerwowano w odpowiednich buforach czasu. Aby zmniejszyć wykorzystanie tych buforów i żeby nie przekroczyć ich czasu trwania, postanowiono podjąć odpowiednie działania. Przykładowo: dokonano szybkiej wymiany sprzętu, który uległ awarii w trakcie wykonywania zadania: wykonanie wykopu wstępnego sekcje 5A i 5B (zadanie o nr. Id. 7) i zamówiono dodatkowo jeden zestaw szalunków w celu



Rys. 3. Przykładowa matryca dopuszczalności i niedopuszczalności zużycia bufora BP' z wykresem zużycia bufora BP' na tle akceptowanego ryzyka.



Rys. 4. Porównanie terminów planowanych i zrealizowanych na zakończenie przedsięwzięcia

przyspieszenia przygotowywania frontu robót pod betonowanie (zadanie o nr Id. 11).

Podjęte działania przyczyniły się do zużycia buforów czasu bez przekraczania wartości trwania ciągu chronionego buforem BP'. Wykres zużycia tego bufora przedstawiono na rys. 3 grubą linią ciągłą, zaś na rys. 4 pokazano wykres Gantta, na którym porównano zaplanowane zadania z ich realizacją.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zastosowanie wykresu zużywania bufora czasu na tle akceptowanego ryzyka wpłynie pozytywnie na pełniejszą kontrolę realizacji przedsięwzięcia inżynieryjno-budowlanego. Pozwala on monitorować wyniki z wykorzystywania poszczególnych buforów czasu opóźnienia, czy też zmianę końcowego terminu realizacji budowy.

Można także zauważyć, że chociaż niektóre bufory czasu trwały krócej (BWP1), inne dłużej (BRN, BZ1, BWP2), a jeszcze inne zgodnie z planem (BZ2, BP'), to całe przedsięwzięcie budowlane zakończyło się zgodnie z planowanym terminem (por. rys. 2 i 4).

Podjęte działania, zwłaszcza do zadań ze ścieżki krytycznej, ograniczyły potrzebę wykorzystania zgromadzonych rezerw czasu w buforach. Należałoby oczywiście zintensyfikować wysiłki, by odpowiednio wcześniej wykryć i przeciwdziałać ewentualnemu przekroczeniu planowanego terminu (np. mieć w zapasie dodatkowy sprzęt na wypadek awarii lub też dodatkowe zestawy szalunków, czy też zamówić całą stal zbrojeniową na budowę). Ponieważ wiąże się to z ponoszeniem dodatkowych kosztów, należy za każdym razem rozważyć opłacalność takich działań. Zwrócono dodatkowo uwagę, że nie wszystkie bufory

muszą zakończyć się w planowanym terminie, by całe przedsięwzięcie było zrealizowane w terminie. Z kolei, jeżeli właściwie stosujemy wykres zużywania bufora czasu na tle akceptowanego ryzyka, możemy należycie kontrolować i monitorować przebieg realizacji każdego przedsięwzięcia inżynieryjno-budowlanego według założeń metody mp-kp.

LITERATURA

1. Goldratt E.M.: Łańcuch krytyczny. Wyd. Werbel, Warszawa 2000.
2. Jaworski K.M.: Metodologia projektowania realizacji budowy. Wyd. PWN, Warszawa 1999.
3. Kapliński O. (red.): Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Seria Studia z Zakresu Inżynierii Nr 57. PAN, KILiW, IPPT, Warszawa 2007.
4. Koncepcja architektoniczno-budowlana stacji metra A-19 Marymont w Warszawie. Maszynopis. Metro Warszawskie i Warbud S.A., Warszawa 2005.
5. Marcinkowski R.: Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej. Rozprawa habilitacyjna. WAT, Warszawa 2002.
6. Połoński M. (red.): Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym. Wyd. SGGW, Warszawa 2009.
7. Pruszyński K.: Metoda harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu. Rozprawa doktorska. WAT, Warszawa 2013.
8. Umowa wraz z harmonogramem prowadzenia robót budowlanych, inżynieryjnych i elektrycznych stacji metra A-19 „Marymont” w Warszawie z dnia 28.05.2004. Maszynopis, Warszawa.
9. Urbaniak M.: Zarządzanie jakością. Wyd. Difin, Warszawa 2004.