

**Mieczysław POŁOŃSKI, Aneta ZIÓLKOWSKA**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Wyznaczenie buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia dla obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu**

### **Setting buffers and completion date for project of office building “Globis” in Wrocław**

**Słowa kluczowe:** łańcuch krytyczny, CCPM, CC/BM, bufor czasu

**Key words:** critical chain, CCPM, CC/BM, buffer sizing

#### **Wprowadzenie**

Metody planowania przedsięwzięć budowlanych rozwijają się od kilkadziesiąt lat. Ciągłe powstają nowsze metody, bardziej dokładne, łatwiejsze w użytkowaniu, skomputeryzowane (Kapliński 2008). Z praktyki wiadomo, że harmonogramy przedsięwzięć budowlanych bardzo szybko ulegają dezaktualizacji. W wyniku tego następuje wydłużenie terminu realizacji całej budowy bądź jej poszczególnych etapów. Przyczyn takiego stanu może być kilka. Związane one są zarówno z występowaniem zjawisk losowych (takich jak warunki pogodowe), jak i z niedoskonałością metod planowania i szacowania wielkości czasów trwania poszczególnych czynności.

Nowa filozofia planowania i realizacji przedsięwzięcia, zaproponowana przez E. Goldratta, cieszy się dużym zainteresowaniem w literaturze fachowej (Leach 2000, Rand 2000, Steyn 2002, Raz i in. 2003, Czarnigowska i in. 2004, Hajducki i in. 2004, Rogalska 2005). Jednak w odniesieniu do budownictwa nie jest łatwo zastosować tę metodę. Napotyka się bowiem wiele problemów, takich jak: konieczność uwzględnienia nietypowych relacji między zadaniami, występowanie kilku czynności początkowych i końcowych czy terminów dyrektywnych poszczególnych zadań. W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyniki analizy harmonogramu sieciowego z zastosowaniem buforów czasu na podstawie metody łańcucha krytycznego i przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa czasu trwania pojedynczego zadania oraz wyznaczony na ich podstawie termin realizacji konkretnego obiektu budowlanego.

## **Łańcuch krytyczny, bufor czasu – wiadomości teoretyczne**

Twórcą metody łańcucha krytycznego (Critical Chain, zwanej też Critical Chain Construction Project – CCPM lub CC/BM) jest E. Goldratt (1997). Służy ona do wspomagania zarządzania projektami, gdy mamy do czynienia z warunkami niepewności czasu realizacji zadań składowych. Metodę uważa się za postęp w stosunku do metod CPM (1956 r.) i PERT (1958 r.). Najczęściej stosowana jest w informatyce, znacznie rzadziej w budownictwie (Milian 2004).

Metoda CCPM stara się ograniczyć działanie „prawa Parkinsona”, które głosi, że niezależnie od faktycznej ilości pracy do wykonania czas wykonania zadania zawsze zajmuje zaplanowaną wartość, a często nawet może go przekroczyć. Restrykcyjne założenia koncepcji Goldratta skracają planowany czas wykonania kolejnych czynności, motywują ludzi do cięższej pracy i dotrzymania ściśle ustalonego terminu. W konsekwencji planiści podchodzą bardziej optymistycznie do szacowania czasu wykonania każdego zadania. Dodatkowo, ponieważ harmonogram układany jest restrykcyjnie i przyjmuje bardzo krótkie planowane okresy wykonania zadań, bez ukrytych rezerw czasowych, nie można więc zwlekać z rozpoczęciem każdego zadania, niwelując w ten sposób tzw. syndrom studenta, czyli tendencję do odkładania rozpoczęcia prac na ostatnią chwilę. Ewentualne opóźnienia w trakcie wykonywania zadań mogą być nadrabiane poprzez wykorzystanie świadomie zaprojektowanych buforów bezpieczeństwa, co nie wpłynie na opóźnienie całego projektu.

W metodzie łańcucha krytycznego skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia uzyskuje się poprzez skrócenie czasu wykonania poszczególnych zadań, czyli likwidując indywidualne rezerwy poszczególnych zadań. Wszystkie te rezerwy przenosi się do bufora czasu, umieszczanego na końcu łańcucha krytycznego, przy czym łańcuch ten definiowany jest jako „...najdłuższy zbiór zależnych zadań, koniecznych do osiągnięcia celu projektu z optymalnym uwzględnieniem wszelkich ograniczeń” (Milian 2004).

Bufor umieszczany na końcu łańcucha krytycznego nazywany jest buforem projektu (BP). Zmniejszając jego rozmiar, można regulować termin zakończenia przedsięwzięcia oraz prawdopodobieństwo dotrzymania jego terminu. Dodatkowo stosuje się bufor zasilający (BZ). Umieszczane są one na końcu ciągów niekrytycznych dochodzących do ścieżki krytycznej. Gdy po wstawieniu buforów zasilających do harmonogramu projektu okaże się, że ścieżka krytyczna zmieni swoje położenie, należy zmodyfikować koncepcję Goldratta. W tym celu należy zastosować dodatkowy typ bufora – bufor wspomagający projekt (BWP), oraz zastosować zmodyfikowaną (zmniejszoną) wartość bufora projektu (BP'). Bufory wspomagające (BWP) lokalizuje się na ciągu krytycznym w celu zachowania zapasu czasu dla ciągu zasilającego, by ten nie stał się nowym ciągiem krytycznym (Połoński i Pruszyński 2008).

Reasumując, w harmonogramach sporządzanych według metody CCPM lokalizuje się bufor: projektu (BP), zasilający (BZ) oraz wspomagający projekt (BWP). Wprowadza się je jako czynności fikcyjne, które nie angażują zasobów, ale

o ustalonym czasie trwania. Dzięki takiej strukturze sieci zależności i przyjętych czasów buforów prawdopodobieństwo dotrzymania terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia pozostaje dalej na dosyć wysokim poziomie. Istnienie buforów, poprzez ich obserwację, ułatwia ponadto kontrolę realizacji przedsięwzięcia. Gdy nastąpi zagrożenie opóźnienia zaplanowanych terminów, możliwe jest podjęcie adekwatnych działań zapobiegawczych, zwiększających tempo pracy. Działania te nazywane są zarządzaniem buforami (Czarnigowska i in. 2004).

### Sposób wyznaczania wielkości buforów na podstawie rozkładu normalnego

W celu obliczenia wielkości buforów na podstawie rozkładu normalnego czasu trwania zadań należy założyć, że przyjęty przez wykonawcę czas trwania poszczególnych czynności w harmonogramie został określony z przyjętym prawdopodobieństwem na przykład 0,9 ( $t_{0,9}$ ), oraz oszacować czas trwania zadań z innym prawdopodobieństwem, na przykład 0,5 ( $t_{0,5}$ ). Bazując na przyjętych szacunkach czasu zadań oraz na założeniu typu rozkładu czasu pojedynczego zadania, można wykonać następne obliczenia. W prowadzonych dalej analizach za typ rozkładu czasu zadania przyjęto rozkład normalny.

W celu dalszego uproszczenia obliczeń wielkości buforów przyjęto, że w sieci zależności analizowanego harmonogramu występują wyłącznie relacje między zadaniami typu zakończ – rozpocznij (ZR), z ewentualnymi dodatni-

mi lub ujemnymi wartościami zwłoki na tych relacjach.

Na podstawie założonych dwóch kwantyli czasu trwania wszystkich zadań oraz wiedząc, że dotyczą one rozkładu normalnego, można obliczyć odchylenie standardowe ( $\delta$ ) czasu tych czynności (lub opóźnienia na relacji) za pomocą wzoru:

$$\delta = \frac{t_{0,9} - t_{0,5}}{U_{0,9}} \quad (1)$$

gdzie  $U_{0,9}$  – odwrotność skumulowanego, standardowego rozkładu normalnego.

Na podstawie obliczonego odchylenia standardowego oraz przyjętych dwóch kwantyli czasu czynności można następnie obliczyć kwantyl z założonym dowolnie innym prawdopodobieństwem. Jeśli występują relacje ZR z opóźnieniami bądź przyspieszeniami między zadaniami, to należy wyznaczyć skrócony czas trwania tych relacji w identyczny sposób jak dla czynności. Następnie należy wprowadzić wyznaczony czas trwania czynności oraz relacji do programu MS Project.

Kolejny etap obliczeń to ustalenie położenia, ilości i wielkości buforów. W analizie bez uwzględniania zasobów łańcuchem krytycznym w harmonogramie jest ścieżka krytyczna. Na jej końcu umieszcza się bufor projektu, którego zadaniem jest ochrona dotrzymania końcowego terminu przedsięwzięcia. Bufory zasilające umieszcza się na końcach ciągów niekrytycznych, dochodzących do ciągu krytycznego. Chronią one zadania w ciągu krytycznym przed zmianą położenia tego ciągu.

Termin zakończenia całego ciągu czynności z przyjętym z góry prawdopo-

dobieństwem obliczyć należy z dystrybuanty rozkładu normalnego na podstawie parametrów tego rozkładu:

$$m_T = \sum_{i=1}^k t_{0,5} \quad (2)$$

$$\delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_i^2} \quad (3)$$

gdzie:

$\delta_i$  – odchylenie standardowe czasu czynności  $i$ ,

$k$  – liczba zadań analizowanego ciągu.

Wielkości buforów oblicza się jako różnicę między terminem zakończenia całego ciągu czynności chronionego przez dany bufor na założonym poziomie prawdopodobieństwa a sumą czasów czynności przyjętych dla danego prawdopodobieństwa (Połoński i Pruszyński 2008).

Należy również zauważyć, że jeśli na ścieżce krytycznej występuje, oprócz bufora projektu, chociaż jeden bufor wspomagający (BWP), to obliczona suma czasów tych buforów będzie większa niż pierwotnego, jednego bufora projektu (BP), co wynika ze znanego prawa statystyki, że suma odchyłeń standardowych zmiennych losowych jest większa niż odchylenie standardowe ich sum. W konsekwencji zaś właściwość ta powoduje, że termin zakończenia całego przedsięwzięcia jest nieco dłuższy niż pierwotnie obliczono, a poziom prawdopodobieństwa jego dotrzymania nieco wyższy niż pierwotnie zakładano. Chcąc tego uniknąć, należy nieco zmniejszyć wartości wyliczonych buforów BWP i zmodyfikowanego bufora projektu (BP') w taki sposób, aby ich suma stano-

wiła oryginalną wielkość niezmodyfikowanego bufora projektu (BP).

## Wyznaczenie wielkości buforów czasu dla obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu

Globis<sup>1</sup> Wrocław jest to nowoczesny budynek biurowy, usytuowany w centrum Wrocławia, przy ulicy Powstańców Śląskich. Obiekt jest własnością Globe Trade Centre. Generalnym wykonawcą była międzynarodowa firma budowlana Hochtief. Budynek oddano do użytku w 2008 roku. Składa się on z 13 kondygnacji naziemnych i 3 podziemnych.

Harmonogram obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu początkowo zawierał łącznie 75 czynności, a czas realizacji całego przedsięwzięcia wynosił 374 dni. Część zadań nie miała połączeń między sobą a w harmonogramie występowało wiele początków i końców. W celu przeprowadzenia opisanych wyżej obliczeń harmonogram został zmodyfikowany. Czynności zostały uporządkowane, niektóre podzielone na kilka etapów, zmieniono też zależności między niektórymi zadaniami. Dodatkowo, w celu eliminacji wielu początków i końców sieci zależności oraz ustalenia jednoznacznego przebiegu ścieżki krytycznej, wprowadzono fikcyjne zadania „początek” i „koniec”. Wiedząc, że w harmonogramie występują połączenia typu zakończ – rozpocznij (ZR) i rozpocznij – rozpocznij (RR), sieć zależności została tak zmodyfikowana, że zachowano pierwotne terminy wykonania

<sup>1</sup>Informacje o obiekcie „Globis” udostępnione dzięki uprzejmości firmy Bureau Veritas Polska.

zadań, wykorzystując wyłącznie relacje typu ZR wraz z przyspieszeniami bądź opóźnieniami między zadaniami. Ostatecznie analizowany harmonogram składał się z 82 czynności, których realizacja łącznie powinna trwać 392 dni.

Opierając się na wiadomościach teoretycznych opisanych powyżej, zlokalizowano położenie wszystkich niezbędnych buforów, dokonano obliczeń wielkości tych buforów czasu i skrócenia terminu realizacji tego przedsięwzięcia obiektu dla przykładowego prawdopodobieństwa 0,7 dla czasu wykonania pojedynczego zadania oraz prawdopodobieństwa 0,9 dla terminu zakończenia całego przedsięwzięcia.

Dla omawianego harmonogramu łańcuchem krytycznym jest ścieżka krytyczna, która „przebiega przez” roboty przygotowawcze, konstrukcję budynku – podziemną i część nadziemnej, roboty wykończeniowe oraz pozwolenia i odbiory. Na jej końcu umieszczony został bufor projektu. Dodatkowo na końcach ścieżek niekrytycznych, przy połączeniu z łańcuchem krytycznym, wstawiono trzy bufory zasilające.

W trakcie przeprowadzania obliczeń okazało się, że po wstawieniu czasów zadań o prawdopodobieństwie 0,7 i buforów BP i BZ łańcuch krytyczny zmienił swój przebieg w stosunku do początkowego położenia. Taka sytuacja jest niedopuszczalna według koncepcji tej metody – stosowanie buforów powinno zwiększać bezpieczeństwo czasowe tego ciągu, a nie wpływać na zmianę ścieżki krytycznej. Należało zmodyfikować obliczenia. Autorzy zaproponowali wstawienie na ciągu krytycznym dodatko-

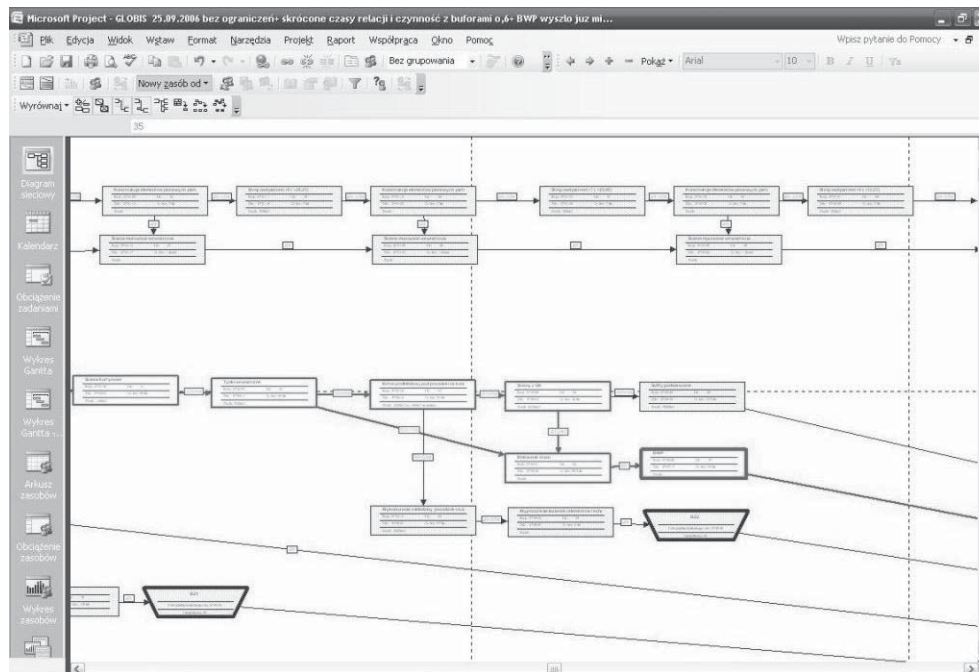
wego bufora – bufora wspomagającego projekt (BWP). Zlokalizowany on został na ścieżce krytycznej przed zadaniem, do którego dochodzą wszystkie ciągi niekrytyczne. Wielkość tego bufora obliczono w taki sam sposób jak wielkość bufora projektu, biorąc pod uwagę ciąg czynności, które ten bufor chroni. Na rysunku 1 przedstawiono fragment sieci z programu MS Project – pogrubione ramki w kształcie trapezów to bufory zasilające (BZ), a pogrubiony prostokąt to bufor wspomagający projekt (BWP).

Na rysunku 2 przedstawiono schemat, który wytycza metodykę przeprowadzenia obliczeń i wskazuje na problemy, jakie można napotkać podczas ich wykonywania i które należy we wskazany powyżej sposób rozwiązać.

### **Zestawienie wyników przeprowadzonych obliczeń i ich analiza**

Po wprowadzeniu nowych buforów BWP i BP' oraz obliczeniu ich wielkości okazało się, że zgodnie z założeniami Goldratta ścieżka krytyczna nie ulega zmianie, a termin realizacji przedsięwzięcia został skrócony. Początkowy termin zakończenia przedsięwzięcia wynosił 392 dni. Po zastosowaniu częściowo zmodyfikowanej koncepcji łańcucha krytycznego termin zakończenia przedsięwzięcia został skrócony dla prawdopodobieństwa trwania czynności 0,7 do 304 dni.

Wyniki analiz zamieszczono w tabeli 1 dla wielkości buforów podanych w dniach roboczych.



RYSUNEK 1. Fragment harmonogramu budynku biurowego „Globis” z zaznaczoną lokalizacją wybranych buforów

FIGURE 1. Part of schedule of “Globis” office building with some buffer sizes location being stressed

TABELA 1. Zestawienie terminów zakończenia całego przedsięwzięcia, prawdopodobieństwo ich dotrzymania oraz ich procentowe skrócenie dla kwantyli czasu czynności z prawdopodobieństwem 0,7 oraz kwantyla 0,9 (bez skrócenia)

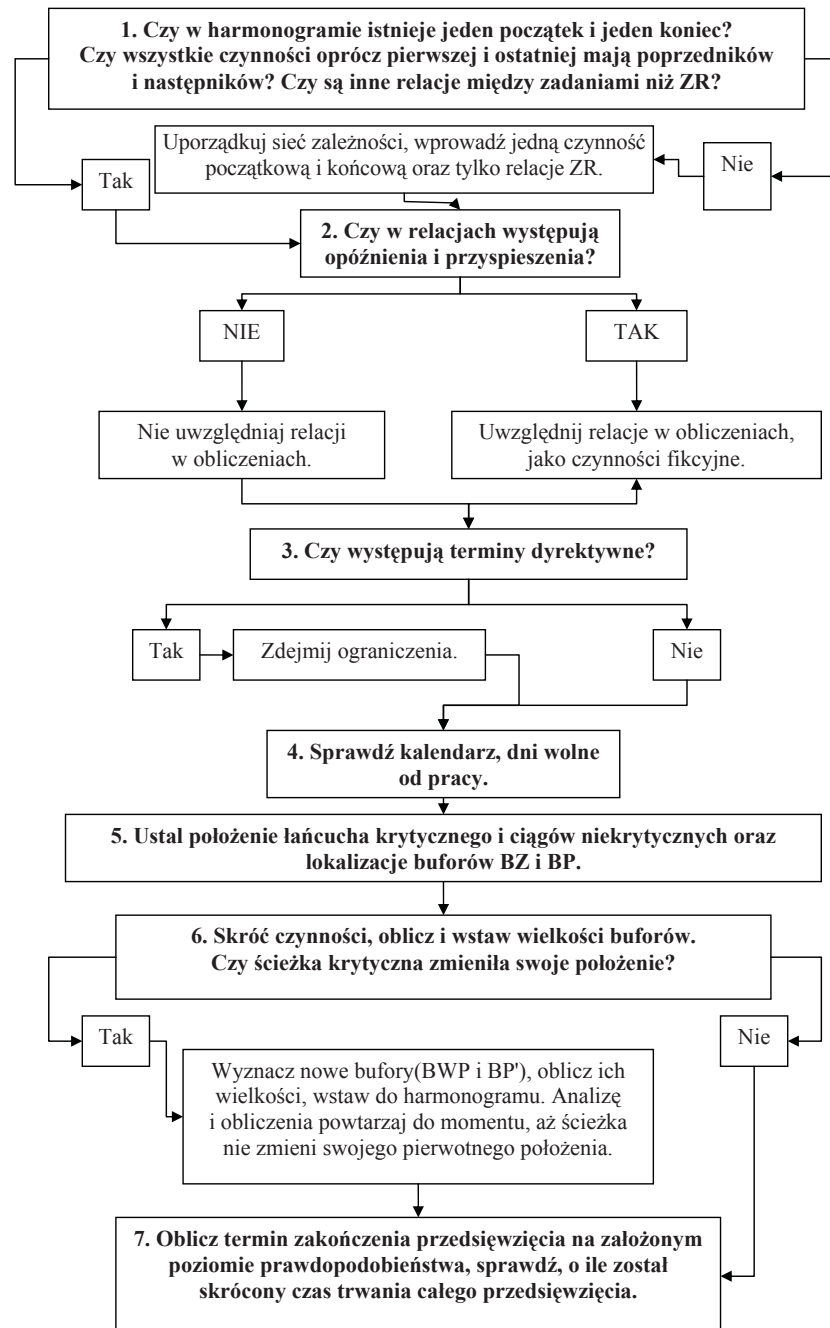
TABLE 1. Due dates listing, probability to meet them and reduction given in percentage for quantile activity time with 0.7 probability and quantile 0.9 (without reduction)

Czas czynności	Rodzaj bufora					Termin zakończenia przedsięwzięcia według MS Project	Skrócenie całego przedsięwzięcia [%]	Prawdopodobieństwo dotrzymania terminu końcowego przedsięwzięcia
	BWP	BZ1	BZ2	BZ3	BP'			
$t_{0,9}$	0	0	0	0	0	392	0	0,998
$t_{0,7}$	17	17	27	13	7	304	22	0,943

## Podsumowanie i wnioski

Analizie poddano harmonogram sieciowy obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu. Wyznaczono w nim lokalizacje i wielkości buforów czasu oraz

termin zakończenia całego przedsięwzięcia. Wykazano konieczność zastosowania bufora wspomagającego projekt (BWP) w celu utrzymania stałego przebiegu łańcucha krytycznego. Wszystkie obliczenia realizowane były w dwóch



RYSUNEK 2. Schemat postępowania przy wyznaczaniu wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia

FIGURE 2. Diagram how to calculate buffers sizes and the due date

programach: arkusza kalkulacyjnym Microsoft Excel oraz programie Microsoft Project. Analizę wykonano na podstawie rozkładu normalnego czasu trwania zadań i dla kwantyla prawdopodobieństwa czasu trwania każdego zadania równego 0,7. Początkowo założono występowanie dwóch typów buforów: zasilających (BZ) i projektu (BP). Po skróceniu czasów trwania czynności i przesunięć czasowych na relacjach oraz wprowadzeniu oszacowanych buforów okazało się jednak, że ścieżka krytyczna zmieniła swoje położenie w stosunku do harmonogramu początkowego. W celu skrócenia terminu całego przedsięwzięcia i wprowadzenia buforów czasu bez zmiany ścieżki krytycznej metodę Goldratta trzeba było zmodyfikować, wprowadzając dodatkowy bufor wspomagający (BWP). Dzięki temu rozwiązaniu metoda Goldratta znalazła zastosowanie w omawianym przykładzie obliczeniowym.

Przeprowadzone obliczenia pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Założenie rozkładu normalnego czasu trwania pojedynczego zadania oraz przyjęcie oszacowań czasu na podstawie dwóch kwantyli pozwala na szybkie obliczenie dowolnego kwantyla czasu trwania czynności, a także wielkości wszystkich buforów czasu.

2. Wyznaczenie czasu poszczególnych zadań z prawdopodobieństwem mniejszym niż 0,9 pozwala stworzyć rezerwę czasu wykorzystywaną w buforach zasilających, wspomagających i projektu.

3. Wielkość buforów zależy od skrócenia czasu zadań oraz przyjętego prawdopodobieństwa zakończenia całego przedsięwzięcia.

4. W analizowanym harmonogramie prawdopodobieństwo dotrzymania terminu realizacji całego przedsięwzięcia dla czasów trwania zadań równych  $t_{0,7}$  i obliczonych wartości buforów wynosi 0,943.

5. Możliwość dobierania wariantowych harmonogramów, zakładających wolniejsze lub szybsze tempo prac (mniej lub bardziej agresywnych) przy realizacji planowanego obiektu, można regulować rozłożeniem proporcji między sumą czasów zadań (przyjętym prawdopodobieństwem czasu ich trwania) a wielkością buforów.

6. Przyjęcie czasu poszczególnych czynności o wartościach kwantyli z mniejszym prawdopodobieństwem (np. 0,6) prowadzi do zbudowania harmonogramu zakładającego szybsze tempo prac (bardziej agresywnych rozwiązań) z większymi buforami i odwrotnie.

7. Zwiększenie prawdopodobieństwa dotrzymania całego przedsięwzięcia można osiągnąć przez zwiększenie bufora końcowego projektu.

8. W analizowanym obiekcie skrócone czasy czynności i przesunięć czasowych na relacjach, jak również wyznaczone buforów czasu pozwoliły na skrócenie terminu całego przedsięwzięcia o 22% w przypadku kwantyla czasu wszystkich zadań równego 0,7.

9. Dalszych badań wymaga opracowanie metodyki wyznaczania wielkości buforów przy relacjach między zadaniami typu rozpocznij – rozpocznij (RR) i zakończ – zakończ (ZZ).

Celem artykułu było przedstawienie zastosowania koncepcji łańcucha krytycznego dla typowego przedsięwzięcia budowlanego. W praktyce okazuje się jednak, że harmonogramy budowla-



ne mają złożoną sieć zależności, która utrudnia proste zastosowanie tej koncepcji. Kwestia wykorzystania buforów czasu analizowana jest przez badaczy od ponad 10 lat. Wiadomo, że wpływają one pozytywnie na dotrzymanie terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia, jednak na potrzeby budownictwa koncepcja ta wymaga dalszych badań i udoskonaleń.

## Liteatura

- CZARNIGOWSKA A., JAŚKOWSKI P., SOBOTKA A. 2004: Zastosowanie metody łańcucha krytycznego w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych. *Przegląd Organizacji* 11.
- GOLDRATT E.M. 1997: Critical chain. The North River Press, Great Barrerinton, MA.
- HAJDUCKI Z., ROGALSKA 2004: Shortening the realisation time of building projects with application of theory of constraints and critical chain scheduling. *Journal of Civil Engineering and Management* X, Suppl. 2.
- KAPLIŃSKI O. 2008: Development and usefulness of planning techniques and decision making foundations on the example of construction enterprises in Poland. *Technological and Economic Development of Economy* XIV, 4: 492–502.
- LEACH L.P. 2000: Critical Chain Project Management. Artech House, Boston – London.
- MILIAN Z. 2004: Łańcuch krytyczny w budownictwie. *Czasopismo Techniczne* 11-B.
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008: Wyznaczanie wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia w harmonogramach budowlanych. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej* 90. Seria Studia i Materiały 20: 289–297.

- RAND G.K. 2000: Critical chain: the theory of constraints applied to project management. *International Journal of Project Management* 18.
- RAZ T., BARNES R., DVIR D. 2003: A critical look at Critical Chain Project Management. *Project Management Journal* 34, 4.
- ROGALSKA M. 2005: Zastosowanie buforów czasu w harmonogramowaniu procesów budowlanych. *Przegląd Budowlany* 6.
- STEYN H. 2002: Project management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling. *International Journal of Project Management* 20: 75–80.

## Summary

**Setting buffers and completion date for project of office building “Globis” in Wrocław.** This article describes basics of Critical Chain concept and Buffer Management, as well as an approach to project management that comes from the Theory of Constraints. CCPM is a method with based on this particular concept. The article points out how to define place and the size of buffers to protect the due date and the critical chain of building object while preserving their specificity. This information were presented in concrete computational example of “Globis” office building in Wrocław.

### Authors' address:

Mieczysław Połoński, Aneta Ziółkowska  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: mieczyslaw\_polonski@sggw.pl  
aneta\_ziolkowska@sggw.pl