

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 53, 2011: 163–173

(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 53, 2011)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 53, 2011: 163–173

(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 53, 2011)

**Mieczysław POŁOŃSKI**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

### **Obliczanie czasu bufora projektu w harmonogramach jednopunktowych z ujemną zwłoką na relacjach typu ZR między zadaniami**

### **How to calculate project buffer time in PDM diagram with negative lag in FS relationship types between tasks**

**Słowa kluczowe:** sieci jednopunktowe, relacje, ujemna zwłoka, bufor projektu

**Key words:** Precedence Diagramming Method (PDM), relationship, negative lag, project buffer

#### **Wprowadzenie**

W ostatnich latach dużego znaczenia nabrały metody planowania i harmonogramowania robót inżynierskich, które pozwalają ograniczyć ryzyko przekroczenia planowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (Hoła i Mrozowicz 2003, Murray 2007, Skorupka 2008). Jedną z takich metod jest metoda Critical Chain Scheduling and Buffer Management – CC/BM (Steyn 2000, Herroelen 2001, Raz i in. 2003, Korman i Daniels 2003, Milian 2006). Bazuje ona na tradycyjnych harmonogramach sieciowych, jednak wprowadza kilka dodat-

kowych elementów, zaproponowanych przez Goldratta (2000) i znanych jako tzw. theory of constraints (TOC). Podstawowym założeniem w tej metodzie jest stworzenie bufora projektu (BP) zlokalizowanego na końcu nierozwidlonej ścieżki krytycznej i przeniesienia do niego części sumy czasów uzyskanych ze znacznego skrócenia zadań leżących na ścieżce krytycznej. Zdaniem autora TOC, wymagane skrócenie zadań można uzyskać, ponieważ z reguły szacowany czas zadań jest zawyżony. Spowodowane to jest próbą ukrycia na etapie planowania pewnej rezerwy czasu, dającej wykonawcy margines bezpieczeństwa. Wydaje się, że w wielu wypadkach, niezależnie od rezerwy czasu, którą wskazuje Goldratt, skrócenie czasu planowanych zadań można również uzyskać, intensyfikując tempo prac, lepiej i terminowo przygotowując stanowiska pracy,

dostarczając wszystkie niezbędne materiały i sprzęt na czas, właściwie dobierając skład brygad roboczych, zwiększając dyscyplinę pracy, podnosząc kwalifikacje zawodowe pracowników itp.

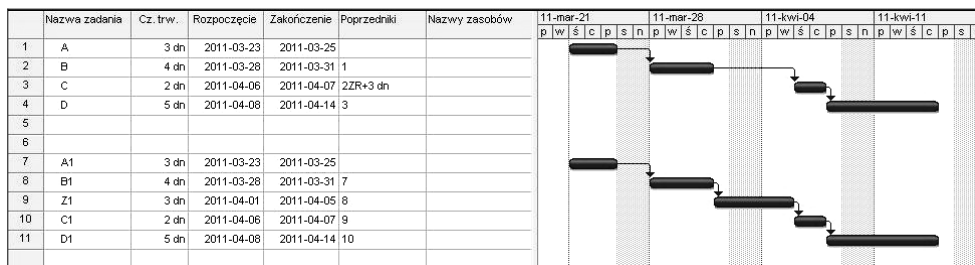
Twórca metody stosowania buforów w sieciach zależności, E. Goldratt, nie sprecyzował dokładnie metodyki wyznaczania ich wielkości (Goldratt 2000). W literaturze można spotkać różne, mniej lub bardziej uzasadnione teoretycznie propozycje (Stępień 2007, Połoński 2008, Połoński i Pruszyński 2008a, b, c, Połoński i Ziółkowska 2009). Jednak wszystkie te propozycje mają jedno zasadnicze ograniczenie: wymagają, aby konstrukcja jednopunktowej sieci zależności zawierała między zadaniami wyłącznie relacje typu zakończ – rozpocznij (ZR), bez zwłoki czasowej na relacji. Jest to bardzo silne ograniczenie, gdyż większość używanych w praktyce inżynierskiej harmonogramów zawiera pewną liczbę rozszerzonych typów relacji, tzn. relacji typu rozpocznij – rozpocznij (RR) i zakończ – zakończ (ZZ), oraz w wielu wypadkach na wszystkich typach relacji stosuje dodatnią lub ujemną zwłokę.

Jeżeli chodzi o rozszerzone typy relacji, to autor w swoich publikacjach wykazał (Połoński i Pruszyński 2008d, Połoński 2010), że stosując tylko relacje ZR oraz dodatnie i ujemne zwłoki na tych relacjach, można odwzorować w harmonogramie Gantta dowolny układ zadań połączonych relacjami RR i ZZ. Oznacza to, że istnieje możliwość eliminacji z konkretnego harmonogramu budowlanego relacji typu RR i ZZ, i zastąpienia ich tylko relacjami ZR. Co prawda, w trakcie dalszych aktualizacji harmonogram z dowolnymi typami

relacji i harmonogram z relacjami ZR będą odmiennie reagowały na ewentualne opóźnienia i/lub przyspieszenia planowanych terminów (tzn. obie wersje harmonogramu mogą prowadzić do wyznaczenia różnych planowanych terminów zakończenia przedsięwzięcia i przebiegu ścieżki krytycznej), jednak na etapie planowania, przed rozpoczęciem robót, najważniejsza jest możliwość policzenia terminu zakończenia całego przedsięwzięcia na założonym poziomie prawdopodobieństwa oraz wielkości bufora projektu i skrócenia pierwotnie planowanego terminu zakończenia robót. Niestety, jeżeli nawet uda się sprowadzić harmonogram do samych relacji ZR, to występowanie zwłoki na tych relacjach (zwłaszcza ujemnej) uniemożliwia, według istniejących dotychczas metodologii, obliczenie wielkości bufora projektu, a tym samym zastosowanie metody CC/BM do zmniejszenia ryzyka przekroczenia planowanego terminu. W artykule zaproponowano metodykę obliczenia wielkości bufora projektu, gdy na relacjach typu ZR występuje zwłoka czasowa różna od zera, zwłaszcza ujemna.

### **Możliwości eliminacji ujemnej zwłoki poprzez modyfikację budowy sieci jednopunktowej**

Na początku warto rozważyć problem dodatniej zwłoki. Jest to przypadek bardzo prosty, gdyż w obliczeniach zwłokę taką można zastąpić dodatkowym zadaniem. Przypadek taki przedstawiono na rysunku 1. W górnej części rysunku zilustrowano układ zadań w harmonogramie Gantta z dodatnią zwłoką 3 dni między zadaniami B i C. W dolnej części



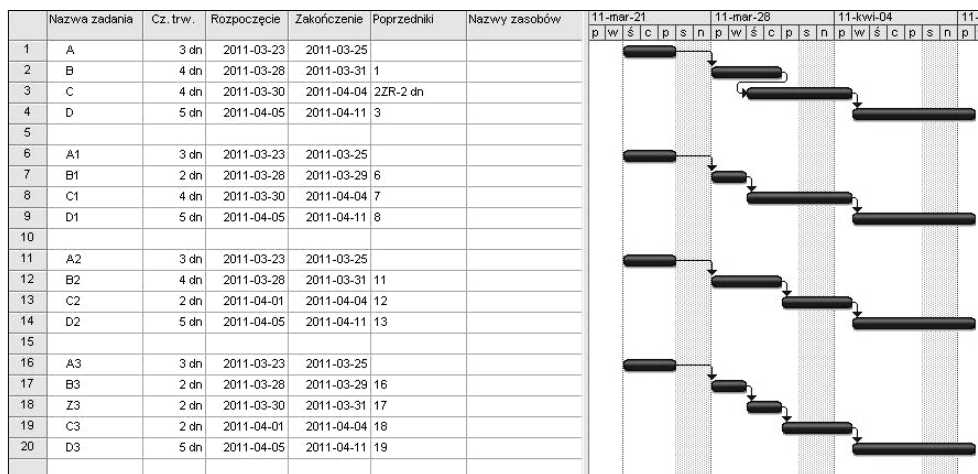
RYSUNEK 1. Układ zadań w harmonogramie Gantta z dodatnią zwłoką na relacji ZR między zadaniami B i C oraz zastąpieniem jej zadaniem Z1

FIGURE 1. Task arrangement in Gantt schedule with positive lag in FS relationship between tasks B and C and its replacement with task Z1

rysunku zwłoka została zastąpiona nowym zadaniem, o nazwie Z1 i czasie trwania równym 3 dni. Jak widać, układ powiązań i terminy wykonania pozostałych zadań zostały bez zmian. W ten sposób można wyeliminować z harmonogramu każdą dowolną dodatnią zwłokę. Odrębnym zagadnieniem jest sprawdzenie, czy czasowo utworzonego zadania można w dalszych etapach obliczeń skracać tak jak pozostałych czynności.

Odpowiedź na to pytanie może dać tylko rozważenie aspektów technologicznych planowanych robót.

Znacznie bardziej skomplikowana jest sytuacja, gdy wartość zwłoki jest ujemna. Rozważmy przypadek przedstawiony na rysunku 2. W tym wypadku ujemna zwłoka między zadaniami B i C oznacza, że początek zadania C wypada przed zakończeniem zadania B, w konsekwencji czego przez pewien czas (a do-



RYSUNEK 2. Układ zadań w harmonogramie Gantta z ujemną zwłoką na relacji ZR między zadaniami B i C oraz różne techniki eliminacji ujemnej zwłoki

FIGURE 2. Task arrangement in Gantt schedule with negative lag in FS relationship between tasks B and C and different techniques of negative lag elimination

kładnie czas zwłoki) zadania B i C są wykonywane równocześnie. Właśnie fakt nakładania się terminów dwóch (lub więcej) zadań sprawia podstawową trudność w wykonaniu obliczeń. Łatwo zauważyć, że istnieje kilka różnych metod modyfikacji harmonogramu w celu uniknięcia tego problemu.

Na rysunku 2 przedstawiono trzy rozwiązania (1, 2, 3). W pierwszym wypadku skrócono zadanie B1 (a więc poprzednika) o wartość ujemnej zwłoki, pozostawiając następnika C1 bez zmiany. Takie rozwiązanie jest uzasadnione charakterystyką ujemnej zwłoki, która przecież oznacza, że następnik może się zacząć po czasie określonym przez czas poprzednika minus zwłoka. Natomiast czas, jaki jest potrzebny na dokończenie poprzednika od momentu rozpoczęcia następnika, tak naprawdę nie ma większego znaczenia, gdyż nie warunkuje rozpoczęcia kolejnych zadań. W drugim wypadku skrócono następnik (zadanie C2) o tą samą wartość ujemnej zwłoki. Jednak takie rozwiązanie nie jest zgodne z ideą ujemnej zwłoki, gdyż wymaga pełnego wykonania poprzednika, a dopiero wówczas rozpoczęcie skróconego o czas zwłoki następnika. A więc taki układ zadań skraca następnika, a nie poprzednika. W trzecim rozwiązaniu skrócono zarówno poprzednik B3, jak i następnik C3 i wprowadzono dodatkowe zadanie (Z3) z czasem równym ujemnej zwłoce. Taki układ zadań skraca poprzednik, lecz równocześnie wprowadza nowe zadanie.

Należy zauważyć, że we wszystkich rozważanych przypadkach ścieżka krytyczna przebiega przez te same zadania co przed modyfikacją, a całkowity czas

wykonania przedsięwzięcia pozostaje niezmienny.

Postanowiono sprawdzić, jak poszczególne, zmodyfikowane układy zadań wpłyną na wielkość bufora projektu, czy rozważane przypadki będą się różnić i o ile oraz czy są łatwe do policzenia. Ostatecznie postanowiono przeanalizować trzy warianty obliczeniowe eliminacji ujemnej zwłoki na relacji ZR:

1. Poprzez skrócenie poprzednika do momentu rozpoczęcia następnika przy niezmiennym czasie następnika.

2. Poprzez skrócenie poprzednika i następnika oraz wprowadzenie nowego zadania, którego czas jest równy części wspólnej poprzednika i następnika.

3. Pozostawiając strukturę sieci bez zmian, natomiast w obliczeniach rozkładając harmonogram na dwie części: na zadania o dodatnim czasie (i ewentualnie dodatniej wartości zwłoki) oraz na wartości ujemne zwłoki na wszystkich relacjach. W tym wypadku obliczenia zostaną wykonane odrębnie dla obu części, przy czym wszystkie wartości ujemnej zwłoki zostaną potraktowane jako zadania z dodatnią wartością czasu (czas takiego zadania zastępującego relację wyznacza wartość bezwzględna ujemnej wartości zwłoki), a ostateczny termin zakończenia całego harmonogramu na założonym poziomie prawdopodobieństwa zostanie obliczony jako czas realizacji zadań z dodatnim czasem minus czas każdej zwłoki.

Trzeci wariant postanowiono rozważyć ze względu na stosunkowo prostą procedurę obliczeniową i brak konieczności modyfikacji budowy harmonogramu, co przy dużych harmonogramach

budowlanych może nastęrczać pewną trudność i prowadzić do błędów.

Należy zauważyć, że w każdym z rozpatrywanych wariantów wszystkie zadania (a więc również zastępujące relacje z ujemną zwłoką) potraktowano jako zmienne losowe o normalnym rozkładzie czasu trwania.

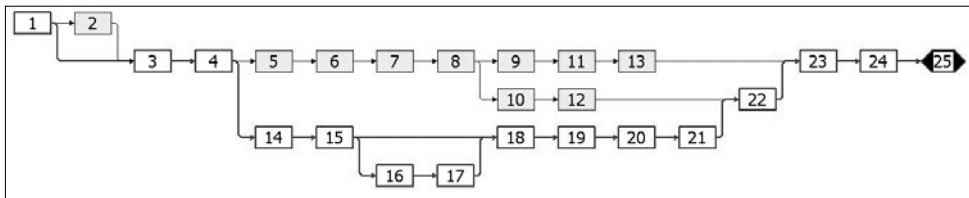
### Przykłady obliczeniowe

**Przykład nr 1.** Został on obliczony na podstawie uproszczonej wersji harmonogramu robót ziemnych stacji metra A19 w Warszawie. Dane do analizy przedstawiono na rysunkach 3 i 4 oraz w tabeli 1, w której zadania krytyczne (a więc stanowiące podstawę do oblicze-

nia wielkości bufora projektu) zostały wyróżnione grubą czcionką.

Na rysunku 5 przedstawiono dwa możliwe układy zadań na ścieżce krytycznej po eliminacji każdej ujemnej zwłoki na relacjach zgodnie z wariantem 1. przyjętej metodyki obliczeń, czyli po skróceniu poprzedników. Różnica w obu przedstawionych na rysunku 5 rozwiązaniach wynika z faktu, że w wyjściowym harmonogramie zadanie nr 16 rozpoczyna się później i trwa krócej niż następnik (patrz rys. 4). Prowadzi to do wariantowych sposobów eliminacji każdej ujemnej zwłoki na relacjach łączących te zadanie z poprzednikami i następnikami.

Na rysunku 6 przedstawiono układy zadań na ścieżce krytycznej po eliminacji każdej ujemnej zwłoki na relacjach



RYSUNEK 3. Sieć zależności przykładowego obliczeniowego nr 1

FIGURE 3. Relationship network in computational example number 1

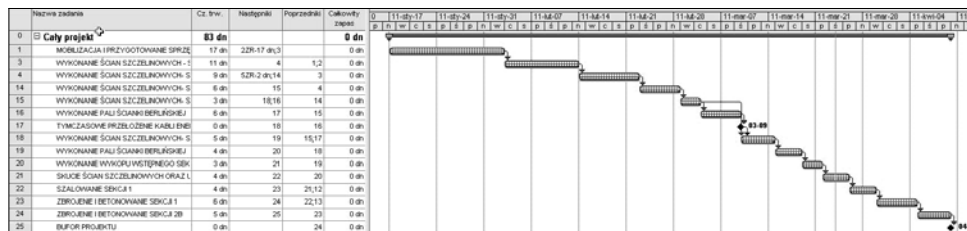
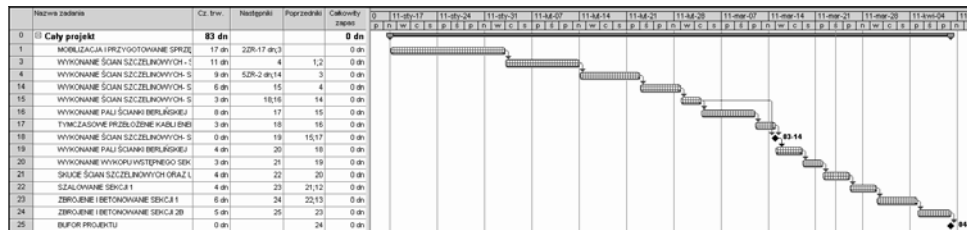


RYSUNEK 4. Układ zadań w harmonogramie Gantta z ujemną zwłoką na relacji ZR w przykładzie obliczeniowym nr 1

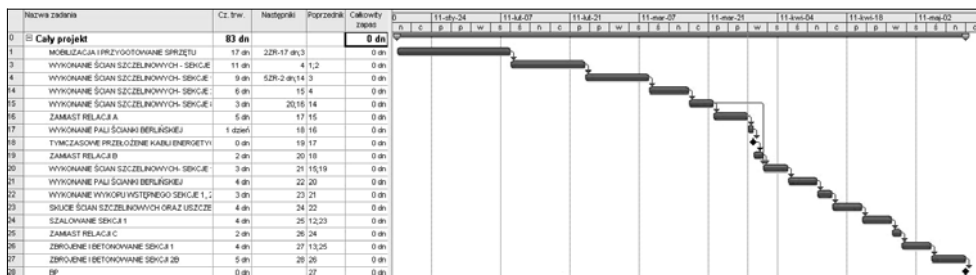
FIGURE 4. Task arrangement in Gantt schedule with negative lag in FS relationship in computational example number 1

TABELA 1. Dane harmonogramu wyjściowego, przykład nr 1  
TABLE 1. Data of initial schedule, example number 1

Nr	Nazwa Name	Czas Duration	Następniki Successor	Poprzedniki Predecessor	Zapis całkowity Total slack
2	PRZYGOTOWANIE FRONTU ROBÓT	8 dn	3	1ZR-17 dn	9 dn
3	ŚCIANY SZCZEL. S. 11-18 i 37-44	11 dn	4	1; 2	0 dn
4	ŚCIANY SZCZEL. S. 19-26 i 31-36	9 dn	5ZR-2 dn; 14	3	0 dn
5	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	6 dn	6ZR-2 dn	4ZR-2 dn	3 dn
6	WYKOP WSTĘPNY SEKCJE 5A i 5B	6 dn	7ZR-3 dn	5ZR-2 dn	3 dn
7	SKUCIE ŚCIAN SZCZEL. S. 18-25 i 32-37	6 dn	8ZR-2 dn	6ZR-3 dn	3 dn
8	SZALOWANIE SEKCJI 5A	6 dn	9ZR-3 dn; 10	7ZR-2 dn	3 dn
9	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5A	6 dn	11ZR+2 dn	8ZR-3 dn	3 dn
10	SZALOWANIE SEKCJI 5B	6 dn	12	8	4 dn
11	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 5B	6 dn	13	9ZR+2 dn	3 dn
12	SZALOWANIE PRZEWYŻSZENIA S. 5A	6 dn	22	10	4 dn
13	ZBROJENIE I BET. PRZEWYŻSZENIA S. 5A	6 dn	23	11	3 dn
14	ŚCIANY SZCZEL. S. 27-30 i 58-59	6 dn	15	4	0 dn
15	ŚCIANY SZCZEL. S. 8-10 i 45-47	8 dn	18; 16ZR-5 dn	14	0 dn
16	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	8 dn	17	15ZR-5 dn	0 dn
17	PRZEŁOŻENIE KABLI ENER. WIĄZKA 2	6 dn	18ZR-8 dn	16	0 dn
18	ŚCIANY SZCZEL. S. 1-7 i 48-57	11 dn	19ZR-6 dn	15; 17ZR-8 dn	0 dn
19	WYKONANIE PALI ŚCIANKI BERLIŃSKIEJ	10 dn	20ZR-6 dn	18ZR-6 dn	0 dn
20	WYK. WYKOPU WSTĘPNEGO S. 1, 2A, 2B	12 dn	21ZR-9 dn	19ZR-6 dn	0 dn
21	SKUCIE ŚCIAN SZCZEL. S. 1-8 i 47-57	13 dn	22ZR-9 dn	20ZR-9 dn	0 dn
22	SZALOWANIE SEKCJI 1	6 dn	23ZR-2 dn	12; 21ZR-9 dn	0 dn
23	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 1	6 dn	24	13; 22ZR-2 dn	0 dn
24	ZBROJENIE I BETONOWANIE SEKCJI 2B	5 dn	25	23	0 dn
25	BP	0 dn		24	0 dn



RYSunEK 5. Dwa równorzędne układy zadań na ścieżce krytycznej w harmonogramie Gantta po eliminacji każdej ujemnej zwłoki na relacjach według założeń wariantu 1, przykład nr 1  
FIGURE 5. Two equivalent tasks arrangements on critical path in Gantt schedule after eliminating negative lags in relationships according to guidelines of scenario number 1, example number 1



RYSunEK 6. Zmodyfikowany układ zadań na ścieżce krytycznej w harmonogramie Gantta po eliminacji każdej ujemnej zwłoki na relacjach według założeń wariantu 2, przykład nr 1  
 FIGURE 6. Modified task arrangement on critical path in Gantt schedule after eliminating negative lags in relationships according to guidelines of scenario number 2, example number 1

zgodnie z wariantem 2. Można zauważyć, że zwiększyła się liczba zadań krytycznych, gdyż doszły trzy zadania w wyniku połączenia części wspólnej poprzedników i następników. Natomiast wariant trzeci do obliczeń nie wymagał modyfikacji układu zadań i relacji, i pozostał niezmienny.

Na podstawie tak przyjętych ciągów zadań krytycznych, a więc po eliminacji ujemnej zwłoki na relacjach dla wszystkich trzech wariantów obliczono terminy zakończenia na założonym poziomie prawdopodobieństwa (tab. 2), co pozwoliło na wyznaczenie wielkości bufora projektu BP (tab. 3). Założono, że czas trwania zadań (również zwłoki traktowanej jako zadanie) oraz czas realizacji

całego harmonogramu podlegają rozkładowi normalnemu. Rozważano dwa poziomy skrócenia wszystkich zadań: realizacja z prawdopodobieństwem czasu zadania 0,60 i 0,65 oraz cztery poziomy prawdopodobieństwa dotrzymania terminu końcowego całego harmonogramu: 0,90, 0,92, 0,95 i 0,97. Metodyka obliczeń została opisana w poprzednich publikacjach autora (Połoński 2008, Połoński i Ziółkowska 2009).

Śledząc wyniki obliczeń tego przypadku, można stwierdzić, że warianty 1. i 2. dają bardzo zbliżone wyniki. W trakcie wykonywanych obliczeń porównano również wyniki z obu możliwych układów zadań krytycznych w wariantach 1., przedstawionych na rysunku 5. W tym

TABELA 2. Termin zakończenia przedsięwzięcia na zadanym poziomie prawdopodobieństwa, przykład nr 1

TABLE 2. Completion date on given probability level, example number 1

Numer wariantu Number of variant	Liczba zadań Number of task	Termin zakończenia przedsięwzięcia na poziomie prawdopodobieństwa Completion date with probability				Suma czasów zadań z prawdopodobieństwem Tasks total time duration with probability level	
		0,90	0,92	0,95	0,97	0,6	0,65
1	13	58	59	61	64	55	57
2	16	58	59	61	63	55	57
3	14(+)/7(-)	54	55	57	58	53	59

TABELA 3. Wielkość bufora projektu na zadanym poziomie prawdopodobieństwa zakończenia przedsięwzięcia i czasu wykonania zadań, przykład nr 1

TABLE 3. Project buffet size on given probability level of assignment completion date and of time of tasks execution, example number 1

Numer wariantu Number of variant	Liczba zadań Number of task	Wielkość bufora BP dla zadań z czasem $t_{0,6}$ na poziomie prawdopodobieństwa Projekt buffer size for task $t_{0,6}$ on given probability level				Wielkość bufora BP dla zadań z czasem $t_{0,65}$ na poziomie prawdopodobieństwa Projekt buffer size for task $t_{0,65}$ on given probability level			
		0,90	0,92	0,95	0,97	0,90	0,92	0,95	0,97
1	13	3	4	6	9	1	2	4	7
2	16	3	4	6	8	1	2	4	6
3	14(+)/7(-)	1	2	4	5	-5	-4	-2	-1

wypadku wyniki były również niemal identyczne, więc dla jasności wykonanych obliczeń ich prezentacja została pominięta. W wariacie 3. uzyskano nieco inne wyniki. Czas trwania całego przedsięwzięcia na wszystkich poziomach prawdopodobieństwa był nieco krótszy niż w pozostałych wariantach (a więc bardziej ryzykowny), co w zestawieniu z sumą skróconych czasów zadań realizowanych z prawdopodobieństwem 0,60 lub 0,65 powoduje, że wartości buforów wychodzą ujemne. Oznacza to, że w rozważanym przykładzie dla przyjętych parametrów obliczeniowych nie można zastosować bufora projektu, gdyż czas niezbędny na wykonanie wszystkich zadań leżących na ścieżce krytycznej jest większy niż zakładany termin zakończenia całego przedsięwzięcia. Oczywiście taki wynik uzyskany w tym konkretnym przypadku obliczeniowym nie oznacza, że podobnie będzie w innych harmonogramach, a jedynie to, że w analizowanym przykładzie, chcąc zastosować bufory czasu, należy się liczyć z przyjęciem bardziej radykalnego skrócenia czasu zadań i/lub

wydłużeniem całego przedsięwzięcia (z równoczesnym wzrostem prawdopodobieństwa jego dotrzymania).

**Przykład nr 2.** Został on obliczony na podstawie harmonogramu prac żelbetowych sekcji pierwszej Stadionu Narodowego w Warszawie (Kuran 2011). Cały oryginalny harmonogram liczył 81 zadań połączonych relacjami typu ZR, z czego 74 relacje posiadały ujemną zwłokę. Na ścieżce krytycznej leżało 36 zadań, a 31 relacji łączących te zadania posiadało ujemną zwłokę. Ze względu na liczbę zadań stanowiących podstawę wykonania analiz w artykule podano tylko zbiorcze wyniki obliczeń. Zestawiono je w tabelach 4 i 5.

Analizując wyniki tych obliczeń, łatwo daje się zauważyć, że w tym wypadku terminy zakończenia przedsięwzięcia, a tym samym również wielkości bufora projektu są bardzo zbliżone we wszystkich trzech wariantach. Można przypuszczać, że wynika to ze znacznie większej liczby zadań i relacji z każdą ujemną zwłoką leżącą na ścieżce krytycznej.



TABELA 4. Termin zakończenia przedsięwzięcia na zadanym poziomie prawdopodobieństwa, przykład nr 2

TABLE 4. Completion date on given probability level, example number 2

Numer wariantu Number of variant	Liczba zadań Number of task	Termin zakończenia przedsięwzięcia na poziomie prawdopodobieństwa Completion date with probability				Suma czasów zadań z prawdopodobieństwem Tasks total time duration with probability level	
		0,90	0,92	0,95	0,97	0,6	0,65
1	35	233	237	242	248	234	250
2	65	231	233	239	244	234	250
3	36(+)/31(-)	232	235	241	247	233	250

TABELA 5. Wielkość bufora projektu na zadanym poziomie prawdopodobieństwa zakończenia przedsięwzięcia i czasu wykonania zadań, przykład nr 2

TABLE 5. Project buffet size on given probability level of assignment completion date and of time of tasks execution, example number 2

Numer wariantu Number of variant	Liczba zadań Number of task	Wielkość bufora BP dla zadań z czasem $t_{0,6}$ na poziomie prawdopodobieństwa Projekt buffer size for task $t_{0,6}$ on given probability level				Wielkość bufora BP dla zadań z czasem $t_{0,65}$ na poziomie prawdopodobieństwa Projekt buffer size for task $t_{0,65}$ on given probability level			
		0,90	0,92	0,95	0,97	0,90	0,92	0,95	0,97
1	35	-1	3	8	14	-17	-13	-8	-2
2	65	-3	-1	5	10	-19	-17	-11	-6
3	36(+)/31(-)	-1	2	8	14	-18	-15	-9	-3

## Podsumowanie i wnioski

Zaproponowana w artykule metodyka umożliwi wyznaczenie wielkości bufora projektu BP w harmonogramach sieciowych skonstruowanych z zastosowaniem relacji ZR oraz przy występowaniu dodatnich i ujemnych opóźnień na tych relacjach. Dotychczas w literaturze nie podejmowano tego typu obliczeń, które z punktu widzenia praktycznego mają duże znaczenie w metodzie łańcucha krytycznego (CC/BM), gdyż bardzo często taki właśnie sposób konstruowania sieci zależności stosowany jest w harmonogramach budowlanych. Brak podobnych przykładów spowodowany

jest prawdopodobnie trudnością w zaproponowaniu metodyki, która posiadałaby odpowiednie uzasadnienie teoretyczne. Przeanalizowane warianty obliczeń również nie posiadają takiego uzasadnienia, a jedynie wskazują na możliwy sposób przeprowadzenia obliczeń i uzyskiwane wyniki. Wydaje się, że dopóki w literaturze nie zostanie zaprezentowany dokładniejszy sposób przeprowadzenia tego rodzaju obliczeń, dopóty do celów inżynierskich może być wykorzystywany sposób zaprezentowany powyżej, szczególnie w przypadku zbieżności uzyskanych wyników w rozpatrywanych wariantach.

Rozważając przydatność zaproponowanych wariantów od strony trudności przeprowadzenia obliczeń, należy stwierdzić, że wariant 1. jest najwygodniejszy. Wariant 2. nastęrcza trudności przy przebudowie harmonogramu. Natomiast wariant 3., który co prawda nie wymaga zmiany czasu zadań i zwłoki na relacjach, a sposób prowadzenia obliczeń jest stosunkowo prosty, jednak posiada jeden zasadniczy mankament – jeżeli liczba relacji z ujemną zwłoką na ścieżce krytycznej jest mała (od 3 do 5), to praktycznie nie można przeprowadzić obliczeń dla wartości ujemnych, a to w konsekwencji uniemożliwia wykonanie wyznaczenia wielkości bufora. O ile takie przypadki są rzadsze w odniesieniu do wyznaczenia wielkości bufora projektu (a więc z uwzględnieniem całej ścieżki krytycznej), o tyle stosując tę samą metodę obliczeniową do buforów zasilających czy wspomagających (a więc wyliczanych ze znacznie krótszych ciągów zadań niż ścieżka krytyczna), widać, że problem małej liczby zadań na ciągach obliczeniowych pojawia się znacznie częściej.

Ze względu na możliwość modyfikowania budowy harmonogramu w wariantcie 1. na nieco różne sposoby należy opracować ścisły algorytm przebudowy sieci zależności, co ujednotwili sposób prowadzenia obliczeń oraz pozwoli na oprogramowanie przedstawionej metodyki obliczania wielkości buforów. Zaproponowaną metodykę obliczeń należy zweryfikować na co najmniej kilku dalszych przypadkach obliczeniowych, najlepiej opartych na harmonogramach różnych obiektów budowlanych.

## Literatura

- GOLDRATT E. 2000: Łańcuch krytyczny. Wydawnictwo WERBEL, Warszawa.
- HERROELEN W., LEUS R. 2001: On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of Operations Management* 19: 559–577.
- HERROELEN W., LEUS R., DEMEULEMEESTER E. 2001: Critical chain project scheduling: Do not oversimplify. *Project Management Journal* 33, 4: 46–60.
- HOŁA B., MROZOWICZ J. 2003: Modelowanie procesów budowlanych o charakterze losowym. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- KORMAN R., DANIELS S.H. 2003: Critics Can't Find the Logic in Many of Today's CPM Schedules. *Engineering News-Record* 5/26, 250: 30–33.
- KURAN T. 2011: Wykonanie harmonogramu sieciowego metodą CCPM prac żelbetowych sekcji pierwszej Stadionu Narodowego w Warszawie. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- MILIAN Z. 2006: Metoda określania rozkładu czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych w acyklicznych sieciach stochastycznych. Politechnika Krakowska, Kraków.
- MURRAY B.W. 2007: Faster Construction Projects with CPM Scheduling. McGraw-Hill Professional Publishing, New York.
- POŁOŃSKI M. 2001: Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- POŁOŃSKI M. 2008: Obliczanie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych metodą CCPM na podstawie multiplikatywnego modelu czasu trwania czynności. Materiały z LIV Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZiTb „Krynica 2008”, 21–25 września 2008 r., Krynica: 531–538.
- POŁOŃSKI M. 2010: Wpływ budowy sieci zależności na przebieg ścieżki krytycznej i wyniki aktualizacji harmonogramu sieciowego. *Czasopismo techniczne* 2: 325–339.
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008a: Wyznaczanie wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia w harmonogramach budowlanych. *Prace Naukowe Instytutu*

- Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 90, Studia i Materiały 20: 289–297.*
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008b: Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych. Cz. I. Podstawy teoretyczne. *Przegląd Budowlany 2: 45–49.*
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008c: Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych. Cz. II. Praktyczne zastosowanie. *Przegląd Budowlany 3: 55–62.*
- POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K. 2008d: Stosowanie rozszerzonych typów relacji w harmonogramach przedsięwzięć budowlanych. Problemy przygotowania i realizacji inwestycji budowlanych „Warsztaty inżynierów budownictwa”. Puławy, 22–24 października 2008 r.
- POŁOŃSKI M., ZIÓLKOWSKA A. 2009: Wyznaczenie buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia dla obiektu biurowego „Globis” we Wrocławiu. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 3 (45): 26–34.*
- RAZ T., BARNES R., DVIR D. 2003: A critical look at Critical Chain Project Management. *Project Management Journal 34, 4: 35–44.*
- SKORUPKA D. 2008: Identification and Initial Risk Assessment of Construction Projects in Poland. *Journal of Management in Engineering 24, 3: 120–127.*
- STEYN H. 2000: An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling. *International Journal of Project Management 19: 363–369.*
- STĘPIEŃ P. 2007: Ścieżka projektu – suma zadań ([www.skutecznyprojekt.pl](http://www.skutecznyprojekt.pl)).

## Summary

**How to calculate project buffer time in PDM diagram with negative lag in FS relationship types between tasks.** The aim of the article was to present a method of calculating time of a project buffer, when in PDM diagram in FS relationships time lags had occurred as positive and especially negative. Possible means of positive and negative lags elimination were considered, three ways of conducting calculations were chosen. In the next part, the author showed two examples of calculations based on particular constructional schedules. Methods of conducting calculations as well as its outcomes were interpreted. The author also pointed out the necessity to verify proposed method of calculating the size of project buffer on further examples and to prepare accurate algorithm to rebuild relationship network which is one of the elements of proposed method.

### Author's address:

Mieczysław Połowski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: [mieczyslaw\\_polonski@sggw.p](mailto:mieczyslaw_polonski@sggw.p)