

Dane bibliograficzne o artykule: http://mieczyslaw_polonski.users.sggw.pl/mppublikacje

*harmonogramy budowlane, metoda łańcucha krytycznego,
metoda CCPM, bufor czasu*

Mieczysław POŁOŃSKI*
Kamil PRUSZYŃSKI*

WYZNACZANIE WIELKOŚCI BUFORÓW CZASU I TERMINU ZAKOŃCZENIA PRZEDSIĘWZIĘCIA W HARMONOGRAMACH BUDOWLANYCH

W referacie zostało omówione zagadnienie wyznaczania wielkości buforów czasu i terminu zakończenia przedsięwzięcia z założonym poziomem prawdopodobieństwa w harmonogramach budowlanych. Zaprezentowane założenia metody CCPM, możliwości jej stosowania do planowania przedsięwzięć inżynierskich oraz statystyczne uzasadnienie proponowanych rozwiązań. Zostało to poparte przykładem obliczeniowym wykonanym na rzeczywistym harmonogramie budowlanym.

1. WPROWADZENIE

W ostatnim czasie dużym zainteresowaniem w nowoczesnym podejściu do planowania przedsięwzięć cieszy się metoda CCPM (Critical Chain Project Management). Trudno jest jednak spotkać konkretne przykłady zastosowania jej do planowania przedsięwzięć budowlanych. Można to tłumaczyć nowością proponowanych rozwiązań, brakiem przykładów do naśladowania czy obawą przed odchodzeniem od sprawdzonych rozwiązań, jednak wydaje się, że istnieją również bardziej pragmatyczne powody. Mogą one wynikać z wielkości i złożoności harmonogramów budowlanych oraz wpływających stąd problemów praktycznych z zastosowaniem proponowanych w metodzie CCPM rozwiązań. Wystarczy jednak przyjrzeć się prawdziwemu harmonogramowi sieciowemu realizacji większego przedsięwzięcia budowlanego, aby zobaczyć zasadniczą różnicę w ich konstrukcji w stosunku do prezentowanych w literaturze prostych przykładów. Harmonogramy stosowane w praktyce inżynierskiej liczą najczęściej znacznie powyżej stu zadań, posiadają różne typy relacji, istnieje często kilka czynności początkowych i/lub końcowych, a ścieżka krytyczna rzadko stanowi pojedynczy ciąg. Próba prostego zastosowania wytycznych metody CCPM do tego rodzaju harmonogramów najczęściej

* Zakład Technologii i Organizacji Robót Inżynierskich SGGW, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

napotyka liczne trudności, prowadzące często do zmiany przebiegu ścieżki krytycznej, a więc łamie jedną z podstawowych zasad tej metody. W efekcie podejmowane próby stosowania buforów czasu w sieci zależności są zarzucane, a w praktyce inżynierskiej dalej stosuje się tradycyjne harmonogramy sieciowe.

2. STOSOWANIE METODY CCPM

Metoda CCPM oraz koncepcja stosowania buforów czasu były opisywane w literaturze [2,3,4,7], dlatego też w tym miejscu jedynie krótko przypomniane zostaną jej podstawowe założenia. A mianowicie zastosowanie metody wymaga:

- konstrukcji sieci zależności planowanego przedsięwzięcia i określenia czasu trwania czynności i wyznaczenia przebiegu ścieżki krytycznej,
- wstawienia do sieci nowych czynności zwanych buforami czasu,
- skrócenia czasu zadań i przeniesienia części tych skróceń do buforów,
- wyznaczenia rozkładu nowego terminu zakończenia planowanego przedsięwzięcia oraz obliczenia terminu zakończenia z określonym prawdopodobieństwem.

Zakłada się również, że wprowadzone bufory czasu i zmienione (krótsze) czasy zadań nie spowodują zmiany przebiegu ścieżki krytycznej. Zrealizowanie przytoczonych założeń wymaga praktycznego rozwiązania następujących zagadnień:

- ile należy zdefiniować buforów czasu i gdzie je zlokalizować w sieci zależności?
- o ile należy skrócić czasy wykonania poszczególnych zadań?
- co zrobić, jeśli w wyniku przeprowadzonych obliczeń przebieg ścieżki krytycznej uległ zmianie?
- jak wyznaczyć wielkość buforów w powiązaniu ze skróceniem czasów czynności (czy dla wszystkich buforów, można zastosować taką samą formułę)?
- jaki typ rozkładu przyjąć dla terminu zakończenia całego przedsięwzięcia i poszczególnych buforów oraz jak wyznaczyć parametry założonego rozkładu?
- jak obliczyć termin zakończenia przedsięwzięcia z założonym prawdopodobieństwem?

Jak widać z przytoczonej listy, w przypadku złożonej struktury sieci zależności rozwiązanie poszczególnych zagadnień wymaga odpowiedzi na kilka konkretnych pytań, a przyjęte rozwiązania będą rzutowały na ostateczny wynik analiz. Nie należy również zapominać o praktycznej stronie wykonywanych obliczeń i możliwości ich prowadzenia w szerokiej praktyce inżynierskiej.

Problem wyboru lokalizacji buforów, ich ilości i typów był już wcześniej rozważany przez autorów [5, 6]. Wykazano, że w przypadku złożonych sieci zależności nie wystarczy zastosowanie tylko bufora projektu i buforów zasilających, gdyż prowadzi to najczęściej do zmiany przebiegu ścieżki krytycznej i zmiany terminu zakończenia przedsięwzięcia. Zaproponowano również wprowadzenie nowych typów buforów wraz ze wskazaniem ich lokalizacji, które pozwalają temu zapobiec.

3. WIELKOŚCI SKRÓCEN CZYNNOŚCI I CZASY BUFORÓW

Twórca założeń metody łańcucha krytycznego E. Goldratt nie opracował szczegółowej metody skracania czasu zadań i wynikającej z niej wielkości buforów. Poprzestał on na ogólnym założeniu, że czasy czynności mogą być skrócone nawet do terminów, gwarantujących 50% pewność osiągnięcia ich zakładanego czasu, a połowę uzyskanego skrócenia można przenieść do buforów. Czas, o jaki został łącznie skrócony ciąg krytyczny pomniejszony o wartość bufora projektu (leżącego na tej ścieżce) stanowi skrócenie całego planowanego przedsięwzięcia. Takie uproszczone podejście jest bardzo wygodne obliczeniowo, jednak trudne do teoretycznego uzasadnienia. Dlatego w literaturze spotyka się propozycje, które wielkość bufora uzależniają od wartości odchyień standardowych czynności, na końcu których leży wyznaczany bufor [4, 8]. Jednak w tym wypadku wykonanie obliczeń skrócenia czasu każdej czynności i wielkości buforów będzie wymagało przyjęcia dwóch podstawowych założeń. Pierwsze z nich dotyczy typu rozkładu czasu pojedynczej czynności, drugie typu rozkładu terminu zakończenia całego przedsięwzięcia (lub terminu osiągnięcia analizowanego bufora).

Typ rozkładu czasu pojedynczej czynności, jaki występuje przy realizacji konkretnego obiektu jest trudny do jednoznacznego określenia. W literaturze i praktyce inżynierskiej zakłada się najczęściej rozkład: beta, beta-PERT, normalny, logarytmiczno-normalny, trójkątny, rzadziej równomierny czy wykładniczy. Każdy z tych rozkładów ma swoją charakterystykę oraz wynikające z niej parametry, głównie wariancję i charakterystyczne kwantyle oraz metody ich estymacji. Sposób ich wyznaczania i uzyskane wartości będą z kolei rzutowały na parametry rozkładu terminu zakończenia ciągu tych czynności.

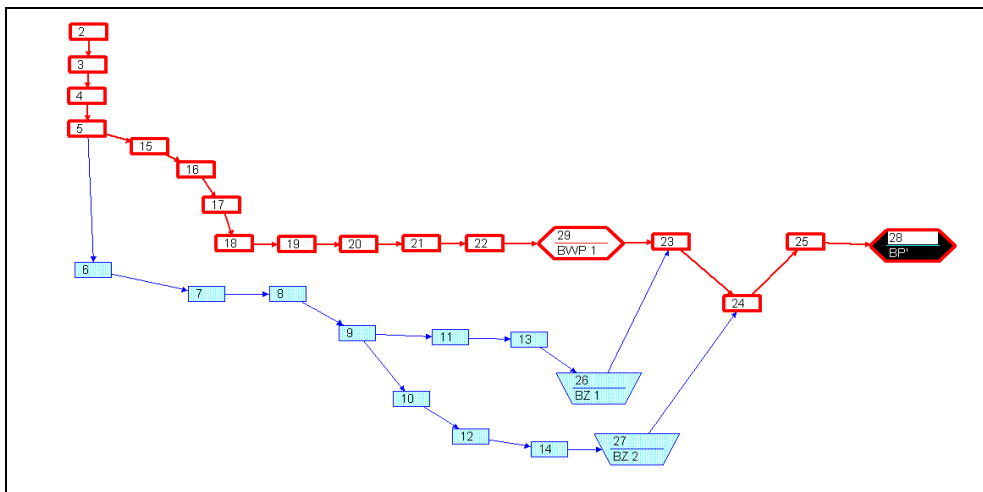
Rozważając rozkład terminu zdarzenia końcowego sieci (czy uogólniając dowolnego ciągu czynności następujących kolejno po sobie) odwołujemy się do twierdzenia centralnego (granicznego), na mocy którego przyjmujemy, że rozkład sumy niezależnych zmiennych losowych (o dowolnym rozkładzie) zbliża się do rozkładu normalnego w miarę, jak liczba tych zmiennych losowych rośnie. Należy również podkreślić, że nawet gdy liczba rozpatrywanych zmiennych jest tylko umiarkowanie duża, to jeśli żadna ze zmiennych nie dominuje nad pozostałymi i o ile te zmienne nie są w wysokim stopniu zależne rozkład ich sumy będzie bliski rozkładowi normalnemu [1]. Wiadomo również, że przy małej liczbie zmiennych rozkład sumy tych zmiennych bliższy będzie rozkładowi t-Studenta niż rozkładowi normalnemu. Ponieważ przy wyznaczaniu wartości buforów często mamy do czynienia z sytuacją, gdy ciąg czynności, na podstawie którego wyznaczamy wartość bufora nie jest zbyt liczny, warto zbadać jaki wpływ na końcowy wynik obliczeń ma przyjęcie jednego z tych dwóch typów rozkładów.

Rozpatrując problem wielkości buforów korzystamy również z faktu, że zmienność sumy jest zawsze mniejsza od sumy zmienności poszczególnych elementów składowych. Jest to bardzo ważna własność rozkładów, gdyż dzięki niej możemy skracać poszczególne czynności ciągu (a tym samym obniżać prawdopodobieństwa ich dotrzymania) pozostawiając prawdopodobieństwo końcowego termin całego przedsięwzięcia na określonym poziomie. Naturalnie, można to wykonywać tylko w pewnym zakresie

wartości czasów czynności, uzależnionym głównie prawdopodobieństwem dotrzymania terminu czynności, z jakim były określone pierwotne (nie skrócone) czasy poszczególnych zadań.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Poniżej zamieszczone zostały wyniki obliczeń. Posłużono się w tym celu harmonogramem robót ziemnych stacji metra A19 Marymont, który liczy 169 zadań. Z uwagi jednak na obszerność materiału badawczego dokonano jego agregacji i skrócenia tylko do pewnego fragmentu sieci, który jednak został tak dobrany, by reprezentował wszystkie konfiguracje połączeń jakie zostały dostrzeżone w całym tym przedsięwzięciu. Ograniczono się w ten sposób do 24 czynności (bez buforów) (rys. 1). Sieć zależności została opracowana w programie MS Project.



Rys. 1. Wybrany fragment sieci harmonogramu robót ziemnych stacji metra A19 Marymont z zaznaczonym przebiegiem ścieżki krytycznej

Fig 1. Chosen part of the schedule of the ground works of an underground station A19 Marymont with critical path marked

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie zadań z powyższej sieci wraz z podstawowymi danymi potrzebnymi do dalszej analizy, jak również dane umożliwiające powtórzenie przeprowadzonych w artykule obliczeń w dowolnym programie do analizy harmonogramów sieciowych. Grubymi ramkami zostały zaznaczone zadania leżące na ścieżce krytycznej.

Założono, że przyjęte wstępnie czasy trwania czynności ($t_{0,9}$) zostały określone przez wykonawcę z prawdopodobieństwem 0,9 i podlegają rozkładowi normalnemu. Następnie

oszacowano czasy trwania zadań $t_{0,5}$, których prawdopodobieństwo określono na 0,5 (z dokładnością do 0,5 dnia).

ID	$t_{0,9}$	$t_{0,5}$	ZC	POPRZ	ID	$t_{0,9}$	$t_{0,5}$	ZC	POPRZ
Całość	136	68	0		16	8	4	0	17
2	17	8,5	0	3	17	8	4	0	18
3	8	4	0	4	18	6	3	0	19
4	11	5,5	0	5	19	11	5,5	0	20
5	9	4,5	0	6;15	20	10	5	0	21
6	6	3	38	7	21	12	6	0	22
7	6	3	38	8	22	13	6,5	0	29
8	6	3	38	9	23	6	3	0	24
9	6	3	38	11;10	24	6	3	0	25
10	6	3	38	12	25	5	2,5	0	28
11	6	3	38	13	26	0	0	38	23
12	6	3	38	14	27	0	0	38	24
13	6	3	38	26	28	0	0	0	
14	6	3	38	27	29	0	0	0	23
15	6	3	0	16					

Tab. 1. Zestawienie czynności wybranego fragmentu robót ziemnych stacji metra A19 Marymont

Tab. 1 Juxtaposition of an activities from chosen fragment of ground works of underground station A19 Marymont

Mając dwa dowolne kwantyle i wiedząc, że dotyczą rozkładu normalnego można obliczyć odchylenie standardowe czasów czynności na podstawie następującej zależności:

$$\delta = \frac{t_{0,9} - t_{0,5}}{U_{0,9}},$$

gdzie:

$U_{0,9}$ jest odwrotnością skumulowanego, standardowego rozkładu normalnego.

Z kolei znając odchylenie standardowe oraz kwantyl $t_{0,5}$ czasu czynności można łatwo policzyć dowolny inny kwantyl. W dalszych rozważaniach brano pod uwagę kwantyle o prawdopodobieństwie: 0,55; 0,60; 0,70 i 0,80. Dysponując odchyleniami standardowymi oraz kwantylami $t_{0,5}$ wszystkich k czynności w ciągu można wyznaczyć termin zakończenia całego ciągu z przyjętym z góry prawdopodobieństwem, odczytując go z dystrybucji rozkładu normalnego $N(m_T, \delta_T)$ terminu końcowego dla następujących parametrów tego rozkładu:

$$m_T = \sum_{i=1}^k t_{0,5}, \quad \delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_i^2}$$

Za rozkład końcowy ciągu czynności przyjmowano rozkład normalny (o podanych powyżej parametrach) lub t-Studenta o liczbie stopni swobody $k-1$, gdzie k jest liczbą czynności w analizowanym ciągu. Na podstawie podanych powyżej wzorów obliczono termin zakończenia całego przedsięwzięcia z prawdopodobieństwem 0,9. Wyniósł on

odpowiednio dla rozkładu normalnego i t-Studenta: 86,6 i 93,5 dnia roboczego, co oznacza możliwość skrócenia całego przedsięwzięcia, odpowiednio o 36% i 31%. W analogiczny sposób wyznaczono czasy trwania wszystkich buforów. W tabeli 2 zestawiono ciągi czynności chronione poszczególnymi buforami, a w tabeli 3 przykładowe wyniki obliczeń dla buforu BWP1.

Lp	Bufor	Chroniony ciąg czynności ID	Liczba czynności ciągu
1	BWP1	2; 3; 4; 5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22	12
2	BZ1	6; 7; 8; 9; 11; 13	6
3	BZ2	6; 7; 8; 9; 10; 12; 14	7
4	BP'	23; 24; 25	3

Tab. 2. Zestawienie buforów i ciągów czynności chronionych tymi buforami.

Tab 2. Juxtaposition of buffers and series of an activities protected by this buffers

ID czyn.	$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	δ_i	$t_{0,55}$	$t_{0,60}$	$t_{0,70}$	$t_{0,80}$
2	8,5	17	6,632	9,33	10,18	11,98	14,08
3	4	8	3,121	4,39	4,79	5,64	6,63
4	5,5	11	4,291	6,04	6,59	7,75	9,11
5	4,5	9	3,511	4,94	5,39	6,34	7,46
15	3	6	2,340	3,29	3,59	4,23	4,97
16	4	8	3,121	4,39	4,79	5,64	6,63
17	4	8	3,121	4,39	4,79	5,64	6,63
18	3	6	2,340	3,29	3,59	4,23	4,97
19	5,5	11	4,291	6,04	6,59	7,75	9,11
20	5	10	3,901	5,49	5,99	7,05	8,28
21	6	12	4,681	6,59	7,19	8,46	9,94
22	6,5	13	5,071	7,14	7,78	9,16	10,77
Suma	59,5	119		65,33	71,26	83,84	98,57
Czas buforu przy czasach czynności			$t_{0,50}$	$t_{0,55}$	$t_{0,60}$	$t_{0,70}$	$t_{0,80}$
<i>Typ rozkładu: normalny</i>			18,0	12,1	6,2	-6,4	-21,1
<i>Typ rozkładu: t-Studenta</i>			25,2	19,3	13,4	0,8	-13,9
Termin zak. ciągu z prawd. 0,9 dla roz. N						77,45	
Termin zak. ciągu z prawd. 0,9 dla roz. t-St						84,66	

Tab. 3. Przykład obliczeń wielkości bufora BWP1 dla rozkładu czasu normalnego i t-Studenta oraz kwantyli czasu czynności chronionego ciągu.

Tab. 3. An example of calculation of the size of buffer for an distribution of normal time an T-student and quantiles time of activity of protected series

Czas bufora obliczono jako różnicę pomiędzy terminem zakończenia całego ciągu na poziomie prawdopodobieństwa 0,9, a sumą czasów czynności przyjętych dla danego kwantyla.

Po przeprowadzeniu podobnych obliczeń dla wszystkich buforów wykonano obliczenia sieci zależności w programie MS Project. W każdym analizowanym wariancie

wstawiano czasy wszystkich czynności dla badanego kwantyla oraz czasy buforów odpowiadające danemu kwantylowi (po zaokrągleniu do 0,5 dnia) i założonemu typowi rozkładu końcowego czasu: normalnemu lub t-Studenta. Ostateczne wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4.

5. PODSUMOWANIE

Łącznie wykonano 10 wariantów obliczeń analizowanej sieci zależności. We wszystkich badanych wariantach ścieżka krytyczna nie zmieniła swego położenia. Wariant 1 to wynik, jaki uzyskano na podstawie danych określonych przez wykonawcę i stanowiący punkty odniesienia dla dalszych obliczeń. Pozostałe warianty obliczono dla trzech kwantyli 0,50; 0,55 i 0,60 w tym samym schemacie: z buforami równymi 0 (dla porównania), oraz buforami wyznaczonymi dla rozkładu końcowego normalnego i t-Studenta. W tabeli pominięto obliczenia dla czasów czynności o kwantylach większych od 0,60, ponieważ prowadzą do wartości ujemnych niektórych buforów. Przeprowadzone obliczenia pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

Lp	Kwantyl czasu czynności	Czasy buforów				Rozkład terminu końcowego	Ter. zak całego przed.	% skrócenie całego przed.	Prawd. terminu końcowego wg rozkładu	
		BWP 1	BZ 1	BZ 2	BP'				norm.	t-St.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	t09	0	0	0	0		136	0	0,999	0,999
2	t05	0	0	0	0		68	50	0,500	0,000
3	t05	25	11	12	5*	T-St	98	28	0,981	0,942
4	t05	18	6,5	8	5	Norm	91	33	0,943	0,864
5	t055	0	0	0	0		75,5	44	0,697	0,386
6	t055	19,5	9,5	10	4*	T-St	99	27	0,984	0,949
7	t055	12	5	6	4	Norm	91,5	33	0,947	0,872
8	t06	0	0	0	0		81,5	40	0,824	0,632
9	t06	13,5	8	8	3*	T-St	98	28	0,981	0,942
10	t06					Norm	90,5	33	0,939	0,856

Tab. 4. Terminy zakończenia całego przedsięwzięcia, prawdopodobieństwa ich dotrzymania oraz procentowe skrócenie dla różnych czasów czynności (kwantyle 0,90 - bez skróceń oraz 0,50; 0,55 i 0,60) i dwóch typów rozkładu czasu trwania badanego ciągu: normalnego i t-Studenta;
* - ustalone na podstawie rozkładu normalnego

Tab. 4. The terms of finishing the whole enterprise, probability of keeping them and the percentage shorten for a different times of an activity quantiles 0,9-without shorten and 0,50; 0,55 and 0,60 and two types of time distribution of enterprise existing: normal and t-student;
* - set up on a basis of a normal distribution

- założenie rozkładu normalnego czasu pojedynczej czynności (modelu addytywnego) oraz wprowadzenie jednego dodatkowego oszacowania czasu czynności z przyjętym prawdopodobieństwem (najwygodniej w praktyce oszacować kwantyl 0,50 lecz pod względem obliczeniowym może to być dowolnie inny) pozwalają na stosunkowo szybkie i proste wyznaczenie odchylenia standardowego czasu tej czynności, a następnie wielkości buforów czasu,
- wielkość buforów czasu może być dostosowana do dowolnego poziomu prawdopodobieństwa zakończenia całego przedsięwzięcia,
- zakładany typ rozkładu czasu całego ciągu (normalny lub t-Studenta), przy małej liczbie czynności, ma dość istotny wpływ na końcowy termin zakończenia ciągu,
- dłuższe terminy zakończenia całego przedsięwzięcia uzyskuje się na podstawie rozkładu t-Studenta (skrócenie o około 28%), krótsze na podstawie rozkładu normalnego (skrócenie o około 33%),
- jako czasy czynności mogą być brane pod uwagę kwantyle w zakresie 0,50-0,60,
- przyjmując jako termin zakończenia całego przedsięwzięcia termin obliczony z założonym prawdopodobieństwem ze ścieżki krytycznej agresywność skróceń czynności można regulować rozłożeniem proporcji pomiędzy sumą czasów czynności, a wielkością buforów,
- przyjęcie czasów czynności o wartościach kwantyli z mniejszym prawdopodobieństwem (np. 0,50) prowadzi do bardziej agresywnych rozwiązań z większymi buforami i odwrotnie,
- podwyższenie prawdopodobieństwa dotrzymania całego przedsięwzięcia można osiągnąć przez zwiększenie bufora końcowego projektu,
- ostateczny wybór wariantu czasów trwania czynności i wynikających z nich wielkości buforów można pozostawić managerowi projektu wskazując jedynie na możliwość dobierania mniej lub bardziej agresywnych wariantów harmonogramów realizacji planowanego obiektu

LITERATURA

- [1] BENJAMIN J. R., CORNELL C. A., Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów, WNT, Warszawa 1977
- [2] CZARNIGOWSKA A., JAŚKOWSKI P., SOBOTKA A., Zastosowanie metody łańcucha krytycznego w harmonogramowaniu przedsięwzięć budowlanych. Konferencja Naukowa „Zarządzanie procesami inwestycyjnymi w budownictwie”, Politechnika Krakowska 2004
- [3] GOLDRATT E., Łańcuch krytyczny, Wyd. WERBEL, Warszawa 2000
- [4] MILIAN Z., Metoda określania rozkładu czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych w acyklicznych sieciach stochastycznych. Politechnika Krakowska 2006
- [5] POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K., Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. I) - podstawy teoretyczne, Przegląd budowlany 02/2008, s. 45-49
- [6] POŁOŃSKI M., PRUSZYŃSKI K., Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. II) - praktyczne zastosowanie, Przegląd budowlany 03/2008, s. 55-62

- [7] RAND G. K.: Critical chain: the theory of constraints applied to project management. International Journal of Project Management 18 (2000), pp. 173-177
- [8] STEPIEŃ P., Ścieżka projektu - suma zadań, www.skutecznyprojekt.pl

SETTING BUFFER SIZES AND A COMPLETION DATE FOR PROJECTS IN CONSTRUCTIONAL SCHEDULES

In the thesis the case of setting the size of buffers of the time in the building schedules was elaborated. The presumptions of additive model that let to shorten in the CCPM method as well the tasks and time buffers were presented. It was supported by a calculating example on a real building schedule.