

Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. I) – podstawy teoretyczne

Dr hab. inż. Mieczysław Połoński, mgr inż. Kamil Pruszyński,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

1. Wprowadzenie

W celu lepszego zarządzania przedsięwzięciami powstało wiele metod, wśród których są metody analiz sieci zależności. Za początek tego nurtu uważa się metodę CPM (Critical Path Method), która powstała w 1957 roku na potrzeby armii USA. Oparta ona była na sieci definiowanej krawędziowo i dotyczyła tylko analizy czasu w ujęciu deterministycznym. W 1958 roku powstała kolejna metoda – PERT (Program Evaluation and Review Technique), która na podstawie tych samych założeń definiowanych krawędziowo umożliwiała przeprowadzenie analizy czasu już w ujęciu probabilistycznym [5]. Był to początek podejścia stochastycznego do realizacji przedsięwzięć. Rozwinięciem tych podstawowych metod są metody m.in.: GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), GERTS (Graphical Evaluation and Review Technique Simulation) czy CYCLONE (CYCLic Operations NEtwork) [2].

Wraz rozwojem informatycznych technik obliczeniowych zaczęło powstawać wiele modyfikacji ww. metod w postaci gotowych programów komputerowych [5]. Upraszczały one w znaczny sposób, a niejednokrotnie w ogóle umożliwiały przeprowadzenie wielu skomplikowanych obliczeń. Są to np. programy: Primavera, PowerProject Teamplan, TILOS oraz SureTrak, Pertmaster Project Risk czy najbardziej dzisiaj rozpowszechniony MS Project. Większość dzisiaj stosowanego oprogramowania do zarządzania przedsięwzięciami, poza obliczeniami czasu ich trwania, została poszerzona o analizę środków, ale także o wybrane elementy analizy ryzyka [7].

Poza dość złożonymi obliczeniowo metodami, powstają i inne bardziej praktyczne sposoby radzenia sobie z ryzykiem, podnosząc tym samym wiarygodność prognozowania różnego rodzaju przedsięwzięć. Przykładem może być metoda *łańcucha krytycznego* (Critical Chain) [6].

Metoda *łańcucha krytycznego*, której autorem jest dr E. M. Goldratt została zaprezentowana w 1997 roku. Autor przedstawił w niej ogólne wytyczne do lepszego zarządzania zasobami w projekcie [1]. Ze względu na jej interdyscyplinarny charakter znalazła ona powszechne uznanie wśród kadry zarządzającej, zarówno w przedsięwzięciach ekonomicznych, jak i informatycznych [3].

Jak do tej pory brak jest szerszych, praktycznych opracowań niniejszej metody dla przedsięwzięć inżynierskich. Wynikać to może ze skomplikowanych w swojej strukturze harmonogramów budowlanych, gdzie niejednokrotnie kilka czy kilkanaście ciągów podkrytycznych w różny sposób jest powiązanych z ciągiem głównym projektu.

W artykule zaprezentowana została zmodyfikowana metoda dostosowania *łańcucha krytycznego* do takich właśnie harmonogramów, opracowana przez autorów artykułu. W pracy skupiono się na koncepcji lokalizacji buforów, nie zaś nad ich wielkościami. Analiza wielkości buforów będzie tematem osobnej publikacji.

Ponadto rozpatrzony został wariant budowy sieci zależności składający się tylko z jednego zadania początkowego i końcowego oraz standardowych relacji między zadaniami typu zakończ – rozpocznij (ZR).

2. Ogólne zasady stosowania buforów czasu

Łańcuch krytyczny to ciąg najdłuższych, zależnych od siebie zadań (w artykule nazywanych też zamiennie czynnościami) koniecznych do zrealizowania ostatecznego celu przedsięwzięcia przy optymalnych zasobach. W przypadku, kiedy zasoby są nieograniczone definicja ta pokrywa się z definicją ścieżki krytycznej metody CPM.

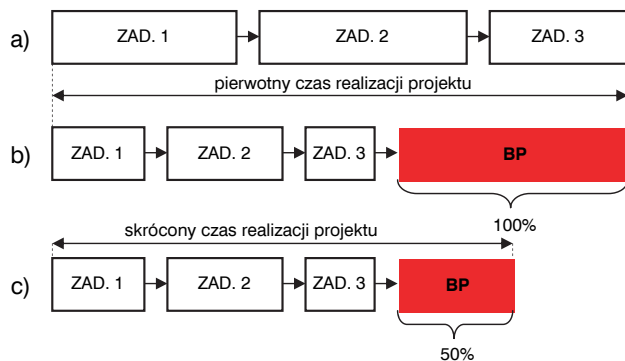
Zgodnie z wytycznymi Goldratta, jakie zawarł w swojej książce [1], najpierw należy zredukować długości trwania poszczególnych zadań. Zakłada się bowiem, że początkowe prawdopodobieństwo dotrzymania

terminu pojedynczego zadania wynosi ok. 90%. Tak wysoki poziom prawdopodobieństwa dotrzymania czasu trwania kolejnych zadań prowadzi do znacznego wydłużenia całego przedsięwzięcia – nie zawsze zasadnego. Nie ma to jednak zazwyczaj odzwierciedlenia w rzeczywistym czasie trwania prac przy danej czynności. Dlatego też zgodnie z koncepcją *łańcucha krytycznego*, należy skrócić terminy realizacji zadań do pewnej wartości. Goldratt szacuje to skrócenie na poziomie 30–50% długości czasu wyjściowego (przy początkowym prawdopodobieństwie jego dotrzymania na poziomie 90%). W ten sposób pozbywając się m.in. tzw. syndromu studenta („Najpierw wywalcz sobie rezerwę czasową. Kiedy ją uzyskasz, masz już sporo czasu, więc po co się spieszyć? Kiedy w końcu zaczniesz pracę? Odkładacie na ostatnią chwilę. Taka jest natura ludzka.” [1]).

Skrócenie czasów wykonania czynności może jednak prowadzić do zmiany przebiegu łańcucha krytycznego oraz obniżenia prawdopodobieństwa dotrzymania terminu końcowego przedsięwzięcia. Zapobiegać temu mają wprowadzone przez Goldratta następujące bufor czasu [3]:

- bufor projektu (BP) – umieszczany na końcu harmonogramu (ścieżki krytycznej) element mający na celu zapewnienie bezpieczeństwa dotrzymania końcowego terminu przedsięwzięcia oraz umożliwienie jego kontrolowania (rysunek 1),
- bufor zasilający (BZ) – element harmonogramu mający na celu utrzymanie niezmienności łańcucha krytycznego oraz umożliwienie kontrolowania jego stabilności (rysunek 2).

Rysunek 1a przedstawia przykładowy ciąg zadań. Czasy ich trwania znajdują odzwierciedlenie w proporcjonalnej długości prostokątów. Połączenia pomiędzy zadaniami w postaci strzałek obrazują tylko relacje pomiędzy elementami ciągu. Czasy trwania realizacji zadań są podane z pewnością 90% jego dotrzymania. Na kolejnym rysunku (rysunek 1b) zobrazowano ten sam przykładowy ciąg zadań, który uległ – w myśl metody *łańcucha krytycznego* – skróceniu, tak by szansa dotrzymania terminu każdego pojedynczego zadania była na poziomie 50% pewności. Powstały bufor projektu swoją długość uzyskał dzięki przeniesieniu zredukowanego czasu trwania zadań krytycznych do tego elementu. Jego wielkość w tym momencie stanowi sumę skróceń ze wszystkich zadań jakich on dotyczy, tzn. ścieżki krytycznej. Ostateczny termin całego przedsięwzięcia, zarówno w tym, jak i w poprzednim przypadku nie uległ zmianie. Natomiast w ostatniej części tego



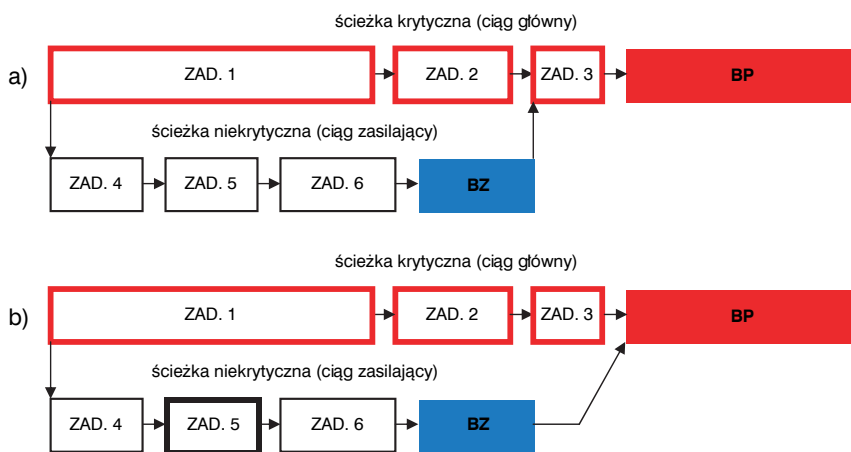
Rys. 1. Schemat lokalizacji bufora projektu (BP)

Źródło: Milian Z. [4]

rysunku (rysunek 1c) dokonano zmiany długości czasu bufora projektu. Metoda, jak już wspomniano, nie określa dokładnie o jaką wartość należy go redukować. Zależy jest to od specyfiki każdego projektowanego przedsięwzięcia. Jak widać na rysunku, w tym przypadku bufor projektu został skrócony o 50% [3].

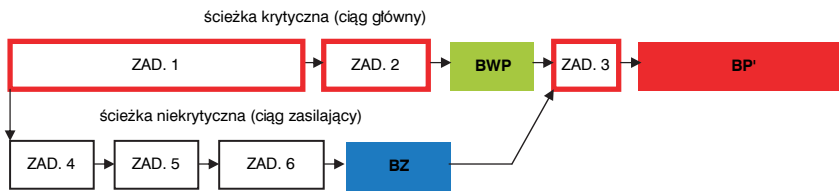
Bufer zasilający (rysunek 2) znajduje się na końcu ścieżki niekrytycznej dochodzącej do ciągu głównego projektu (ścieżki krytycznej). Ma on na celu ochronę terminu rozpoczęcia zadania w ciągu krytycznym, z którym połączony jest bufor zasilający (rysunek 2a) oraz całego ciągu krytycznego przed zmianą jego położenia [4]. W przypadku, kiedy ciąg zasilający łączy się z siecią na samym końcu przedsięwzięcia, przed wprowadzonym buforem projektu (rysunek 2b) należy na końcu ścieżki niekrytycznej również umieścić bufor zasilający, gdyż chroni on wówczas termin zakończenia całego przedsięwzięcia.

Zatem do obliczenia końcowego terminu projektu wg metody *łańcucha krytycznego* Goldratta należy uwzględnić skrócony harmonogram całego przedsięwzięcia oraz wszystkie zastosowane bufor w projekcie (BP i BZ).

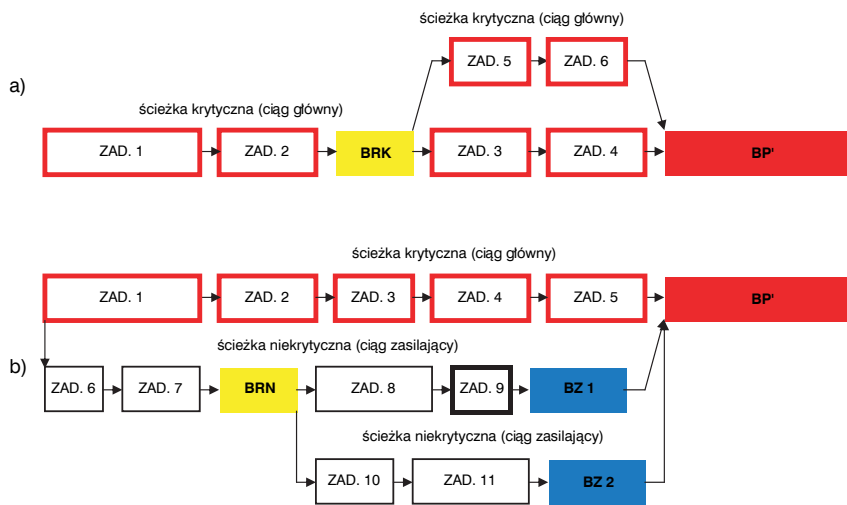


Rys. 2. Schemat lokalizacji bufora zasilającego (BZ)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Schemat lokalizacji bufora wspomagającego projekt (BWP)
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Schemat lokalizacji bufora reagującego na ściance krytycznej (BRK) i niekrytycznej (BRN)
 Źródło: opracowanie własne

Autorzy zdają sobie sprawę, że tak przedstawiony zarys metody Goldratta nie wyczerpuje wszystkich jego aspektów, które zawarte są w literaturze [1], [3], [4]. Zostały one jednak w tym artykule tak dobrane, aby móc przedstawić problematykę lokalizacji buforów czasu w realizacji przedsięwzięć budowlanych.

3. Zmodyfikowana koncepcja lokalizacji buforów czasu

Jak wynika z dotychczasowych badań autorów, stosowanie buforów czasu bez żadnych modyfikacji założeń metody Goldratta do złożonych sieci zależności nie spełnia podstawowych jej wymagań, gdyż prowadzi do zmiany położenia ścianki krytycznej. Poniżej zamieszczono propozycję dostosowania metody łańcucha krytycznego do przedsięwzięć inżynierskich. Praktyczne jej zastosowanie z wynikami obliczeń czytelnik znajdzie w drugiej części artykułu.

W toku analiz, jakie przeprowadzili autorzy, dokonano modyfikacji koncepcji lokalizacji buforów czasu wraz ze sposobem wyliczenia ich długości.

Do sieci zależności wprowadzono dodatkowe typy buforów:

- Bufor wspomagający projekt (BWP), który pozwoli zachować zapas czasu dla ciągu zasilającego, tak

by ten nie stał się nowym ciągiem krytycznym (rysunek 3). Jego lokalizację ustalono na ściance krytycznej przed zadaniem, do którego dochodzi rozpatrywany ciąg niekrytyczny. Wyliczenie jego wielkości ustala się na takiej samej zasadzie jak wielkość bufora projektu, ale biorąc pod uwagę czasy trwania czynności leżących na ściance krytycznej chronionych danym buforem BWP tzn. leżącym pomiędzy danym a poprzednim buforem wspomagającym (lub początkiem sieci). Wielkości kolejnych BWP zmniejszają czas bufora końcowego sieci, czyli nowy bufor projektu (BP'), staje się faktycznie jednym z BWP. Musi jednak pozostać zachowana zasada:

$$\sum_{i=1}^n BWP_i + BP' = BP,$$

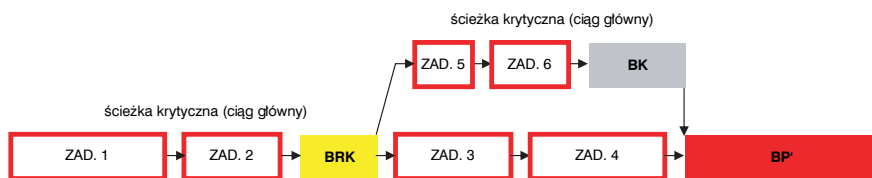
gdzie:
 BWP_i – i-ty bufor wspomagający projekt,
 BP' – nowy bufor projektu,
 BP – bufor projektu wg założeń łańcucha krytycznego,
 n – ilość buforów wspomagających projekt.

- Bufor reagujący na ściance krytycznej (BRK) i bufor reagujący na ściance niekrytycznej (BRN) stosowane w przypadku, kiedy występują w harmonogramie ciągi, które mają ze sobą wspólny pewien fragment (rysunek 4). Na rysunku 4a przedstawiono położenie bufora reagującego na ściance krytycznej, natomiast na rysunku 4b pokazano lokalizację bufora reagującego na ściance niekrytycznej. Należy je stosować na końcu wspólnej ścianki – na jej rozwidleniu. Brak tych buforów powoduje błędny wynik wyznaczania wielkości pozostałych buforów na danych ciągach, spowodowany wielokrotnym uwzględnianiem w obliczeniach tych samych czynności.

- Bufor kończący (BK) położony na końcu ścianki nie zakończonej innym buforem (rysunek 5), tak by jedynym końcem sieci był nowy bufor projektu. Jego zadaniem jest ochrona czasowa tych fragmentów ciągów – zarówno znajdujących się na ściance krytycznej, jak i poza nią – które nie podlegają innemu zabezpieczeniu. Jego wielkość wyznacza się analogicznie jak dla innych buforów.

W przypadku, kiedy poszczególne bufory znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie na jednym ciągu, można je ze sobą połączyć.

Przy tak zastosowanej lokalizacji i odpowiednio wyznaczonych rozmiarach buforów uzyskuje się efekt skró-



Rys. 5. Schemat lokalizacji bufora kończącego (BK)

Źródło: opracowanie własne

cenia całego przedsięwzięcia zgodnie z założeniami metody łańcucha krytycznego wg Goldratta, przy niezmiennym położeniu ścieżki krytycznej.

Czas trwania każdego bufora wyznacza się na podstawie czasu trwania ciągu, na końcu którego jest on zlokalizowany. I tak wielkość bufora projektu wyznacza się na podstawie długości trwania przebiegu ścieżki krytycznej w rozpatrywanej sieci. W tym celu początkową i końcową datę trwania tego ciągu należy zamienić na kolejne dni przebiegu przedsięwzięcia. Uzyska się w ten sposób wartości numeryczne rozpoczęcia i zakończenia ciągu krytycznego. Potem należy obliczyć długość jego czasu trwania i wyznaczyć różnicę pomiędzy końcem a początkiem tego ciągu. W kolejnym kroku obliczeń skraca się czasy trwania czynności leżących na zredukowanej ścieżce krytycznej. Następnie należy obliczyć różnicę pomiędzy długością trwania pierwotnego i zredukowanego ciągu krytycznego. Na zakończenie trzeba dokonać procentowego skrócenia wyliczonego w ten sposób czasu trwania przedsięwzięcia objętego rozpatrywaną siecią. Obliczona w ten sposób wielkość stanowi wartość bufora projektu.



Rys. 6. Schemat obliczeniowy długości trwania ciągu dla sieci jednopunktowej

Źródło: opracowanie własne

W analogiczny sposób należy postąpić przy wyznaczaniu wielkości pozostałych buforów. Można to zapisać:

- w sieci jednopunktowej (rysunek 6) używanej np. w programie MS Project, w którym zostały przeprowadzone eksperymenty w drugiej części artykułu na rzeczywistym harmonogramie, w postaci następującego wzoru:

$$WB_{i-j} = P \cdot [(Tpk_j - Tpp_i) - (Tsk_j - Tsp_i)],$$

gdzie:

WB_{i-j} – wielkość bufora czasu chroniącego ciąg pomiędzy zadaniami $i-j$,

i – numer zadania rozpoczynającego ciąg,

j – numer zadania kończącego ciąg,

P - procentowa redukcja czasu trwania ciągu,

T_{ppi} – termin najpóźniejszego początku zadania i przed skróceniem,

T_{pkj} – termin najpóźniejszego końca zadania j przed skróceniem,

T_{spi} – termin najpóźniejszego początku zadania i po skróceniu,

T_{skj} – termin najpóźniejszego końca zadania j po skróceniu.

- w sieci dwupunktowej (rysunek 7) powyższy opis można przedstawić w postaci wzoru:

$$WB_{i-j} = P \cdot [(NP_j - NP_i) - (NP'_j - NP'_i)],$$

gdzie:

WB_{i-j} – wielkość bufora czasu chroniącego ciąg pomiędzy zdarzeniami $i-j$,

i – numer zdarzenia, w którym rozpoczyna się rozpatrywany ciąg,

j – numer zdarzenia, w którym kończy się rozpatrywany ciąg,

t_1, \dots, t_n – czasy trwania czynności przed skróceniem,

t'_1, \dots, t'_n – czasy trwania czynności po skróceniu,

P – procentowa redukcja czasu trwania ciągu,

NP_i – najpóźniejszy termin zaistnienia i -tego zdarzenia przed skróceniem,

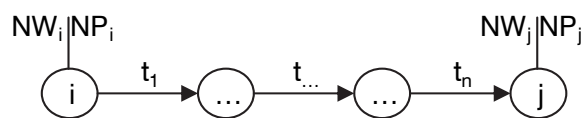
NP_j – najpóźniejszy termin zaistnienia j -tego zdarzenia przed skróceniem,

NP'_i – najpóźniejszy termin zaistnienia i -tego zdarzenia po skróceniu,

NP'_j – najpóźniejszy termin zaistnienia j -tego zdarzenia po skróceniu.

W obliczeniach wielkości buforów najwygodniej jest zamiast dat posługiwać się numerycznymi wartościami początku i końca analizowanych zadań.

Poniżej przedstawiono schemat blokowy metodyki stosowania metody łańcucha krytycznego po modyfikacji autorów (rysunek 8).



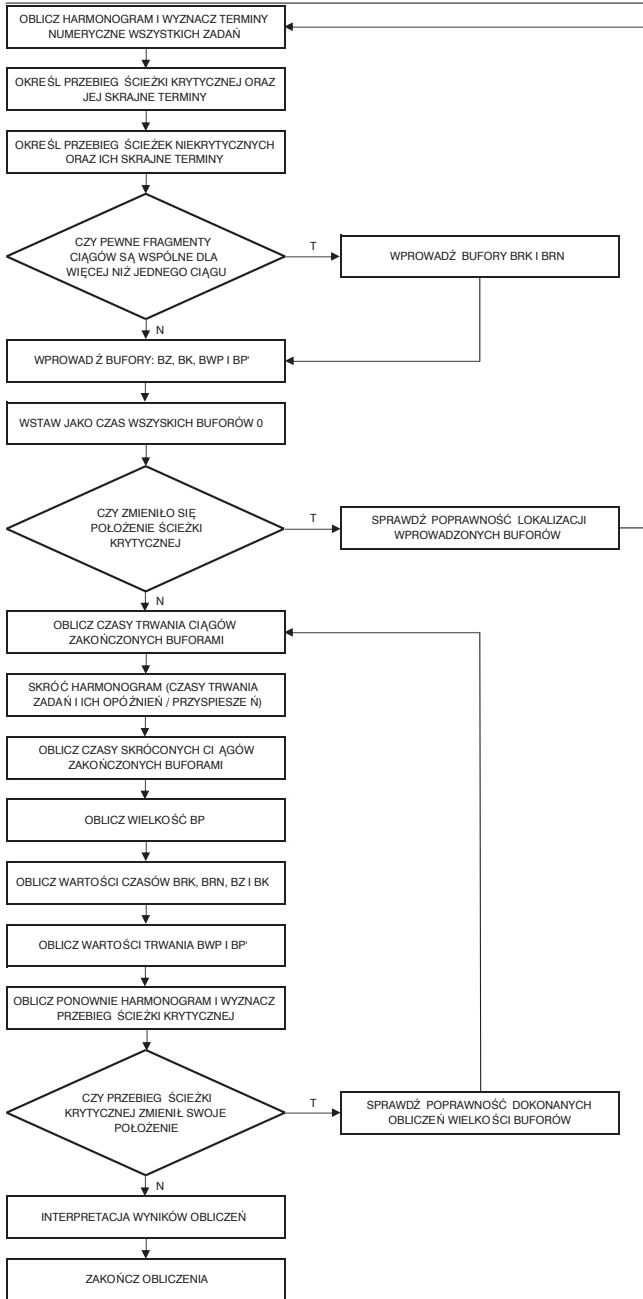
Rys. 7. Schemat obliczeniowy długości trwania ciągu dla sieci dwupunktowej

Źródło: opracowanie własne

Postępując zgodnie z powyższym schematem dokonano obliczeń, a następnie analizy metody łańcucha krytycznego na przykładzie harmonogramu jednej ze stacji metra w Warszawie. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w drugiej części artykułu.

4. Podsumowanie

Przedstawione teoretyczne założenia przystosowania metody łańcucha krytycznego do przedsięwzięć budowlanych są zgodne z ogólnymi zasadami, jakie przedstawił Goldratt. Zastosowane w tej modyfikacji bufory projektu:



Rys. 8. Schemat blokowy postępowania przy stosowaniu zmodyfikowanej metody łańcucha krytycznego wg propozycji autorów
 Źródło: opracowanie własne

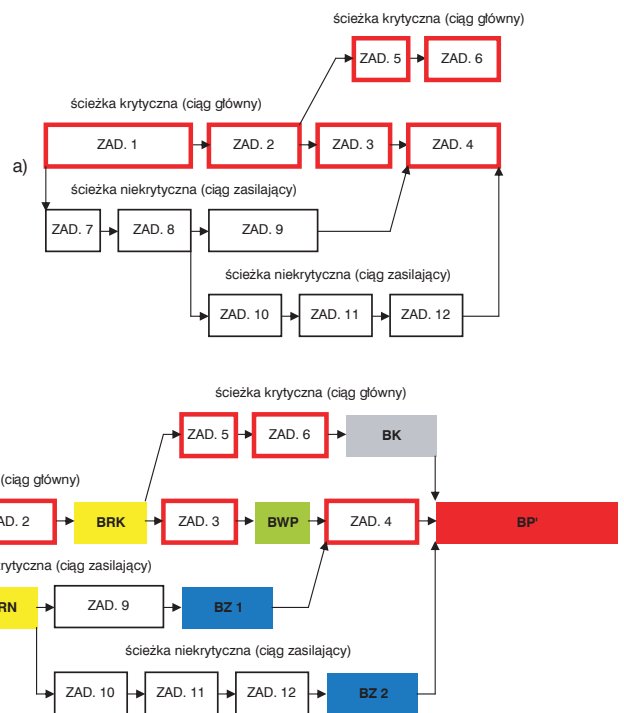
- nowy bufor projektu (BP’),
 - bufor zasilający (BZ),
 - bufor kończący (BK),
 - bufor wspomagający projekt (BWP),
 - bufor reagujący na ścieżce krytycznej (BRK),
 - bufor reagujący na ścieżce niekrytycznej (BRN)
- zabezpieczają łańcuch krytyczny przed zmianą jego lokalizacji nie-

zależnie od wielkości i złożoności struktury sieci zależności (rysunek 9). Na rysunku 9a przedstawiono przykładowy schemat sieci zależności realizacji przedsięwzięcia inżynierskiego. Rysunek 9b zawiera proponowaną przez autorów lokalizację wszystkich opisanych buforów czasu.

Zaproponowane bufory wyczerpują wszystkie możliwe do zaistnienia sytuacje w sieciowych harmonogramach budowlanych, które mogą być spowodowane przez technologiczne aspekty przedsięwzięcia dla przyjętych początkowych założeń. Praktyczne zastosowanie takiego rozwiązania zostanie zaprezentowane w drugiej części artykułu.

BIBLIOGRAFIA

1. Goldratt E. M., Łańcuch krytyczny, Wyd. WERBEL, Warszawa 2000
2. Jaworski K. M., Metodologia projektowania realizacji budowy, PWN, Warszawa 1999
3. Milian Z., Łańcuch krytyczny w budownictwie, Czasopismo Techniczne z. 11-B/2004
4. Milian Z., Szacowanie buforów czasu w metodzie CCPM. Konferencja naukowa „Zarządzanie procesami inwestycyjnymi w budownictwie”. Politechnika Krakowska 2004
5. Połoński M., Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich, Wyd. SGGW, Warszawa 2001
6. Połoński M., Pruszyński K., Probabilistyczne aspekty procesu budowlanego (cz. 2), Przegląd budowlany 12/2006, s. 49-53
7. Pruszyński K., Bogusz W., Informatyczne systemy zarządzania ryzykiem w procesie budowlanym, konferencja „Młodzi naukowcy wobec wyzwań współczesnej techniki”, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006



Rys. 9. Schemat pierwotny sieci zależności oraz lokalizacji buforów czasu wg zmodyfikowanej metody łańcucha krytycznego
 Źródło: opracowanie własne