

Zastosowanie metody *critical chain scheduling* (CCS) w przedsięwzięciach budowlanych

<https://doi.org/10.33141/po.2004.11.05>

Przeгляд Organizacji, Nr 11 (778), 2004, ss. 22-26
www.przeглядorganizacji.pl
Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa (TNOiK)

Agata Czarnigowska, Piotr Jaśkowski, Anna Sobotka

Wstęp

Harmonogramowanie i sterowanie realizacją procesów stanowią podstawowe elementy zarządzania przedsięwzięciem [3]. Jakkolwiek metody planowania przedsięwzięć rozwijane są od kilkudziesięciu lat, powstają metody coraz dokładniej odwzorowujące warunki realizacji planowanej budowy, coraz lepsze w użytkowaniu, skomputeryzowane itd., to praktyka realizacji przedsięwzięć wskazuje na szybką dezaktualizację harmonogramów, niedotrzymywanie ustalonych terminów realizacji poszczególnych procesów i terminów końcowych. Jest wiele przyczyn takiego stanu, związanych nie tylko z niedoskonałością metod szacowania czasów trwania procesów, oddziaływaniem zjawisk losowych, ale też z niedoskonałością metod, a właściwie metodologii planowania organizacji pracy i zarządzania. Nowe podejście, bazujące na socjotechnicznych zasadach organizacji pracy przedstawił w 1992 r. Goldratt [1]. Jego koncepcja łańcuchów krytycznych decydujących o przebiegu budowy, bazująca na teorii ograniczeń (*theory of constraints* – TOC), jakkolwiek krytykowana, znalazła uznanie wielu badaczy i zastosowanie praktyczne, także w dziedzinie projektowania realizacji przedsięwzięć budowlanych [8].

W artykule przedstawiono krótkie omówienie istoty tej metody, zwanej CC/BM (*critical chain scheduling and buffer management* [2]) lub CCPM (*critical chain construction project* [5]), z uwagi na fakt, że nie jest ona powszechnie znana i stosowana w praktyce w Polsce. Przedstawiono przykład wykorzystania tej metody do harmonogramowania przedsięwzięcia budowlanego. Przyniesiono także krytyczną analizę tej metody w odniesieniu do warunków realizacji przedsięwzięć budowlanych, a następnie zaprezentowano koncepcję udoskonalenia metody harmonogramowania łańcucha zadań krytycznych (używając dalej w tekście artykułu nazwy tej metody, w skrócie CCS).

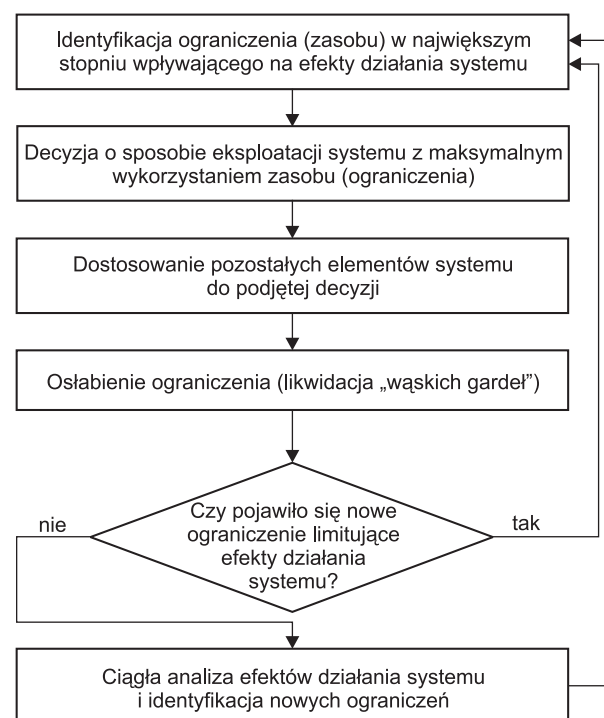
Teoria ograniczeń w harmonogramowaniu przedsięwzięć

Realizacja przedsięwzięcia odbywa się często w warunkach ryzyka i niepewności (np. zmiana zakresu projektu, błędy w zarządzaniu, zatory płatnicze, nieprzychylny warunki atmosferycz-

ne, trudności w koordynacji pracy zasobów w skali całego przedsiębiorstwa) [1, 3, 4, 7]. Mimo to harmonogram przedsięwzięcia na każdym etapie projektowania (przygotowanie oferty, organizowanie i kierowanie operatywne), przy ograniczonych zasobach wykonawczych, powinien zapewniać:

- minimalizację czasu realizacji przedsięwzięcia,
- minimalizację kosztów lub nieprzekroczenie zaplanowanego budżetu,
- dużą niezawodność dotrzymania ustalonego terminu końcowego.

Klasyczne metody harmonogramowania (CPM/PERT) nie pozwalają na satysfakcjonującą realizację wymienionych celów łącznie. W związku z tym podjęto prace nad zastosowaniem i rozwojem metod oraz algorytmów numerycznych do rozwiązania wyżej wymienionych problemów, ujmowanych jako zagadnie-



Rys. 1. Etapy doskonalenia systemu (zarządzania systemem) według TOC

nia z dziedziny badań operacyjnych i teorii systemów. Od lat 90. podejmowane są próby zastosowania do harmonogramowania produkcji teorii ograniczeń TOC [1, 2, 5, 6, 7, 8].

Teoria ograniczeń rozwija techniki zarządzania w aspekcie ciągłego doskonalenia systemów (przedsiębiorstwa, przedsięwzięcia), pozwalające na ich analizę oraz projektowanie, a także odkrywanie i usuwanie ich ograniczeń na drodze do osiągnięcia wyznaczonych celów. Aparat ten zastosowano do zarządzania przedsiębiorstwami w takich dziedzinach, jak: budowanie strategii, sterowanie produkcją, optymalizacja zarządzania w łańcuchu dostaw. Teoria ograniczeń zakłada, że każdy system posiada ograniczenia, które wpływają na efektywność jego działania. Projektowanie systemów i ich ciągłe doskonalenie zgodnie z TOC powinno być realizowane według następującej pięciopiętowej procedury (rys. 1).

Aplikacja teorii ograniczeń do zarządzania przedsięwzięciami znana jest jako metoda łańcucha krytycznego (*critical chain scheduling/project management*) i zarządzania buforami (*buffer management*) [1, 6, 7, 8].

Metoda łańcucha krytycznego

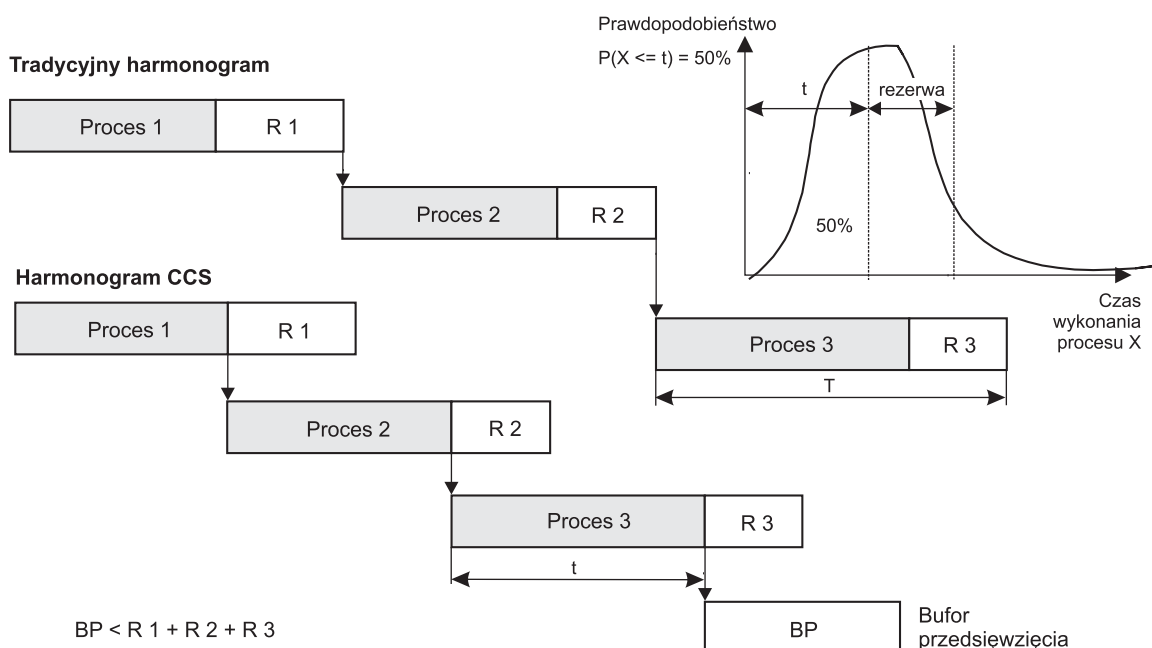
L łańcuch krytyczny definiowany jest jako zbiór kolejno wykonywanych procesów w modelu sieciowym determinujących czas realizacji całego przedsięwzięcia. Kolejność ich realizacji wynika z zależności technologicznych oraz dostępności zasobów (zależności organizacyjnych).

Zarządzanie przedsięwzięciem zgodnie z teorią ograniczeń powinno być realizowane zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1, czyli według następujących etapów [1, 8]:

- Identyfikacja łańcucha krytycznego decydującego o czasie realizacji przedsięwzięcia.

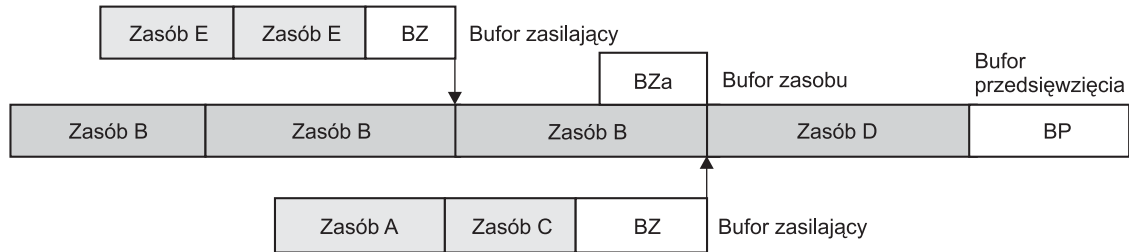
- Ustalenie najkrótszego terminu zakończenia przedsięwzięcia, możliwego do dotrzymania przy istniejących ograniczeniach w dostępności zasobów. Zwiększenie niezawodności dotrzymania terminu końcowego i skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia uzyskuje się poprzez skrócenie czasów wykonania zadań (przyjmując poziom prawdopodobieństwa dotrzymania oszacowanego czasu równy 50%, likwidując indywidualne rezerwy procesów), i umieszczenie jednego buforu (zapasu) czasu na końcu łańcucha krytycznego (buforu przedsięwzięcia) (rys. 2). Terminy rozpoczęcia procesów niekrytycznych planuje się wstępnie w najpóźniejszych możliwych terminach. Umożliwia to dodatkowo zmniejszenie kosztów kapitału zamrożonego w produkcji w toku i zwiększenie efektywności przedsięwzięcia.

- Odpowiednie zaprojektowanie terminów realizacji procesów nie tworzących łańcucha krytycznego w taki sposób, aby nie zakłóciły one przebiegu wykonywania procesów krytycznych. Dokonuje się tego poprzez wprowadzenie do modelu sieciowego dodatkowych buforów zwanych zasilającymi – na końcu dróg „dochodzących” do łańcucha krytycznego. Ze względu na to, że do wykonania poszczególnych procesów z łańcucha krytycznego niezbędne mogą być różne zasoby, nieprzerwaną realizację tych procesów warunkuje dostępność zasobów nie tylko w zaplanowanych terminach. W przypadku wcześniejszego zakończenia procesów poprzedzających, nowe rodzaje zasobów do wykonania następnych zadań powinny być dostępne w wcześniejszych terminach (z wyprzedzeniem). Sygnalizowanie wcześniejszego zapotrzebowania na zasoby krytyczne umożliwiają dodatkowe bufony zasobów. Wszystkie bufony (przedsięwzięcia BP, zasilające BZ i zasobowe BZa – rys. 3) wprowadzane są do modelu sieciowego jako czynności fikcyjne, nie angażujące zasobów, ale o ustalonym czasie trwania.



Rys. 2. Tradycyjny harmonogram i idea harmonogramu w metodzie CCS





Rys. 3. Lokalizacja buforów czasu w harmonogramie według metody CCS

■ Taka struktura harmonogramu pracy zasobów zwiększa szanse dotrzymania (i skrócenia) terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia. Kontrola w fazie realizacji polega na obserwacji aktualnej wielkości buforów czasu, stopnia ich wykorzystania i, w przypadku zagrożenia wystąpienia opóźnień, na podejmowaniu działań korygujących (np. aktualizacja planu, zwiększenie tempa pracy, przypisanie dodatkowych zasobów, praca w nadgodzinach). Działania te określone są jako zarządzanie buforami.

■ Kontrola przebiegu realizacji przedsięwzięcia (identyfikacja nowych ograniczeń i warunków) oraz ewentualna aktualizacja planów zapewniają dotrzymanie terminów dyrektywnych (umownych).

Harmonogramowanie przedsięwzięć według koncepcji CCS wspomagają komercyjne systemy komputerowe (m.in. program ProChain współpracujący z MsProject, dostępny bezpłatnie do celów edukacyjnych na stronie www.prochain.com). Projektowanie realizacji przedsięwzięcia odbywa się w metodzie CCS według następującej procedury [1, 6, 7, 8]:

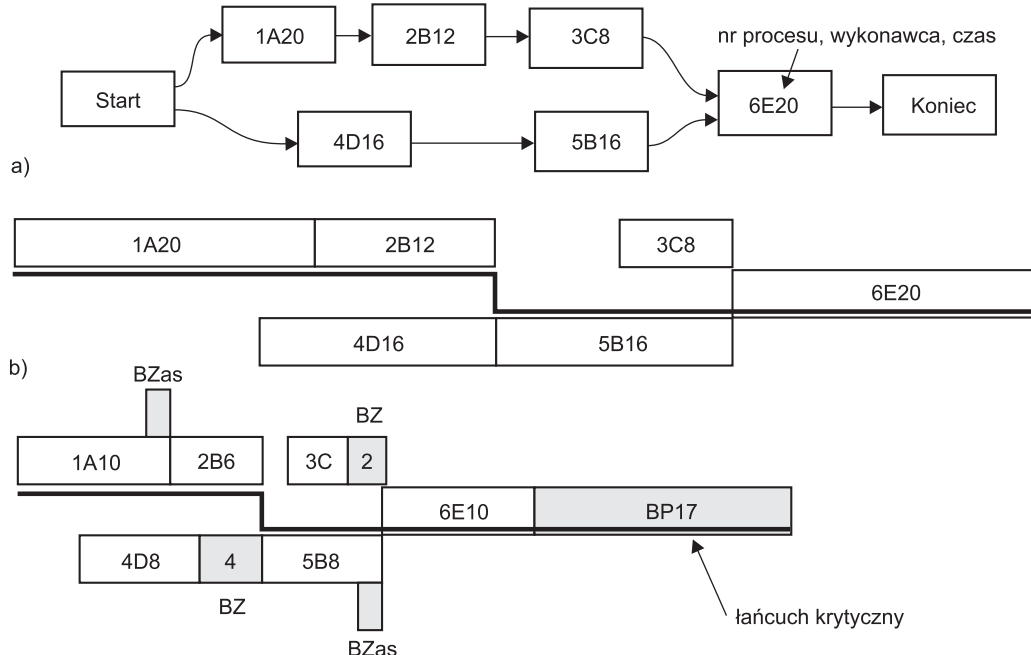
■ Budowa modelu – podział przedsięwzięcia na procesy, budowa grafu zależności kolejnościowych, usta-

lenie wykonawców, zapotrzebowania na zasoby oraz oszacowanie czasów realizacji procesów z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa.

■ Utworzenie harmonogramu dopuszczalnego (uwzględniającego istniejące ograniczenia w dostępności zasobów) z najpóźniejszymi terminami rozpoczęcia procesów (rys. 4a). Identyfikacja łańcucha krytycznego – zbioru procesów, które determinują termin zakończenia realizacji przedsięwzięcia.

■ Redukcja czasów wykonania procesów w taki sposób, aby prawdopodobieństwo wykonania procesu w przyjętym terminie wynosiło założoną wartość (klasycznie według E.M. Goldratta – 50%, czemu odpowiada skrócenie czasów wykonywania procesów o połowę). Usunięte marginesy bezpieczeństwa agregowane są w postaci buforu przedsięwzięcia dodawanego na końcu łańcucha krytycznego jako dodatkowy proces pozorny (o określonym czasie trwania i braku zapotrzebowania na zasoby) – rys. 4b.

■ Wstawienie buforów zasilających na końcach łańcuchów niekrytycznych, dochodzących do procesów krytycznych (rys. 4b). W przypadku, gdy bufor zasilający jest większy od istniejącego zapasu czasu (real-



Rys. 4. Idea harmonogramowania według CCS: a) harmonogram dopuszczalny dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia procesów, b) harmonogram według CCS

nego, wspólnego dla całej drogi niekrytycznej), twórcy metody zalecają jego skrócenie (bufor zasilający traktowany jest jako częściowo wykorzystany) lub przebudowę harmonogramu, czego wynikiem może być powstanie nowego łańcucha krytycznego.

■ Wstawienie buforów zasobowych w przypadku, gdy następuje zmiana zapotrzebowania procesów krytycznych na nowy zasób (rys. 4b). Bufory zasobowe mają postać procesów pozornych, nie są elementem łańcucha krytycznego, stanowią jedynie rodzaj ostrzeżenia – sygnału.

Wielkość buforu zasobowego nie wpływa na termin zakończenia realizacji całego przedsięwzięcia i w mniejszym stopniu decyduje o niezawodności harmonogramu (najczęściej przyjmowane są jednodniowe bufory zasobowe). W literaturze nie są jednak podawane jednolite zasady ustalania wielkości pozostałych buforów czasu. E.M. Goldratt zaleca, aby ich długość wynosiła połowę sumy zredukowanych zapasów (marginesów) bezpieczeństwa procesów leżących na łańcuchu zakończonym buforem (łańcuchu krytycznym w przypadku bufora przedsięwzięcia i drogach niekrytycznych przy obliczaniu bufora zasilającego). W programie ProChain istnieje możliwość wyboru jednego z następujących sposobów określania wielkości buforów:

- ustalona liczba dni – założona z góry przez projektanta,
- ustalona liczba dni plus założony procent sumy czasu wykonywania procesów tworzących dany łańcuch,
- ustalona liczba dni plus pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów zredukowanych rezerw czasu procesów w danym łańcuchu.

Na rysunku 6 przedstawiono harmonogram przykładowego przedsięwzięcia budowlanego, utworzony zgodnie z zasadami CCS. Przykład dotyczy budowy obiektu mieszkalnego wykonywanego w technologii szkieletu drewnianego. Dane do przykładu przedstawiono na rys. 5 (model sieciowy z zależnościami technologicznymi, czasy realizacji procesów oraz ich wykonawcy).

Krytyczna analiza metody CCS

Metoda CCS stosowana jest w praktyce wielu przedsiębiorstw przemysłowych na świecie i prezentowana w wielu publikacjach z dziedziny *Project Management* [1, 2, 5, 6, 7, 8]. Jakkolwiek wykorzystuje ona wiele wartościowych koncepcji (projektowanie i rozdział rezerwy czasu), posiada pewne niedociągnięcia [2, 5]. Szczególnej krytyce poddawane są następujące aspekty:

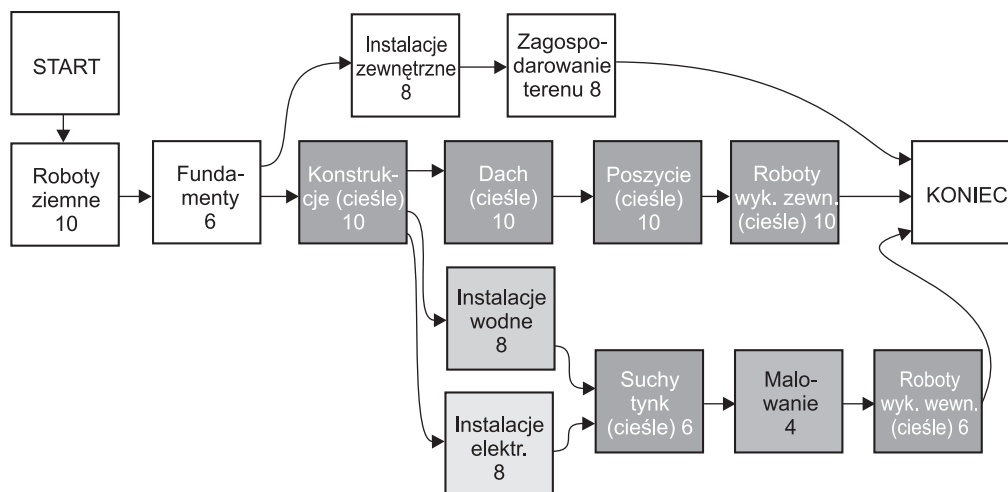
■ Tworzenie wstępnego (dopuszczalnego) harmonogramu odbywa się bez wykorzystania metod optymalizacyjnych. Metoda rozdziału zasobów ma wpływ na ostateczną postać harmonogramu, tym samym decyduje o czasie realizacji przedsięwzięcia (długości łańcucha krytycznego).

■ Dążenie do minimalizacji liczby robót w toku (przesuwanie terminu rozpoczęcia zadań niekrytycznych na najpóźniejszy możliwy termin) może powodować niekorzystną kumulację wydatków oraz ograniczać możliwość wprowadzania działań korygujących (np. poprawek) w przypadku wykrycia już w trakcie realizacji błędów projektowych bądź wykonawczych. Przyjęcie tego kryterium może powodować obniżenie jakości przedsięwzięcia.

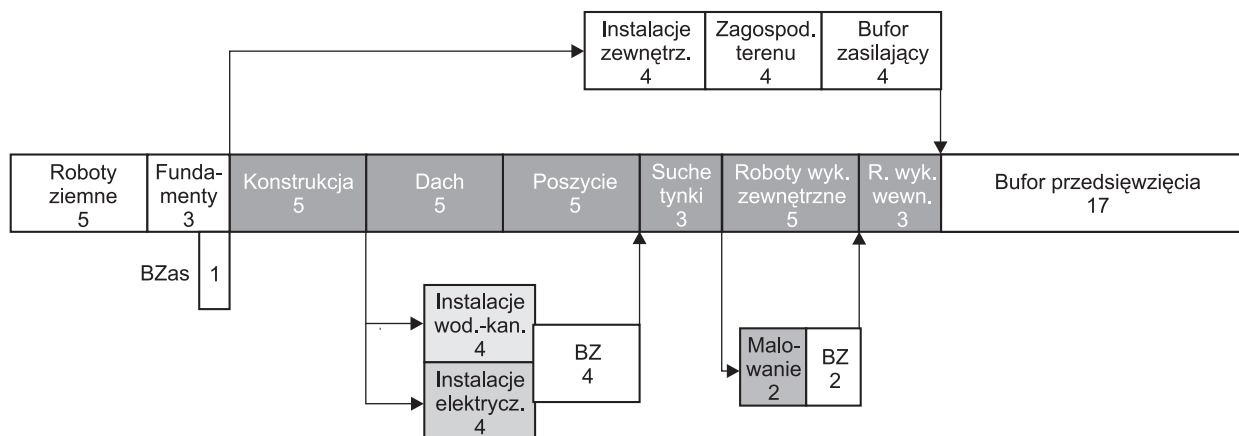
■ W metodzie nie uwzględniono innych istotnych kryteriów, np. maksymalizacji zaktualizowanej wartości netto (NPV), minimalizacji kosztów opóźnień poszczególnych zadań w stosunku do terminów wcześniej ustalonych, kosztów utrzymania zasobów w gotowości, czasu i kosztów poprawek.

■ Brak podstaw empirycznych przyjętych założeń w odniesieniu do sposobu szacowania i redukcji czasów wykonywania procesów oraz brak podstaw teoretycznych określania wielkości buforów czasu (nie uwzględniono m.in. wpływu równoległe przebiegających dróg lub wpływu „dochodzących” procesów krytycznych przy określaniu wielkości buforów zasilających).

■ Podatność na dezaktualizację ze względu na powstawanie konfliktów w dostępności zasobów. Bufo-



Rys. 5. Model sieciowy przedsięwzięcia (przykład). Poszczególnym wykonawcom przyporządkowano różne wypełnienie wierzchołków grafu



Rys. 6. Harmonogram realizacji przedsięwzięcia (przykład) sporządzony według zasad CCS

ry czasu reprezentowane są w postaci procesów pozornych (bez zapotrzebowania na zasoby).

■ Brak jednoznacznie ustalonych terminów realizacji procesów (procesy krytyczne rozpoczynane są bezpośrednio po zakończeniu swoich poprzedników). Utrudnia to procedury pozyskiwania i kontraktowania wykonawców.

Koncepcja wykorzystania buforów czasu nie jest nowa. Problem ten badał w Polsce m.in. K.M. Jaworski [3], który dowiódł istnienia pozytywnego wpływu zapasów czasu procesów niekrytycznych na niezawodność dotrzymania terminu końcowego. Może to uzasadniać celowość zastosowania koncepcji zarządzania buforami i metody łańcucha krytycznego w harmonogramowaniu przedsięwzięć również budowlanych. Jej implementacja do potrzeb budownictwa, ze względu na specyfikę produkcji budowlanej, wymaga dalszych badań i udoskonalień.

Podsumowanie

Stosowana w praktyce metoda harmonogramowania przedsięwzięcia powinna, w celu zwiększenia niezawodności projektu organizacji wykonania, ograniczać i uwzględniać negatywny wpływ zjawisk losowych na przebieg i efektywność działania.

W metodzie CCS zwiększenie niezawodności dotrzymania terminu końcowego realizacji przedsięwzięcia uzyskuje się poprzez odpowiednie zaprojektowanie czasów wykonania zadań oraz wielkości i lokalizacji buforów (rezerw) czasu. Jednakże należy pamiętać, że zasadniczy wpływ na zrealizowanie przedsięwzięcia według zaprojektowanego harmonogramu ma nieustanne monitorowanie realizacji, sprawdzanie, ile czasu zostało jeszcze do wykonania procesów w założonym terminie, lub jaka jest jeszcze rezerwa czasu w buforze. Dotyczy to zarówno procesów łańcucha krytycznego, jak i łańcuchów niekrytycznych.

Metoda CCS nie wyczerpuje wszystkich możliwości związanych z poprawą efektywności przedsięwzięcia. Dopiero połączenie tej koncepcji z metodami optymalizacyjnymi może stworzyć lepsze narzędzie harmo-

nogramowania przedsięwzięć z ograniczeniami zasobowymi (poszukiwanie najkrótszych ścieżek w planie sieciowym, maksymalizacja wielkości zapasów czasu dla ciągów procesów realizowanych przez jednego wykonawcę przy jednoczesnej minimalizacji czasu wykonania przedsięwzięcia, zapewnienie ciągłości pracy wykonawców, optymalny wybór wariantu technologii realizacji procesów, harmonizacja zadań w skali całego przedsiębiorstwa). Uwzględnienie tych aspektów w dalszych badaniach i wdrożenie udoskonalonej w ten sposób metody CCS do praktyki dostarczy menedżerom przedsięwzięć budowlanych potrzebne narzędzie do planowania i sterowania przedsięwzięciem w sposób konkurencyjny.

dr hab. inż. Anna Sobotka, prof. PL, dr inż. Piotr Jaśkowski, mgr inż. Agata Czarnigowska
Politechnika Lubelska

Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej

BIBLIOGRAFIA

- [1] GOLDRATT E. M., *Critical Chain. Great Barrerinton*, MA: The North River Press, 1997.
- [2] HERROELEN W., LEUS R.L., *On the Merits and Pit Falls of Critical Chain Scheduling*, „Journal of Operations Management” 19 (2001), s. 559–577.
- [3] JAWORSKI K.M., *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [4] PAWLAK M., *Podstawy zarządzania projektami*, Wydawnictwo PL, Lublin 2001.
- [5] RAZ T., BARNES R., DVIR D., *A Critical Look at Critical Chain Project Management*, „Project Management Journal” 35 (2003), grudzień 2003.
- [6] RAND G.K., *Critical Chain: the Theory of Constraints Applied to Project Management*, „International Journal of Project Management” 18 (2000), s. 173–177.
- [7] STEYN H., *Project Management Applications of the Theory of Constraints Beyond Critical Chain Scheduling*, „International Journal of Project Management” 20 (2002), s. 75–80.
- [8] YANG J.-B., *Applying the Theory of Constraints to Construction Scheduling. System-based Vision for Strategic and Creative Design*, Bontempi, Swets & Zeitlinger, Lisse 2003.