

Dane bibliograficzne o artykule:

http://mieczyslaw_polonski.users.sggw.pl/mppublikacje

dr hab. inż. Mieczysław Połoński, prof. SGGW
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Zakład Technologii i Organizacji Robót Inżynierskich
ul. Nowoursynowska 159
02-776 Warszawa

JAK SKRÓCIĆ ZAGROŻONY TERMIN ZAKOŃCZENIA ROBÓT NA OBIEKCIE BUDOWLANYM?

Streszczenie. W praktyce inżynierskiej stosunkowo często dochodzi do opóźnień realizacji robót budowlanych. Wymusza to konieczność przyspieszenia pozostałych do wykonania prac i zmiany istniejącego harmonogramu. W artykule omówiono metody pozwalające skrócić planowany wcześniej termin zakończenia robót. Rozważono dwa przypadki: kiedy harmonogram jest analizowany tylko w funkcji czasu a jego zakończenie wyznacza ścieżka krytyczna oraz kiedy do obliczeń włączono analizę zasobów i ciągiem decydującym o dacie zakończenia jest łańcuch krytyczny.

Słowa kluczowe: skrócenie, termin zakończenia, ścieżka krytyczna, łańcuch krytyczny

HOW TO SHORTEN ENDANGERED WORKS' COMPLETION DEADLINE ON CONSTRUCTION OBJECTS?

Abstract. Engineering praxis shows that time delays in construction works occur relatively often. It forces hastened realization of other works and changes in binding schedule. This article demonstrates methods which will enable to shorten deadlines planned earlier. Two cases have been studied. First – when schedule is analyzed only within time factor (time analysis) and its ending is marked with critical path and the second one – when resource analysis is included in calculations and critical chain is a decisive sequence.

Key words: abridgement, deadline, critical path, critical chain

Wprowadzenie

Umowa podpisywana między inwestorem a wykonawcą na roboty budowlane (lub głównym wykonawcą a podwykonawcą) precyzuje szereg warunków i wymogów, z których trzy są najważniejsze: zbiór wymagań ilościowych i jakościowych określonych w projekcie i specyfikacji technicznej wykonywanego obiektu, koszt realizacji robót oraz termin zakończenia prac. Ilość i jakość wykonywanych robót jest monitorowana na bieżąco przez obie strony procesu inwestycyjnego: kierownictwo budowy i inspektora nadzoru inwestorskiego, do czego obliguje ich Prawo Budowlane. Utrzymanie się w planowanym budżecie oraz dotrzymanie ustalonego terminu to obowiązek wykonawcy, który wziął na siebie te zobowiązania podpisując umowę. Z praktyki wynika[1], że oba te parametry są często zagrożone (szczególnie w sytuacji silnej konkurencji na rynku budowlanym), co oznacza, że od samego początku powinny one być kontrolowane, a w przypadku zagrożenia podejmowane odpowiednie działania niwelujące możliwość przekroczenia kosztów i/lub czasu wykonania robót. W artykule skoncentrowano się na metodach i technikach skrócenia planowanych terminów wykonania poszczególnych zadań i całego przedsięwzięcia.

Harmonogram, jako podstawa planowania, kontrolowania i weryfikacji przebiegu robót na budowie

Podstawowym dokumentem określającym sposób prowadzenia robót, podział na zadania, terminy wykonania poszczególnych czynności, zapotrzebowanie na zasoby itp. jest dobrze skonstruowany harmonogram ogólny budowy. Tradycyjne harmonogramy Gantta są obarczone wieloma wadami[4], więc aktualnie powszechnie stosuje się w budownictwie harmonogramy sieciowe. Obliczenia tych harmonogramów wspomaga zastosowanie specjalistycznych programów komputerowych, jednak jak na razie najważniejsze działania musi podjąć planista. To on decyduje o tak podstawowych parametrach harmonogramu jak:

- stopień szczegółowości budowanego harmonogramu,
- struktura podziału pracy (SPP) i przyporządkowanie odpowiedzialności za zaplanowane działania właściwym wykonawcom czy podwykonawcom,
- ustalenie głównego kalendarza robót, dni wolnych, długości dnia roboczego itp.,
- ustalenie terminu rozpoczęcia robót,
- podział wydzielonych w strukturze SPP robót na poszczególne zadania,
- określenie czasu trwania wszystkich zadań,
- ustalenie relacji między zadaniami oraz ewentualnych wartości zwłoki i/lub przyśpieszenia na relacjach między zadaniami,
- zdefiniowanie listy zasobów typu praca, materiał i koszt analizowanych w harmonogramie,

- w miarę potrzeby zdefiniowanie indywidualnych kalendarzy poszczególnych zasobów,
- przypisanie zapotrzebowania na poszczególne zasoby do wszystkich zadań,
- określenie planowanych kosztów wykonania poszczególnych zadań,
- zdefiniowanie poziomów dostępności wszystkich zasobów typu praca,
- ustalenie ewentualnych terminów dyrektywnych dla określonych zadań.

Wszystkie ww. dane mają większy lub mniejszy wpływ na ostateczny kształt harmonogramu a budowa sieci zależności w dużym stopniu przesądza o wynikach prowadzonych w dalszej kolejności obliczeń tzn. przebiegu ścieżki krytycznej, terminie zakończenia całości robót, terminach i zapasach czasu poszczególnych zadań, wykresach łącznego zapotrzebowania na poszczególne zasoby i środków finansowych w trakcie przebiegu robót itp.

Czynniki wpływające na ostateczny wynik obliczeń można podzielić na kilka grup, takich jak:

- konstrukcja sieci zależności,
- termin rozpoczęcia robót, kalendarze przedsięwzięcia i zasobów oraz daty dyrektywne zadań,
- czasy trwania zadań oraz wartości opóźnień i przyspieszeń na relacjach,
- zapotrzebowania i dostępności zasobów.

Konstrukcja sieci powinna być poddana szczegółowej analizie pod kątem zastosowanych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych, właściwego wymodelowania przyjętych założeń, możliwe szerokiego rozbudowania frontu robót, wyeliminowania istniejących "wąskich gardeł", dostosowania do wymaganych ograniczeń w konstrukcji sieci itp. Podczas budowy sieci zależności nie powinny być brane pod uwagę czasy i zasoby potrzebne do realizacji poszczególnych zadań, a wyłącznie kolejność prac wynikająca z założeń technologiczno-organizacyjnych. W celu poszerzenia frontu robót w kolejnych dniach wykonania obiektu, każda czynność powinna zaczynać się możliwie najwcześniej i kończyć możliwie najpóźniej. Rozpoczęcie wykonania czynności powinno być uzależnione tylko i wyłącznie od zakończenia tych prac, które mają na to bezpośredni wpływ.

Bardzo ważnym elementem jest dobór odpowiednich relacji pomiędzy zadaniami. Łatwo jest wykazać, że ten sam układ zadań w harmonogramie Gantta można uzyskać stosując różne typy relacjami między zadaniami i odpowiednie wielkości opóźnień i przyspieszeń na tych relacjach. Jednak wpływ zastosowanej konstrukcji sieci zależności i typów relacji między zadaniami na wyniki obliczeń harmonogramu po kolejnych aktualizacjach może być zupełnie różny[7]. Stosowanie przy budowie sieci zależności wyłącznie relacji typu ZR (zakończ – rozpocznij) pozwala na łatwą interpretację wyników obliczeń (przebieg ścieżki krytycznej, zapasy całkowite czasu zadań) i czytelne przewidywanie zmian tych parametrów w wyniku zmiany czasu trwania

poszczególnych zadań, jednak prowadzi do wydłużania realizacji całego przedsięwzięcia przy zwiększaniu czasów trwania zadań krytycznych. Stosownie relacji typu RR (rozpocznij – rozpocznij) pozwala w największym stopniu ograniczyć wydłużanie realizacji całego przedsięwzięcia przy zwiększaniu czasów trwania zadań krytycznych, jednak prowadzi do budowy harmonogramu o dużej liczbie zadań krytycznych i trudnego do interpretacji. Natomiast używanie przy budowie sieci zależności relacji typu ZZ (zakończ – zakończ), podobnie jak relacji typu ZR, przy zwiększaniu czasów trwania zadań krytycznych prowadzi do wydłużania realizacji całego przedsięwzięcia i trudnej interpretacji wyników obliczeń zarówno podczas planowania jak i aktualizacji harmonogramu i w dużej mierze powinno być ograniczane tylko do naprawę uzasadnionych przypadków.

Kalendarze stanowiące kanwę planowania i czasy trwania zadań powinny być określone na podstawie realnych możliwości wykonawcy. Dodatkowo możliwe jest deklarowanie terminów dyrektywnych wczesnych i późnych dla poszczególnych czynności. Zaleca się pierwsze wykonanie analizy czasu przeprowadzić bez uwzględniania tych terminów, a w kolejnych przebiegach uzupełnić o nie dane i śledzić ich wpływ na wyniki. Z terminów dyrektywnych należy korzystać tylko w uzasadnionych przypadkach, gdyż usztywniają one terminy realizacji poszczególnych czynności, zmniejszają zapasy czasu i w efekcie mogą pogorszyć rezultaty dalszych obliczeń. Szczególną uwagę należy skupić na przebiegu ścieżki krytycznej i ciągów podkrytycznych. Zatwierdzając wyniki analizy czasu należy pamiętać, że jest to najkrótszy możliwy termin wykonania obiektu, który w wyniku analizy zasobów może być najwyżej wydłużony, ale nigdy skrócony.

Wszystkie zasoby, które będą uwzględnione w analizie, muszą zostać zadeklarowane. Zazwyczaj analizuje się jeden do pięciu różnych zasobów, takich jak robotnicy, ciężki sprzęt budowlany, środki transportu itp. Należy pamiętać, że przy zbyt dużej liczbie analizowanych zasobów, ilość niezbędnych do przeprowadzenia symulacji rośnie, a właściwa interpretacja danych i ich wpływu na wyniki staje się coraz trudniejsza. W przypadku konieczności prowadzenia obliczeń z dużą liczbą zasobów zaleca się wprowadzanie ich do obliczeń etapami, rozpoczynając od najważniejszych. Ponieważ w trakcie wykonywania analiz zazwyczaj jest obliczany koszt realizacji obiektu, równocześnie z deklaracją każdego zasobu powinny zostać określona cena jego użycia. Na podstawie dokonanej oceny czasu trwania zadań i sporządzonej listy zasobów wszystkim czynnościom należy przypisać zapotrzebowanie ilości zasobów, jakie są niezbędne do ich wykonania. Część czynności może pozostać bez przydzielonych zapotrzebowań (np. przerwy technologiczne). Do przeprowadzenia analizy przy ograniczonym czasie lub środkach konieczne jest zdefiniowanie dostępności poszczególnych zasobów typu praca[5]. Wartość dostępności należy deklarować kierując się z jednej strony ograniczeniami występującymi na placu budowy, z drugiej biorąc pod uwagę wymagane zapotrzebowania ustalone w trakcie dalszych obliczeń. W przypadku narzucenia

zbyt rygorystycznych ograniczeń w dostępności, termin zakończenia przedsięwzięcia może się znacznie wydłużyć w stosunku do analizy czasu, a w skrajnych wypadkach wykonanie analizy przy ograniczonych środkach może nie doprowadzić do ustalenia poszukiwanego rozwiązania.

Potrzeba aktualizacji harmonogramu w trakcie wykonywania robót

Opracowywany na etapie planowania robót harmonogram zazwyczaj nie służy jednak tylko do ustalenia przewidywanych wartości takich jak termin zakończenia robót czy koszt ich realizacji, lecz również stanowi podstawę do zarządzania i kontroli wykonania planowanego obiektu. Jest rzeczą naturalną i trudną do uniknięcia, że w trakcie prowadzenia prac zachodzą mniejsze lub większe rozbieżności między planowanymi terminami a faktyczną ich realizacją na placu budowy. Odstępstwa od planu mogą powstać między innymi na skutek[4,8]:

- opóźnienia w przekazaniu placu budowy,
- zmiennych warunków atmosferycznych,
- problemów kadrowych,
- awaryjności maszyn i urządzeń budowlanych,
- zmian wielkości planowanych zasobów produkcji,
- nieterminowości dostaw materiałów, maszyn i urządzeń,
- złej jakości materiałów lub braku odpowiedniej wielkości ich rezerw,
- błędów w zarządzaniu realizacją robót,
- zmiany zakresu planowanych robót,
- koniecznością wykonania robót poprawkowych,
- zmiany planowanych warunków wykonania robót,
- błędów w przygotowanym wcześniej planie robót,
- awarii lub katastrofy budowlanej,
- złej dyscypliny pracy itp.

Każde opóźnienie prac powoduje potrzebę zaangażowania dodatkowych środków do ich dokończenia, a to z kolei uniemożliwi rozpoczęcie następnych robót lub nie zapewni pełnej dostępności zasobów do ich wykonania. W takiej sytuacji, chcąc przywrócić pełne pokrycie w zasobach wykonywanych w przyszłości prac, należy zweryfikować przyjęte w planie dane i ponowić analizy a sporządzony na etapie planowania harmonogram sieciowy stanowi do tego dobry punkt wyjścia.

Potrzeba weryfikacji pojawia się najczęściej w następujących przypadkach:

- konieczność przyspieszenia terminu realizacji całości przedsięwzięcia,
- wystąpienie opóźnienia (lub przyspieszenia) realizacji poszczególnych zadań,
- wykrycie usterek w pierwotnej konstrukcji sieci zależności,
- błędne określenie czasów wykonania zadań,

- zmiana planowanych poziomów dostępności zasobów w trakcie wykonywania robót,
- zmiana planowanego zapotrzebowania na zasoby na poszczególnych zadaniach,
- konieczność zmian przyjętych rozwiązań technologiczno-organizacyjnych.

Wykonanie aktualizacji harmonogramu najczęściej łączy się z koniecznością zmiany jednego lub kilku równocześnie następujących parametrów:

- terminu rozpoczęcia przedsięwzięcia,
- kalendarza przedsięwzięcia lub wybranych zasobów (zadań),
- czasów trwania poszczególnych zadań,
- podziału istniejącego zadania na kilka bardziej szczegółowych etapów,
- usunięcia lub wprowadzenia nowych relacji między zadaniami,
- typu relacji między istniejącymi zadaniami,
- wprowadzenia nowych zadań i ich parametrów,
- wielkości istniejących zwłok na relacjach i/lub wprowadzenie nowej zwłoki (dodatniej lub ujemnej),
- zadeklarowanych dat dyrektywnych zadań,
- zadeklarowanych typów ograniczeń („nie wcześniej niż...”, „musi się zakończyć...”, itp.),
- zapotrzebowania wybranych zadań na analizowane zasoby,
- poziomów dostępności wybranych zasobów.

Jedną z podstawowych przyczyn zmuszającą nas do weryfikacji harmonogramu jest zaistniałe opóźnienie w trakcie wykonywanych prac, prowadzące w konsekwencji do przewidywanego przesunięcia w czasie terminu realizacji całości przedsięwzięcia. W celu zapobieżenia takiemu opóźnieniu menadżer projektu zmuszony jest podejmować działania, które doprowadzą w konsekwencji do zniwelowania powstałego opóźnienia. Można tego dokonać tylko przez przyśpieszenie prac, które są w trakcie realizacji i/lub jeszcze nie zostały rozpoczęte. Powstaje pytanie, jakie to mogą być działania?

W zależności od tego, czy w harmonogramie uwzględniamy analizę zasobów, termin zakończenia robót może wynikać ze ścieżki krytycznej, lub z ciągu zadań nazywanego łańcuchem krytycznym[2] i ukształtowanego przez ograniczoną dostępność jednego lub kilku zasobów używanych przy realizacji planowanych zadań. W sytuacji, gdy wszystkie poziomy dostępności zasobów zapewniają możliwość realizacji zadań w terminach wynikających z analizy czasu, łańcuch krytyczny i ścieżka krytyczna pokrywają się ze sobą. Jeżeli jednak terminie zakończenia przedsięwzięcia po analizie zasobów jest dłuższy od terminu uzyskanego w analizie czasu, oznacza to, że chcąc skrócić taki harmonogram należy najpierw zidentyfikować łańcuch krytyczny i zasób (lub zasoby), które stanowią „wąskie gardło” i wydłużają termin zakończenia prac na

planowanym obiekcie. W zależności od opisanych możliwości, działania jakie mogą być podjęte będą nieco różne.

Przyśpieszenie realizacji planowanych robót bez uwzględniania zapotrzebowania na zasoby

Jeżeli termin zakończenia całego harmonogramu wyznacza ścieżka krytyczna jasne jest, że podejmowane działania muszą dotyczyć właśnie zadań krytycznych. Należy jednak zwrócić uwagę, czy podejmowane próby przyśpieszenia wykonania zadań krytycznych nie doprowadzą do zmiany przebiegu ścieżki krytycznej, czyli analizując możliwości skróceń na ścieżce krytycznej nie można zapominać o ciągach podkrytycznych.

Wszystkie modyfikacje wprowadzane do harmonogramu a mające doprowadzić do skrócenia ścieżki krytycznej, podobnie jak czynniki wpływające na ostateczny wynik obliczeń, można podzielić na następujące grupy:

- wprowadzające nowe, skrócone czasy trwania zadań oraz wartości opóźnień i przyśpieszeń na relacjach,
- dotyczące zmiany terminu rozpoczęcia robót, kalendarza przedsięwzięcia oraz dat dyrektywnych zadań,
- wymagające zmiany budowy sieci zależności.

Rozwiązaniem, które nasuwa się w pierwszej kolejności i chyba najczęściej jest podejmowane to próba skrócenia czasów zadań leżących na ścieżce krytycznej. Oczywiście, takie działanie jest często w pełni uzasadnione, jednak zawsze należy je skorelować z realnymi możliwościami wykonawców tych zadań oraz ograniczeniami technologicznymi. Być może będzie się to łączyło z koniecznością poszerzenia składu brygad, które te zadania wykonują, lepszą organizacją ich pracy, sprawniejszym przebiegiem prac przygotowawczych i kontrolnych, bezwzględnie terminowym dostarczaniem niezbędnych materiałów i niezbędnego sprzętu itp.

Równocześnie ze zmianą czasów zadań należy koniecznie pamiętać o przeanalizowaniu wartości opóźnień i przyśpieszeń na relacjach łączących te zadania. I tak np. przy relacji typu rozpoczynj – rozpoczynj z opóźnieniem 5 dni być może zamiast skracać czas któregoś z zadań wystarczy skrócić czas opóźnienia np. do 3. Czasy na relacjach nie łączą się z wykonywaniem jakichkolwiek prac czy koniecznością użycia zasobów, a wynikają jedynie z zależności technologicznych lub organizacyjnych, więc są szczególnie warte przeanalizowania i ewentualnego skrócenia. Należy również rozważyć, czy na relacjach, gdzie dotychczas wartości przyśpieszeń były równe zeru nie można wprowadzić rozpoczęcia następnika, przed całkowitym zakończeniem poprzednika. Często, jeśli się dobrze rozważy taką możliwość może się okazać, że jest to lepsze rozwiązanie niż skracanie rzeczywistych czasów zadań, zmuszające do zwiększenia tempa prac.

Kolejną możliwość przyspieszenia terminu zakończenia robót dostarcza zmiana kalendarza przedsięwzięcia. Jeżeli roboty jeszcze się nie rozpoczęły należy rozważyć przyspieszenie terminu ich rozpoczęcia. Być może szybsze rozpoczęcie będzie dotyczyło tylko części zaplanowanych zadań a to może wymagać zmiany konstrukcji sieci i np. wprowadzenia kilku zadań początkowych. Dostyc popularnym rozwiązaniem jest również zmiana samego kalendarza przedsięwzięcia a więc wydłużenia dnia pracy np. z 8 do 10 godzin i/lub wprowadzenie wydłużonego tygodnia pracy np. sześć dni zamiast pięć. Zmiany te mogą dotyczyć całego harmonogramu, ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby stworzyć indywidualne kalendarze (jeden lub kilka) dla poszczególnych zadań ze ścieżki krytycznej.

Częstą przyczyną opóźnień w harmonogramie jest deklaracja dat dyrektywnych dla poszczególnych zadań oraz rodzaj narzucanego warunku. Najbardziej niebezpieczne z punktu widzenia ewentualnych opóźnień są warunki typu: „musi się rozpocząć”, „rozpocznij nie wcześniej niż” oraz „zakończ nie wcześniej niż”. Istnienie takich warunków na ścieżce krytycznej może zniweczyć sensowność innych podejmowanych działań naprawczych np. skracanie czasów zadań. Na początku warto zobaczyć, jaki wpływ na harmonogram ma ich ewentualne usunięcie. Jeśli wpływ ten jest istotny, należy bardzo uważnie prześledzić wpływ każdej daty dyrektywnej z osobna rozpoczynając od tych, które menadżer projektu uzna za najważniejsze i niemożliwe do usunięcia. Ale nawet w takich wypadkach warto rozważyć zmianę samej daty warunku i/lub zamianę jego rodzaju np. z „musi się rozpocząć” na „rozpocznij nie później niż”. Czym warunek jest mniej restrykcyjny tym będzie miał mniejszy wpływ na ewentualne opóźnienie. Należy również zauważyć, że w przypadku już zaistniałego opóźnienia prac część dat dyrektywnych może stracić swoją aktualność i należy je dopasować do zmienionej sytuacji.

Niezależnie od podejmowania zaproponowanych powyżej działań często chcąc przyspieszyć realizację obiektu należy rozważyć zmianę samej konstrukcji sieci zależności. Przede wszystkim należy zawsze dążyć do planowania możliwie szerokiego frontu robót. Rozpoczęcie kolejnych zadań należy uzależniać od zakończenia tylko tych poprzedników, które naprawdę na to rzutują. Czasami warto rozważyć podzielenie jednego zadania na kilka bardziej szczegółowych, jeżeli od ich różnego zakończenia lub stopnia zawansowania zależy rozpoczęcie kilku następników. Jak najwięcej pojedynczych zadań i całych etapów robót w miarę możliwości powinno być realizowanych równoległe. W takim rozplanowaniu przedsięwzięcia pomaga dobre zaprojektowanie struktury podziału pracy (SPP) i wydzielenie poszczególnych etapów robót. Podczas analizowania pojedynczych zadań szczególną uwagę warto zwrócić na relacje zakończ – zakończ. W tym wypadku każde opóźnienie poprzednika opóźnia realizację następnika i bardzo szybko prowadzi do wydłużenia całego przedsięwzięcia. Należy przeanalizować czy tego typu relacji nie da się zamienić na inną, szczególnie rozpocznij – rozpocznij

z opóźnieniem. Wszędzie, gdzie rozpoczęcie następnika możliwe jest nie po pełnym zakończeniu poprzednika a po pewnym jego zaawansowaniu najkorzystniej jest stosować właśnie relację rozpocznij – rozpocznij z opóźnieniem. Jest ona korzystniejsza od połączenia zakończ – rozpocznij z ujemnym opóźnieniem, gdyż nie uzależnia rozpoczęcia następnika od zakończenia poprzednika, lecz właśnie tylko jego rozpoczęcia i odpowiedniego zaawansowania. Należy zwrócić uwagę, że wartość opóźnienia na relacji (dodatnia lub ujemna) nie musi być wyrażana wartością w dniach, ale również może być podana w postaci procentu zaawansowania poprzednika.

Przyspieszenie realizacji planowanych robót z uwzględnieniem zapotrzebowania na zasoby

Nieco bardziej złożona sytuacja występuje, gdy w harmonogramie uwzględniane są zasoby a o terminie zakończenia całego przedsięwzięcia decyduje ograniczona dostępność jednego lub kilku z nich. Należy pamiętać, że najkrótszy możliwy termin całości robót (przy zdefiniowanych parametrach harmonogramu) wyznacza wynik z analizy czasu bez uwzględniania dostępności zasobów. Jeżeli była prowadzona analiza zasobów należy zawsze sprawdzić, czy jej wynik nie jest dłuższy niż wynik analizy czasu. Jeśli mamy do czynienia z takim przypadkiem, to znaczy, że o terminie zakończenia decyduje łańcuch krytyczny a nie ścieżka krytyczna a „wąskich gardeł” w realizacji harmonogramu należy poszukiwać głównie w ograniczonej dostępności zasobów.

Pierwszą czynnością w takiej sytuacji jest identyfikacja przebiegu łańcucha krytycznego[6]. Łatwo zauważyć, że w takich przypadkach układ zadań ze ścieżki krytycznej w widoku Gantta nie jest ciągły. Powstałe przerwy wynikają z braku dostatecznej dostępności zasobów do równoczesnego realizowania większej liczby zadań, niż zostało to zaplanowane w analizie czasu. Brak ciągłości terminów wykonania zadań znajdujących się na ścieżce krytycznej oznacza, że suma czasów czynności leżących na niej, będzie krótsza niż okres realizacji całego przedsięwzięcia, a to wskazuje że istnieje inny, dłuższy ciąg zadań, który wyznaczył datę zakończenia harmonogramu. Tym ciągiem jest właśnie łańcuch krytyczny. Przebieg łańcucha krytycznego można zidentyfikować posługując się specjalistycznymi programami lub analizując układ zadań w harmonogramie Gantta. Nie zawsze jest to zadanie łatwe, czasami istnieje kilka wariantów łańcucha krytycznego. Ważne jest, aby łączny czas zadań tworzących łańcuch krytyczny (razem z czasami opóźnień i przyspieszeń na łączących te zadania relacjach), był równy okresowi realizacji planowanego przedsięwzięcia.

Poprawnie wykonana identyfikacji łańcucha krytycznego pozwoli wydzielić zadania, których terminy realizacji bezpośrednio wyznaczają termin zakończenia robót. Kolejnym zadaniem jest analiza zasobów, które są używane do ich wykonania. Oczywiście, w sytuacji gdy analizujemy tylko jeden zasób

odpowiedź jest oczywista i bez identyfikacji łańcucha krytycznego, jednak przy większej liczbie analizowanych zasobów rozwiązanie nie jest wcale takie proste. Pomocna jest w tym analiza łącznego zapotrzebowania kolejnych zasobów na tle deklarowanych do obliczeń dostępności oraz wykonie analizy przy ograniczonym czasie[4]. Często poprawną odpowiedź przynosi dopiero wykonanie szeregu eksperymentów numerycznych, polegających na badaniu wpływu zmiany dostępności poszczególnych zasobów (oddzielnie dla każdego i łącznie dla wszystkich lub wyselekcjonowanego podzbioru). Jeśli uda się ustalić, który zasób i w jakim okresie czasu stanowi „wąskie gardło” i opóźnia terminy wykonania poszczególnych zadań, dopiero wówczas można przystąpić do próby skrócenia całego przedsięwzięcia. Jakże w tym wypadku istnieją rozwiązania? Jest ich kilka, a najczęściej używane to:

- ograniczenie zapotrzebowania na zadaniach na zasoby stanowiące „wąskie gardło”,
- zastąpienie zapotrzebowania na przeciążony zasób, innym mniej obciążonym,
- podniesienie w newralgicznych okresach dostępności na przeciążone zasoby,
- zmiana kalendarzy pracy przeciążonych zasobów przez wydłużenie czasu ich pracy (stałe lub okresowe),
- zmiana rozkładu zapotrzebowania na przeciążony zasób na zadaniach łańcucha krytycznego przy zachowaniu łącznego zapotrzebowania (np. wykonywanie zadania w 6 dni przez 4 robotników zamiast praca przez 4 dni przez 6 robotników); ta pozornie nic niezmienną zamiana może wpłynąć na bardziej efektywne działanie algorytmu analizy zasobów w używanym programie,
- podział zadań z łańcucha krytycznego na kilka składowych i wykonywanie ich etapami rozdzielonymi w czasie – efekt jak opisany wyżej,
- dopuszczenie do podziału zadań przez algorytm programu obliczeniowego (jeśli program dopuszcza taką opcję),
- dopuszczenie do zmiany rozkładu zapotrzebowania na zasób przy zachowaniu sumarycznego, łącznego zapotrzebowania[5],
- zmiany w konstrukcji sieci zależności umożliwiające np. wcześniejsze rozpoczęcia zadań z przeciążonymi zasobami.

Wprowadzając konkretne zmiany w skracanym harmonogramie zawsze trzeba wziąć pod uwagę występujące w danym przypadku ograniczenia technologiczne i organizacyjne. Generalnie można stwierdzić, że skrócenie harmonogramu prac, w którym analizowanych jest co najmniej kilka zasobów, nie jest zadaniem prostym i wymaga pewnej wprawy. Jednak często wykonanie dużej liczby eksperymentów i prób uwzględniających równocześnie kilka z podanych powyżej możliwości, jest jedyną drogą do opracowania skróconego harmonogramu opartego na realistycznych podstawach. Zdarza się również, że

wszystkie brane pod uwagę i możliwe do wprowadzenia w danych warunkach rozwiązania nie prowadzą do takiego skrócenia, jakiego oczekiwano. W takim wypadku należy przeanalizować czy termin, który próbuje się osiągnąć, jest realistyczny przy możliwych do zastosowania środkach. Próba konstruowania planu, który z góry skazany jest na porażkę nie jest dobrym rozwiązaniem i doprowadzi do jeszcze większego chaosu na budowie i braku możliwości realistycznego zarządzania bieżącymi pracami na obiekcie.

Podsumowanie

W praktyce inżynierskiej stosunkowo często dochodzi do opóźnienia realizacji robót budowlanych. Wymusza to konieczność przyspieszenia pozostałych do wykonania prac i zmiany istniejącego harmonogramu. Ciągami zadań, które decydują o terminie zakończenia przedsięwzięcia w zależności od analizowanych danych może być ścieżka krytyczna lub łańcuch krytyczny. Pierwszy przypadek ma miejsce, kiedy harmonogram jest analizowany tylko w funkcji czasu. Kiedy do obliczeń włączono analizę zasobów, ciągiem decydującym o dacie zakończenia jest łańcuch krytyczny. Jeżeli zadeklarowane dostępności zasobów pozwalają osiągnąć termin wyznaczony w analizie czasu oznacza to, że wszystkie analizowane zasoby występują w wystarczającej ilości we właściwym czasie a ścieżka krytyczna pokrywa się z łańcuchem krytycznym. W zależności od sytuacji, jaka występuje w konkretnym przypadku budowlanym, w razie konieczności przyspieszenia robót należy zastosować jeden lub równocześnie kilka ze sposobów opisanych w artykule. Zawsze należy pamiętać, że przyjęte rozwiązania muszą być dostosowane do istniejących warunków technologicznych i organizacyjnych, a możliwość uzyskania niezbędnego skrócenia może być nimi silnie ograniczona.

Literatura

- [1] Flyvbjerg, B.; Holm, M.S., Buhl, S., 2002. Underestimating Costs in Public Works, Error or Lie? American Planning Association Journal, Vol. 68, No. 3, Summer, 279-295.
- [2] Goldratt E., Łańcuch krytyczny, Wyd. WERBEL, Warszawa, 2000.
- [3] Hajducki Z., Rogalska., Shortening the realisation time of building projects with application of theory of constraints and critical chain scheduling, Journal of Civil Engineering and Management, 2004, Vol. X, Suppl. 2, s. 99-105.
- [4] Połoński M., Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich, 2001, Wydawnictwo SGGW.
- [5] Połoński M., Planowanie realizacji inwestycji melioracyjnych w funkcji czasu i środków na podstawie harmonogramów sieciowych, 1995, Wydawnictwo SGGW.
- [6] Połoński M., Problem z identyfikacją łańcucha krytycznego i lokalizacją buforów zasilających w harmonogramie sieciowym z ograniczoną dostępnością zasobu. Problemy naukowo-badawcze budownictwa : 55 konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB : Kielce-Krynica, 20-25

września 2009 r. / [red. nauk. Zbigniew Rusin]. - Kielce : Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2009. - S. 739-746.

- [7] Połośki M., Wpływ budowy sieci zależności na przebieg ścieżki krytycznej i wyniki aktualizacji harmonogramu sieciowego. Czasopismo techniczne 1-B/2010 Zeszyt 2 Rok 107, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 325 - 340.
- [8] Skorupka D., Identification and Initial Risk Assessment of Construction Projects in Poland. *Journal of Management in Engineering*, July 2008, Volume 24, Number 3, American Society of Civil Engineers 2008, s. 120-127.