

Mieczysław POŁOŃSKI*

Przykład analizy czasu trwania i kosztu wykonania obiektu przy zmiennej dostępności zasobów

Abstract

An example time and cost analysis for investments with variable resources availability. In this paper the example of planning investments with variable resources availability is presented. Project of technology and organisation is presented as PERT network. Time duration and needed resources are assigned to every particular task. Each resource has estimated costs and certain available levels. Availability can be defined using two levels: basic and reserve. Both requirement and availability can be defined as fixed or changing in time. Investment scheduling is done using SPRIM – computer program for IBM PC. Calculations are based on time analysis results and resources date. Two ways of calculation can be applied: with constrained time or resources. One of the most important options of this program is possibility of speeding up and reducing costs. It can be done by changing required resources during realisation of each task. It was showed that this method is highly effective in engineering investments scheduling.

Key words: project management, resource -constrained scheduling, activity networks

Cel i zakres pracy

Z chwilą opracowania technologii wykonania obiektu inżynierskiego oraz po zaprojektowaniu podstawowych rozwią-

zań organizacyjnych jednym z podstawowych elementów wpływających na czas wykonania obiektów oraz ich koszt jest dostępność środków niezbędnych do zrealizowania zaplanowanych prac. Drugim elementem wpływającym na wyniki obliczeń jest cena użycia poszczególnych zasobów. W prezentowanym przykładzie przedstawiono opis analizy kilku wariantów realizacji małego zbiornika rolniczego Łąki Korytowskie przy różnych poziomach dostępności sprzętu i robotników. Celem pracy jest przedstawienie możliwości prowadzenia analiz realizacji obiektów inżynierskich w ujęciu czas–koszt–ilość zasobów zaangażowanych w trakcie wykonywania robót. Wykonanie tego rodzaju obliczeń może dostarczyć inwestorowi i/lub wykonawcy wiarygodnych danych do przygotowania dokumentacji przetargowej i poszukiwania harmonogramu realizacji obiektu, który spełni wymagania ze względu na stawiane mu kryterium oceny (termin zakończenia całości robót i poszczególnych etapów, koszt, ilość zaangażowanych środków itp).

* Katedra Technologii i Organizacji Prac Wodnych i Melioracyjnych SGGW, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

Podstawą wykonanych obliczeń była sieć zależności [Mosiej i in. 1982] przedstawiająca graficzny model wykonywanych robót. Sieć składała się z 59 czynności. Każda czynność miała przyporządkowany czas jej trwania w dniach roboczych oraz zapotrzebowanie na poszczególne środki. Analizą objęto cztery podstawowe zasoby: zgarniarki samobieżne o symbolu Z, spycharki S100 (S), koparki K606 (K) i pracowników fizycznych (R). Zapotrzebowanie na poszczególne środki dla części czynności było stałe, w innych zmieniało się w trakcie przebiegu prac. Przeważająca liczba czynności wymagała do ich realizacji równoczesnego zaangażowania dwóch, trzech lub czterech zasobów.

Metodyka analiz

Wszystkie analizy wykonano na podstawie systemu komputerowego SPRIM [Połoński 1995], działającego na IBM PC w systemie operacyjnym DOS. Należy on do grupy programów służących do planowania i kontroli wykonania inwestycji [Taylor 1992]. System ten dopuszcza definiowanie na dwóch poziomach dostępności zasobów, które będą wykorzystywane w trakcie prowadzenia robót: podstawowym i rezerwowym. Środki na poziomie podstawowym mogą być używane bez żadnych ograniczeń, natomiast zasoby rezerwowe tylko w przypadku zbyt małej liczby środków podstawowych. System dopuszcza również możliwość czasowego zablokowania poziomów rezerwowych dla wybranych zasobów i wówczas obliczenia prowadzone są tylko na podstawie danych ze wskazanych poziomów podstawowych.

Dodatkowym parametrem charakteryzującym środek jest koszt jego użycia. Każdy zasób może mieć zdefiniowaną cenę na poziomie podstawowym i górnym, określającą koszt użycia jednego środka w ciągu jednostki czasu. Przy obliczaniu kosztów wykonania całego obiektu pojawia się jednak problem, czy kosztami obciążyć tylko te środki, które zostały wykorzystane do realizacji czynności, czy też brać pod uwagę wszystkie dostępne i gotowe do użycia zasoby. W systemie SPRIM dopuszczono możliwość definiowania ceny zasobu za samą gotowość do pracy – kiedy jest dostępny i nie jest użyty do realizacji czynności. Wydzielono oddzielne ceny dla poziomu podstawowego i zasobów rezerwowych. Ceny te mogą przyjmować dowolne wartości, łącznie z zerem. Dzięki takiemu rozwiązaniu użytkownik może dla każdego zasobu oddzielnie zdefiniować właściwy sposób naliczania jego kosztów. Na przykład przy założeniu, że robotnicy zatrudnieni są na stałe, należy im płacić obniżoną stawkę za oczekiwanie na pracę, a przy wynajmowaniu sprzętu można płacić tylko za wykonaną pracę w ściśle określonych terminach.

Analizy uwzględniające środki potrzebne do wykonania poszczególnych czynności można wykonać według dwóch podstawowych schematów: przy ograniczonym czasie i ograniczonych środkach. Wynikiem obu analiz jest ustalenie terminów wykonania poszczególnych czynności zapewniających przydział wszystkich zaplanowanych środków. Jednak w obu przypadkach analiza przebiega według różnych założeń. Podczas analizy przy ograniczonym czasie główne kryterium polega na dotrzymaniu

terminu realizacji całego przedsięwzięcia ustalonego w analizie czasu, tzn. zrealizowanie obiektu w możliwie najkrótszym czasie. W przypadku braku środków zadeklarowanych w dostępnościach na poziomie podstawowym i górnym, program przekracza te poziomy i planuje realizację czynności pomimo braku środków. Wszystkie przekroczenia zadeklarowanych dostępności zostaną wykazane na wydrukach dotyczących zużycia środków oraz w statystyce środków po przeprowadzonych obliczeniach. Analiza przy ograniczonym czasie zawsze znajduje poszukiwane rozwiązanie.

Przebieg analizy przy ograniczonych środkach jest odmienny. Jako podstawowe kryterium przyjmuje się, że zadeklarowane dostępności środków nie mogą zostać przekroczone. W przypadku zbyt małej liczby dostępnych środków do ukończenia przedsięwzięcia w terminie wynikającym z analizy czasu termin realizacji całego przedsięwzięcia zostaje opóźniony. Analiza może nie znaleźć żadnego poprawnego rozwiązania w przypadku, gdy maksymalna dostępność jednego ze środków jest mniejsza od wymaganego zapotrzebowania na wykonanie pojedynczej czynności w danym okresie. W takiej sytuacji program po przekroczeniu zadeklarowanego maksymalnego okresu realizacji wyświetli listę czynności, których nie może zaplanować. Należy przeanalizować zapotrzebowanie na wszystkie środki dla tych czynności i zmienić zapotrzebowanie i/lub dostępność, a następnie ponowić analizę.

Przebieg analiz można dodatkowo modyfikować, wprowadzając takie elementy, jak: rezerwa czasu, o którą można wydłużyć termin zakończenia robót na

obiekcie, terminy dyrektywne poszczególnych czynności, okresowe przerwy w robotach, chwilowe wyłączenie z analizy poszczególnych zasobów itp. Podczas wykonywania obliczeń można również wskazać, czy czynności mają być realizowane jednym ciągiem od momentu ich rozpoczęcia do zakończenia, czy też dopuszczalna jest realizacja jednej czynności w kilku etapach rozdzielonych w czasie. W tym drugim przypadku istnieje możliwość zdefiniowania, w ilu maksymalnie etapach pojedyncze czynności mogą być wykonywane.

Z dotychczas przyjętych założeń wynika, że wszystkie czynności mają zdefiniowane zapotrzebowanie na środki, jakie muszą być przydzielone w trakcie każdego dnia ich wykonania. Podczas obliczania terminów ich realizacji program nie ma prawa zmiany tych wartości i musi się do nich dostosować. Prowadzi to do sytuacji, że w rozpatrywanym dniu realizacji część lub wszystkie dostępne środki nie mogą w pełni zostać wykorzystane, gdyż jest ich za mało, aby rozpocząć realizację nowej czynności, a równocześnie część z dostępnych zasobów pozostaje na placu budowy bez przydziału do wykonania jakiegokolwiek czynności. System SPRIM umożliwia użycie specjalnej techniki planowania czynności, zwanej relokacją środków. Dopuszcza ona zmiany rozkładu zapotrzebowania na środki w trakcie wykonania czynności, wynikające z deklaracji użytkownika, przy zachowaniu stałych wartości łącznego zapotrzebowania na poszczególne zasoby. Przebieg analiz z aktywną relokacją można kontrolować, wykorzystując kilka dodatkowych opcji programu. Zastosowanie analiz z wykorzystaniem relokacji

może prowadzić nawet do 30% skrócenia planowanego czasu wykonania obiektu.

Wyniki obliczeń

Obliczenia prowadzono w systemie kalendarzowym, zakładając pięciodniowy tydzień pracy. Przykładowy termin rozpoczęcia prac na obiekcie ustalono na 01.03.94 r. W trakcie obliczeń uwzględniano przerwę zimową, trwającą od 1 grudnia do końca lutego każdego roku. W pierwszym etapie obliczeń wykonano analizę czasu. Wykazała ona, że najwcześniejszy możliwy termin zakończenia robót wypada po 945 dniach roboczych, tzn. 28.10.98 r. Po wprowadzeniu danych o zapotrzebowaniu na poszczególne środki wykonano ich sumowanie w terminach najwcześniejszych i najpóźniejszych. Przegląd wyników obliczeń oraz wydruków przedstawiających zapotrzebowanie na poszczególne zasoby w całym okresie wykonania obiektu pozwolił na ustalenie pierwszych, wstępnych poziomów dostępności środków, oznaczonych symbolem S1 (kolejno analizowane zestawy dostępności środków oraz ich ceny zestawiono w tabeli). Dostępność analizowanych środków w zestawie S1 i dalszych została przyjęta na podstawie realnych możliwości występujących na placu budowy. W pierwszym etapie obliczeń założono występowanie tylko zasobów podstawowych, o dostępności prostej. Równocześnie określono koszty użycia tych zasobów (w tysiącach starych złotych za roboczogodzinę). Przyjęto, że wykonawca w trakcie wykonywania robót będzie korzystał wyłącznie z własnych środków, co pozwoliło na określenie kosztów przestoju poszczególnych maszyn i robotników.

Testowanie zadeklarowanych dostępności przed analizą ostrzegło o zbyt małej, łącznej dostępności robotników. Przeprowadzona, mimo ostrzeżenia, analiza przy ograniczonych środkach wykazała, że przedsięwzięcie może się najwcześniej zakończyć 23.08.2001 r., tzn. po 1480 dniach rob., a łączny koszt zatrudnienia wszystkich środków wyniesie około 24 743 mln zł. Ponieważ termin zakończenia uznano za zbyt odległy, wykonano analizę przy ograniczonym czasie, zakładając rezerwę czasu 200 dni roboczych w stosunku do terminu ustalonego w trakcie analizy czasu. Obliczone łączne zapotrzebowanie na poszczególne zasoby znacznie przekroczyło planowane dostępności, więc powrócono do analizy przy ograniczonych zasobach. Zadeklarowano dostępności środków rezerwowych po nieco wyższych cenach (zestaw S2) i ponownie obliczenia. Przyniosły one skrócenie realizacji obiektu do 1161 dni rob. (30.11.1999 r.), lecz zwiększyły koszt wykonania do 27 389 mln zł (należy zaznaczyć, że w trakcie obliczania całkowitego kosztu wykonania obiektu nie uwzględniano kosztów związanych z zamrożeniem środków finansowych, inflacją, kosztami obsługi kredytu bankowego itp). Dotychczasowe obliczenia prowadzono przy założeniu, że wszystkie czynności w harmonogramie będą wykonywane bez podziału ich na etapy. W dalszej kolejności powtórzono obliczenia dla tego zestawu zasobów, dopuszczając podział czynności w trakcie realizacji. Skróciło to wykonanie obiektu do 1112 dni rob. (20.09.1999 r.) przy koszcie 26 717 mln zł i planowanym podziale na etapy czterech czynności.

Z wydruków łącznego zapotrzebowania na poszczególne środki wynikało, że

Tabela. Zestawienie analizowanych dostępności i cen środków na przykładzie zbiornika Łąki Korytowskie

Zestaw	Środek	Dostępność podstawowa				Dostępność rezerwowa			
		liczba środków		cena w tys. zł/h		liczba środków		cena w tys. zł/h	
		od dnia	ile szt.	użyte	przestoje	od dnia	ile szt.	użyte	przestoje
S1	Z	94.03.01	4	292	100				
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	20	40	20				
	S	94.03.01	4	188	75				
S2	Z	94.03.01	4	292	100	94.03.01	2	350	100
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	20	40	20	94.03.01	10	48	20
	S	94.03.01	4	188	75	94.03.01	2	225	75
S3	Z	94.03.01	6	292	100	94.03.01	1	350	100
	Z	96.07.01	3	292	100				
	Z	98.08.01	0	292	100				
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	25	40	20	94.03.01	0		
	R					95.07.15	12	48	20
	R					97.03.01	0		
	S	94.03.01	6	188	75	94.03.01	1	225	75
	S	96.08.01	3	188	75				
S	98.08.01	0	188	75					
S5	Z	94.03.01	4	292	100	94.03.01	2	584	0
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	20	40	20	94.03.01	10	80	0
	S	94.03.01	4	188	75	94.03.01	2	376	0
S7	Z	94.03.01	4	292	100	94.03.01	4	584	0
	Z	96.07.01	3	292	100	96.07.01	1	584	0
	Z	98.08.01	0	292	100				
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	25	40	20	94.03.01	0		
	R					95.07.15	12	80	0
	R					97.03.01	0		
	S	94.03.01	4	188	75	94.03.01	4	376	0
	S	96.08.01	3	188	75	96.08.01	1	376	0
S	98.08.01	0	188	75					
S8	Z	94.03.01	4	292	100				
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	20	40	20	94.03.01	5	48	20
	S	94.03.01	4	188	75				
S9	Z	94.03.01	4	292	100				
	K	94.03.01	1	170	75				
	R	94.03.01	20	40	20	94.03.01	10	48	20
	S	94.03.01	4	188	75				

dalsze przyśpieszenie realizacji obiektu wymaga zwiększenia dostępności niektórych zasobów w terminach szczególnie dużego ich zapotrzebowania. Zdecydowano się na wprowadzenie dostępności złożonych, tzn. zróżnicowanie liczby dostępnych zasobów w różnych okresach robót. Wykonano kilku wstępnych prób symulacji realizacji obiektu przy różnych poziomach złożonej dostępności poszczególnych środków. W trakcie ich wykonywania korzystano z takich możliwości programu, jak chwilowe wyłączenie z analizy poszczególnych środków czy zablokowanie dostępności rezerwowej. W wyniku przeprowadzonych obliczeń przyjęto dostępności oznaczone w tabeli 1 symbolem S3. Umożliwiają one realizację obiektu w ciągu 1091 dni rob. (20.08.1999 r.) przy łącznym koszcie zatrudnienia zasobów równym 23 782 mln zł (bez podziałów czynności). Próba dopuszczenia wykonywania prac etapami nie przyniosła znaczącej poprawy.

Ponieważ założone poziomy dostępności środków przekroczyły deklarowane przez wykonawcę ilości sprzętu, jakim dysponuje, rozważono przypadek, gdy część zasobów będzie wynajmowana. Ustalono, że koszt użycia wynajmowanych środków będzie dwukrotnie wyższy, niż zakładano to w dotychczasowych obliczeniach. Z drugiej strony, zasoby te będzie można wynajmować tylko w określonych terminach, gdy rzeczywiście będą one konieczne. Pozwala to na przyjęcie dla tych zasobów kosztów oczekiwania na pracę równych zero. Zestaw środków, w którym przyjęto takie same poziomy dostępności jak w zestawie S2 tylko po nowych cenach, oznaczono symbolem S5. Przy utrzymaniu tego samego terminu

zakończenia robót (30.11.1999 r.) koszt wykonania obiektu obniżył się do 25 528 mln zł, a dopuszczając dzielenie czynności wyniósł 25 111 mln zł (zakończenie 20.09.1999 r.). Przeanalizowano również realizację obiektu przy nowych, złożonych poziomach dostępności oznaczonych symbolem S7, w których dostępność podstawowa nie przekroczyła ilości zasobów, którymi dysponował wykonawca. Analiza przy ograniczonym czasie bez podziału czynności wykazała istnienie dwóch alternatywnych wariantów. Pierwszy pozwala na szybszą realizację obiektu (1040 dni rob., 10.06.1999 r.) przy koszcie 24 937 mln zł, drugi trwa nieco dłużej (1100 dni rob., 02.09.1999 r.) i kosztuje 24 680 mln zł. Najefektywniejsze rozwiązanie przy tym zestawie dostępności uzyskano jednak symulując realizację obiektu przy ograniczonym czasie z rezerwą 100 dni rob. System zaplanował wykonanie obiektu w ciągu 1036 dni rob. (04.06.1999 r.) przy łącznym koszcie zatrudnienia planowanych zasobów 24 379 mln zł.

Wszystkie dotychczas wykonane obliczenia przeprowadzono bez relokacji środków. Oznacza to, że w trakcie wykonywania czynności w zaplanowanych przez system terminach będą dostępne środki, zgodnie z danymi zdefiniowanymi do obliczeń. Wykonanie analizy przy aktywnej relokacji zasobów zmienia co prawda rozkład zapotrzebowania na środki w czasie realizacji czynności (przy zachowaniu sumarycznych zapotrzebowań), jednak znacznie podnosi efektywność ich wykorzystania. I tak, przy zestawie dostępności oznaczonym w tabeli 1 symbolem S1 możliwe jest ukończenie obiektu 2.06.2000 r. (1229 dni rob.) ko-

sztem 22 384 mln zł, przy podziale ośmiu czynności. Bez dzielenia czynności w trakcie ich wykonywania możliwe jest zakończenie prac 26.07.2000 r. (1267 dni rob.) kosztem 22 741 mln zł. Znaczne przyśpieszenie robót zapewniają dostępności w zestawie S2. Obiekt można zakończyć już po 864 dniach roboczych, tzn. 7.07.1998 r., nakładem 23 899 mln zł (bez dzielenia czynności). Warto zwrócić uwagę, że obliczony termin jest krótszy, niż podany w analizie czasu. Wynika to z możliwości skracania czasów realizacji czynności w trakcie relokacji środków. Dopuszczając zwiększenia dostępności robotników poprzez deklarację środków rezerwowych, możliwe jest skrócenie realizacji obiektu do 4.11.1999 r. (1144 dni rob.) kosztem 22 740 mln zł (zestaw S8), lub do 10.08.1999 r. (1083 dni rob.) kosztem 23 114 mln zł (zestaw S9) bez podziałów czynności. Kontrola zmienionych zapotrzebowań na środki wykazała istnienie wystarczającego współdziałania poszczególnych zasobów w trakcie wykonania czynności.

Wnioski

Przedstawiony przykład pokazuje, że realizację tego samego obiektu, przy stałych założeniach technologicznych, można zaplanować na wiele różnych sposobów. Specjalistyczne oprogramowanie,

takie jak zastosowany w pracy system SPRIM, umożliwia wykonywanie wielowariantowych analiz. W zależności od możliwości wykonawcy, cen poszczególnych zasobów, projektowanych terminów zakończenia robót, przyjętych założeń organizacyjnych itp. system planuje odpowiedni harmonogram robót. Poszukując rozwiązania, które najlepiej będzie spełniać oczekiwania inwestora czy wykonawcy, należy przebadać szereg odmiennych wariantów organizacyjnych. W zamieszczonym przykładzie ograniczono się tylko do zmian w dostępnościach i cenach zasobów. Rozszerzenie prowadzonych analiz przez wprowadzenie poprawek w rozkładzie zapotrzebowania na środki dla poszczególnych czynności czy zmian w konstrukcji sieci zależności prawdopodobnie doprowadziłoby do dalszego skrócenia planowanej realizacji obiektu czy obniżenia kosztów jego wykonania.

Literatura

- MOSIEJ K., POŁOŃSKI M., SOKOŁOWSKI J. 1982: *Metody sieciowe w melioracjach*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- POŁOŃSKI M. 1995: *Planowanie realizacji inwestycji melioracyjnych w funkcji czasu i środków na podstawie harmonogramów sieciowych*. Rozprawy Naukowe i Monografie Nr 203. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- TAYLOR A. 1992: *The PC direct guide to buying project management software*. PC Direct. September.