

1 Obliczanie modeli sieciowych w funkcji środków

Przykład zaczerpnięty z mojego podręcznika „Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich”. Wydawnictwo SGGW 2001 str. 77.

1.1 Założenia analizy środków oraz wymagane dane do jej przeprowadzenia

Dysponując wynikami analizy czasu, zapotrzebowaniem środków dla poszczególnych czynności i ich dostępnością, można w trakcie realizacji obiektu zaplanować każdą czynność w obrębie całkowitego zapasu czasu od najwcześniejszego początku NPP do jej najpóźniejszego końca NPK. Wyznaczenie terminu wykonania czynności w obrębie tego zakresu czasu określane jest dwoma wymogami:

- terminami zakończenia czynności poprzedzających i decydujących o możliwości rozpoczęcia danej czynności, co wynika z budowy sieci zależności i przeprowadzonej analizy czasu,
- niemożliwością przekroczenia dostępności posiadanego środka lub wydłużeniem najpóźniejszych terminów zakończenia czynności NPK wynikających z analizy czasu.

W niektórych przedsięwzięciach głównym zadaniem jest nieprzekroczenie w żadnym przypadku dostępności środka, w innym dotrzymanie końcowego terminu. W pewnych przypadkach można jednak wyznaczyć pewną ilość środków zapasowych albo też dodatkowego czasu, który można wykorzystać, o ile nie da się dotrzymać terminu zakończenia przedsięwzięcia przy założonych poziomach dostępu środków. Kolejność użycia tych zapasów i swoboda w posługiwaniu się nimi zależą od rodzaju budowanego przez użytkownika harmonogramu i możliwości programu obliczeniowego.

Przebieg analizy czasu opiera się na założeniu, że do wykonania planowanych czynności nie są potrzebne żadne środki lub też wymagane środki (zwane inaczej zasobami) są dostępne w nieograniczonych ilościach. To daleko idące uproszczenie nie pozwala właściwie wymodelować realny przebieg realizacji analizowanej inwestycji. W związku z tym modele sieciowe wyposażono w możliwość analizowania wszystkich wykorzystywanych środków. Na początku były to proste procedury sumowania i/lub bilansowania zapotrzebowania na poszczególne zasoby w kolejnych dniach wykonania obiektu na podstawie terminów wykonania czynności ustalonych w analizie czasu. Obecnie analiza ta zastała znacznie rozszerzona i polega na takim określeniu terminów wykonania wszystkich czynności zawartych w sieci zależności, aby zachowując kolejność realizacji czynności wynikającą ze struktury sieci zależności łączne zapotrzebowanie na poszczególne środki każdego dnia realizacji nie przekroczyło zadeklarowanych dostępności, a całe przedsięwzięcie zostało ukończone w możliwie najkrótszym czasie (lub jego realizacja kosztowała najmniej).

Algorytmy wyznaczające przebieg analizy środków są bardzo złożone (np. Mitchell 1977, Błażewicz i inni 1983, Christofides i inni 1987, Boctor 1990, Elmaghraby 1990, Yau i inni 1990) w związku z czym jest ona wykonywana praktycznie wyłącznie na komputerach. Programy umożliwiające jej realizację posiadają różne możliwości i ograniczenia, które wymagają dokładnego rozpoznania oddzielnie dla każdego z nich. Zamieszczony poniżej opis

analizy środków przedstawia główne założenia jej przebiegu bez rozpatrywania możliwości poszczególnych programów.

Wykonanie analizy środków wymaga zdefiniowania niezbędnych danych. Poniżej przedstawiono minimalny zestaw informacji do jej przeprowadzenia.

- *Wyniki analizy czasu*

Analiza czasu jest pierwszym i obowiązkowym etapem obliczeń do wykonania analizy środków. Na jej podstawie wyznaczane są najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy wykonania poszczególnych czynności oraz ich zapasy czasu, najwcześniejszy możliwy termin zakończenia całości robót itp. Analiza środków wykorzystuje te dane oraz wszystkie informacje, które były niezbędne do jej przeprowadzenia a więc konstrukcję sieci zależności, termin rozpoczęcia robót, czasy wykonania czynności, planowane przerwy w realizacji, terminy dyrektywne.

- *Lista środków*

Każdy zasób, który ma być poddany analizie, musi zostać zdefiniowany. Definicja środka wymaga podania jego nazwy. Każda czynność może wymagać zapotrzebowania dowolnej kombinacji zasobów określonych na liście środków poddanych analizie. Dodatkowym parametrem charakteryzującym środek jest koszt jego użycia. Dzięki jego zdefiniowaniu możliwe jest zazwyczaj obliczenie kosztów realizacji całego przedsięwzięcia. Przeważnie naliczane są tylko koszty środków przydzielonych do realizacji czynności, bez uwzględniania kosztów środków, które są w dyspozycji wykonawcy, lecz nie zostały użyte.

Zapotrzebowanie na środki

Prawie każda czynność z sieci zależności wymaga do jej realizacji równoczesnego zaangażowania jednego lub kilku zasobów. Rozkład ilości danego środka, jaki musi być użyty do wykonania pojedynczej czynności w czasie jej trwania, nazywany jest zapotrzebowaniem. Spotyka się dwa sposoby definiowania zapotrzebowania na środek:

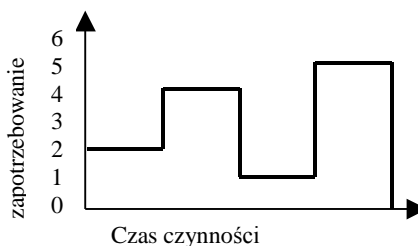
- poprzez określenie *dziennego zużycia* (np. 4 zbrojarzy pracujących każdego dnia), stosowane zwłaszcza do środków, których nie można magazynować (tzw. zasoby odnawialne, które nie mogą być magazynowane w czasie),
- poprzez podanie *całkowitego zużycia* środka w trakcie wykonania czynności (np. 4000 szt. rurek drenarskich Φ 5 cm), używane najczęściej w odniesieniu do materiałów (tzw. zasoby nie odnawialne, które mogą być magazynowane i wykorzystane w dowolnym momencie),

Najczęściej stosuje się definicję zapotrzebowania przez określenie dziennego zużycia. W tym wypadku zużycie środka może być określone jako proste lub złożone. *Środki proste* to takie, które są równomiernie zużywane przez cały czas trwania czynności i każdego dnia realizacji wymagana jest ta sama ilość środka (rys. 5.1). *Środki złożone* nie są zużywane równomiernie i wykazują zmienne poziomy zużycia w czasie trwania czynności (rys. 5.2). Jeśli podano tylko jeden poziom, to zakłada się, że odnosi się on do wykonania całej czynności.

Każda czynność może mieć zdefiniowane zapotrzebowanie na dowolną liczbę zasobów. Jeśli czynność nie wykaże zapotrzebowania na żaden środek (np. przerwa technologiczna), będzie ona zaplanowana w harmonogramie zgodnie z czasem jej trwania a termin jej rozpoczęcia i zakończenia będzie wynikał z istniejących powiązań w sieci zależności.



Rys. 5.1. Przykładowy wykres zapotrzebowania prostego



Rys. 5.2. Przykładowy wykres zapotrzebowania złożonego

- *Dostępność środka*

Podczas realizacji przedsięwzięcia wykonawca angażuje wszystkie niezbędne środki. Ilość zasobu, jaka jest możliwa do użycia podczas prowadzenia robót, nazywana jest dostępnością. Musi ona zostać jednoznacznie określona dla wszystkich analizowanych środków. Może być ona stała przez cały czas i wówczas nazywa się ją *dostępnością prostą* lub zmieniać się i wówczas określana jest jako *dostępność złożona*. Dostępność musi być zdefiniowana dla każdego analizowanego środka przez cały okres prowadzenia prac.

1.2 Rodzaje i opcje analizy środków

Istnieją dwa podstawowe schematy obliczeń analizy środków:

- *analiza przy ograniczonych środkach,*
- *analiza przy ograniczonym czasie.*

Najczęściej wykorzystywany jest schemat pierwszy a więc przy ograniczonych środkach. W trakcie tej analizy program ustala nowe terminy realizacji wszystkich czynności z zachowaniem ich kolejności wykonania wynikającymi z topologii sieci zależności. W analizie tej jako podstawowe kryterium przyjęto, 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 należy przeanalizować zapotrzebowanie na wszystkie środki dla tych czynności i zmodyfikować zapotrzebowanie i/lub dostępność, a następnie ponowić analizę.

Analiza przy ograniczonym czasie również ustala nowe terminy wykonania wszystkich czynności. Główne kryterium tej analizy polega na dotrzymaniu terminu realizacji całego przedsięwzięcia ustalonego w analizie czasu a więc najkrótszego możliwego do osiągnięcia. W przypadku braku środków zadeklarowanych w dostępnościach, program przekracza te poziomy i planuje realizację czynności pomimo braku środków. Wszystkie przekroczenia zadeklarowanych dostępności zostaną wykazane w informacjach dotyczących zużycia środków. Analiza zawsze znajduje poszukiwane rozwiązanie.

Te dwa podstawowe schematy obliczeniowe mogą być modyfikowane w zależności od potrzeb i możliwości programu obliczeniowego. Najczęściej wykorzystywane są następujące opcje:

- deklaracja rezerwy czasu o jaką można przedłużyć realizację obiektu w analizie przy ograniczonym czasie. Jeśli program nie dopuszcza takiej możliwości można to zazwyczaj osiągnąć poprzez deklarację terminu dyrektywnego wczesnego dla zdarzenia końcowego sieci,

- deklaracja rezerwowych dostępności środków, które mogą być użyte w przypadku braku środków na poziomach podstawowych; niektóre programy deklaracje środków dodatkowych dopuszczają w postaci pracy w nadgodzinach (jak również pracy w niepełnym wymiarze),
- możliwość wykonywania czynności etapami; niektóre programy dopuszczają deklarowania takiej opcji oddzielnie dla każdej czynności a nawet wyznaczenie najkrótszego dopuszczalnego okresu na jaki można podzielić daną czynność,
- możliwość deklaracji czynności, które muszą być wykonane jedna po drugiej bez żadnych przerw w trakcie ich realizacji,
- wybór kryterium ze względu na które poszukiwane jest rozwiązanie (np. najniższy koszt wykonania obiektu, najkrótszy termin zakończenia robót, najmniejsze przekroczenie dostępności środków itp.),
- możliwość czasowego wyłączenia wybranych środków z analizy bez kasowania danych o ich dostępności i zapotrzebowaniu,
- bilansowanie zapotrzebowania na środki wg terminów najwcześniejszych i najpóźniejszych ustalonych w analizie czasu.

Stosując umiejętnie wszystkie możliwości modyfikacji analizy środków jakie dopuszcza używany program zazwyczaj można stworzyć harmonogram planowanych robót odpowiedni do posiadanych możliwości i stawianych wymagań.

1.3 Wyniki analizy środków

Celem analizy środków jest ustalenie terminów realizacji wszystkich czynności przy zachowaniu narzuconych ograniczeń w dostępności zasobów oraz uwzględnieniu czasów trwania czynności, ich zapotrzebowania na poszczególne środki i ich kolejności wynikającej z konstrukcji sieci zależności. Szczegółowe wyniki analizy zależą od danych o obiekcie, użytego programu obliczeniowego, rodzaju i opcji analizy jednak zawsze wyniki obejmują następujące informacje:

- terminy rozpoczęcia i zakończenia każdej czynności w sieci zależności. Jeśli czynność została zaplanowana w kilku etapach podane zostaną szczegółowe informacje o terminach każdego z nich. Często informacja o terminach ustalonych przez analizę środków zostaje uzupełniona o terminy ustalone w analizie czasu,
- informacje o użyciu poszczególnych środków, które zazwyczaj podawane są w postaci tabel i/lub wykresów. Można na nich odczytać łączne zapotrzebowanie i dostępność na każdy analizowany środek w dowolnym dniu realizacji obiektu. Te podstawowe informacje o środkach często są uzupełniane następującymi danymi:
- termin najwcześniejszego i najpóźniejszego użycia środka,
- łączny koszt użycia środka oraz zestawienie kosztów w postaci krzywych sumowych (esogramów),
- stopień wykorzystania zadeklarowanych dostępności,
- minimalne i maksymalne zapotrzebowania na środek w trakcie prowadzenia robót,
- okresy, w których przekroczono założone dostępności oraz wielkości tych przekroczeń.

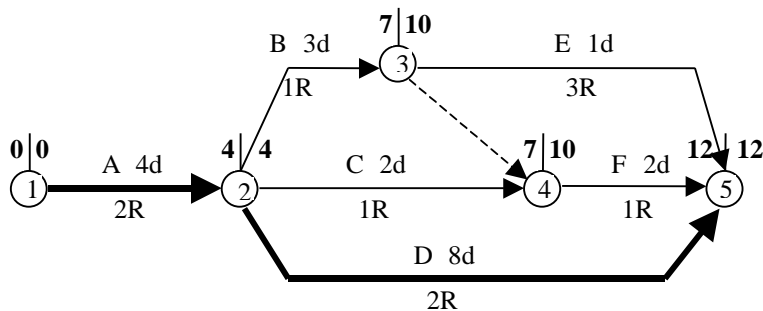
Z obliczonych terminów czynności wynikają dalsze parametry o całym przedsięwzięciu, takie jak: koszt realizacji całego obiektu, jego termin zakończenia, koszty użycia poszczególnych środków itp. Zazwyczaj niezbędne informacje są dostarczane przez użyty program w postaci zestawień tabelarycznych, wykresów graficznych, zbiorczych raportów itp., których układ często można modyfikować w zależności od potrzeb. Niektóre z programów pozwalają eksportować te dane do innych programów (arkuszy kalkulacyjnych,

systemów prezentacyjnych, edytorów tekstu itp.) w celu dalszej obróbki uzyskanych wyników lub ich dokumentowania.

1.4 Przykład 4. Analiza środków

Przykład zaczerpnięty z mojego podręcznika „Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich”. Wydawnictwo SGGW 2001 str. 83.

Na rysunku 5.3 przedstawiono przykład bardzo prostej sieci o sześciu czynnościach i jednej czynności zerowej.



Rys. 5.3. Schemat modelu sieciowego.

Czasy trwania poszczególnych czynności w dniach podano nad strzałką, a ilość środków potrzebnych do jej wykonania - pod strzałką. Przyjęto tylko jeden rodzaj środka i zapotrzebowanie podano w postaci dziennego zapotrzebowania prostego- liczby robotników. Dla ułatwienia założono, że czynności nie będą dzielone w czasie.

Obliczenie modelu w funkcji czasu (metodą deterministyczną)

E t a p 1. Oblicza się najwcześniejsze terminy zaistnienia (NWZ) dla zdarzeń 1,2,3,4,5:
 $NWZ_1 = 0$; $NWZ_2 = 0 + 4 = 4$; $NWZ_3 = 4 + 3 = 7$; $NWZ_4 = \max(7 + 0; 4 + 2) = 7$
 $NWZ_5 = \max(7 + 1; 7 + 2; 4 + 8) = 12$

E t a p 2. Oblicza się najpóźniejsze terminy zaistnienia (NPZ) dla zdarzeń 5,4,3,2,1:
 $NPZ_5 = NWZ_5 = 12$; $NPZ_4 = 12 - 2 = 10$; $NPZ_3 = \min(12-1; 10-0) = 10$
 $NPZ_2 = \min(12-8; 10-3; 10-2) = 4$; $NPZ_1 = 4 - 4 = 0$

Znając najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy zaistnienia zdarzeń, można obliczyć najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy dla czynności. Przedstawiono je w tabeli 5.1 oraz w postaci harmonogramów liniowych na rysunku 5.4 i 5.5.

Tabela 5.1. Terminy wykonania czynności i zapasy czasu sieci zależności z rys. 5.3

ZP	ZN	Nazwa	Ilość środka	T	NWP	NWK	NPP	NPK	ZC	ZS
1	2	A	2	4	0	4	0	4	0	0
2	3	B	1	3	4	7	7	10	3	0
2	4	C	1	2	4	6	8	10	4	1
2	5	D	2	8	4	12	4	12	0	0
3	5	E	3	1	7	8	11	12	4	4
4	5	F	1	2	7	9	10	12	3	3

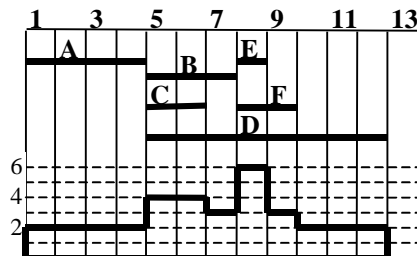
Jak wynika z obliczeń, ścieżka krytyczna przebiega przez zdarzenia 1, 2, 5, tzn. że na ścieżce krytycznej leżą czynności A i D.

Obliczenie modelu sieciowego w funkcji środków.

Jako pierwsze wykonano wykresy sumowe zużycia środków w terminach najwcześniejszych i najpóźniejszych wynikających z analizy czasu. (rys. 5.4 i 5.5). Jak widać sumowanie dla najwcześniejszych terminów daje początkowe spiętrzenie zużycia środków zmniejszające się ku końcowi. Natomiast sumowanie przy terminach najpóźniejszych daje początkowo niskie zużycie środków, zwiększające się pod koniec przedsięwzięcia.

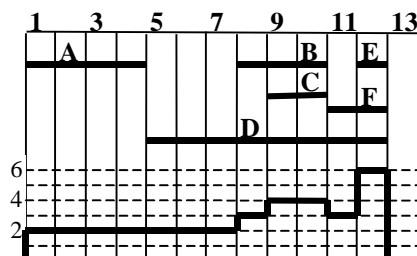
Na podstawie uzyskanych wykresów łącznego zapotrzebowania można było ustalić wartość dostępności środków, którą w tym przypadku przyjęto jako dostępność prostą w ilości trzech robotników do dyspozycji przez cały okres trwania przedsięwzięcia. Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono wyniki analizy środków. Jak widać, w analizie przy ograniczonym czasie ósmego dnia planowanych robót przekroczone zostało zużycie środków, lecz ukończono przedsięwzięcie w terminie 12 dni, wynikającym z analizy czasu. Natomiast przy braku możliwości przekroczenia środków, czas realizacji wydłużył się o jeden dzień, lecz za to uzyskano przez cały czas równomierne zatrudnienie.

Używając różnych programów do analizy środków można uzyskać odmienne wyniki, a więc terminy realizacji czynności oraz sumaryczne zapotrzebowania na środki. Na kolejnych rysunkach 5.8 i 5.9 pokazano inny wariant rozwiązania tego samego zadania.



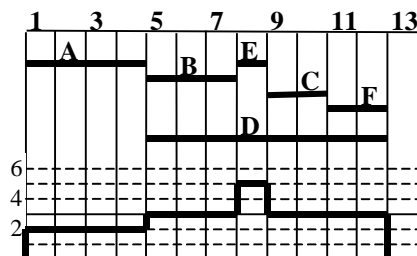
Rys. 5.4.
Układ czynności wg terminów najwcześniejszych analizy czasu

Wykres sumowy środków wg terminów najwcześniejszych



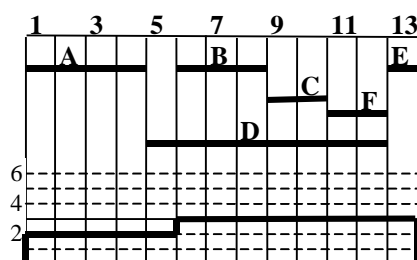
Rys. 5.5.
Układ czynności wg terminów najpóźniejszych analizy czasu

Wykres sumowy środków wg terminów najpóźniejszych



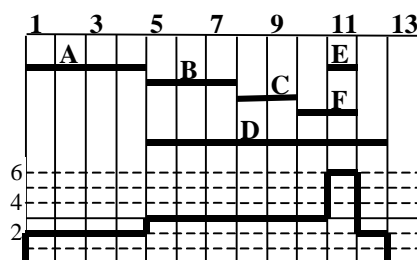
Rys. 5.6.
Układ czynności wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności czasu zakończenia z analizy czasu

Wykres sumowy środków wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności czasu zakończenia z analizy czasu, dostępność środka - 3



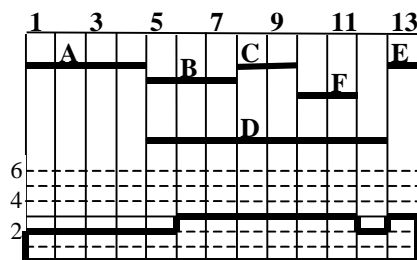
Rys. 5.7.
Układ czynności wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności dostępności środków

Wykres sumowy środków wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności dostępności środków, dostępność środka - 3



Rys. 5.8.
Układ czynności wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności czasu zakończenia z analizy czasu
Wariant II

Wykres sumowy środków wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności czasu zakończenia z analizy czasu, dostępność środka - 3
Wariant II



Rys. 5.9.
Układ czynności wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności dostępności środków
Wariant II

Wykres sumowy środków wg analizy środków przy kryterium nieprzekraczalności dostępności środków, dostępność środka - 3
Wariant II