

Mieczysław Połoński

Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich

Warszawa IX 2000

Spis treści

1	1	Ogólny opis metod sieciowych	3
2	2	Klasyfikacja modeli i metod sieciowych.....	5
3	2.1	Sposoby interpretacji modeli sieciowych.....	5
4	2.2	Rodzaj informacji o czasach trwania czynności	14
5	2.3	Rodzaj prowadzonych analiz	15
6	2.4	Rozwój metod sieciowych	16
7	3	Założenia metod sieciowych	18
8	3.1	Pojęcie sieci zależności	18
9	3.2	Zasady porządkowania sieci.....	19
10	4	Obliczanie modeli sieciowych w funkcji czasu	24
11	4.1	Wstęp	24
12	4.2	Analiza czasu	24
13	4.3	Dane opcjonalne uwzględniane w analizie czasu	33
14	4.4	Przykład 1. Analiza czasu, metoda deterministyczna	36
15	4.5	Przykład 2. Analiza czasu, metoda probabilistyczna	40
16	4.6	Przykład 3. Analiza czasu, terminy dyrektywne i przerwy	71
17	5	Obliczanie modeli sieciowych w funkcji środków	76
18	5.1	Założenia analizy środków oraz wymagane dane do jej	
19		przeprowadzenia	76
20	5.2	Rodzaje i opcje analizy środków.....	79
21	5.3	Wyniki analizy środków.....	81
22	5.4	Przykład 4. Analiza środków	82
23	6	Zalecany sposób prowadzenia analizy czasu i środków.....	87
24	7	Wybór czasu trwania realizacji inwestycji na podstawie	
25		harmonogramów sieciowych.....	92
26	8	Kontrola realizacji obiektu i aktualizacja harmonogramu	102
27	9	Literatura	105

1 Ogólny opis metod sieciowych

Bodźcem do powstania metod sieciowych stał się fakt, że metody planowania przedsięwzięć stosowane wcześniej nie odzwierciedlały jednoznacznie wszystkich powiązań oraz nie precyzowały ściśle współzależności między poszczególnymi czynnościami składającymi się na całość przedsięwzięcia.

Metody sieciowe, jako nowy instrument planowania i organizacji, umożliwiają pełne poznanie struktury analizowanego przedsięwzięcia, toku realizacji wszystkich ujętych robót, sprawne zarządzanie i koordynowanie środków w celu dotrzymania terminu. Stwierdzono przy tym, że metody te zmuszają do precyzyjnego przeanalizowania wszystkich wykonywanych prac, a tym samym ograniczają improwizację i chaos w procesie realizacji przedsięwzięcia.

W zakresie sporządzania harmonogramu realizacji obiektów budowlanych, szczególnie małych, panuje przekonanie, że niecelowe jest stosowanie tradycyjnych rozwiązań graficznych. Na małej budowie z powodu drobnych awarii często dochodzi do zmiany w przebiegu robót i powrót do realizacji według założonego harmonogramu staje się niemożliwy. W tej sytuacji bardziej uzasadnione jest przedstawienie realizacji obiektu w postaci modelu sieciowego. Należy przy tym zauważyć, że planowanie sieciowe w stosunku do planowania tradycyjnego, tzn. na podstawie wykresów liniowych, posiada następujące zalety (Mosiej i in. 1982):

- w harmonogramach liniowych trudno jest określić wzajemne zależności między czynnościami. Nie ujmują one współzależności między zakończeniem a rozpoczęciem poszczególnych robót, jak również związków zachodzących między czynnościami wiodącymi a pozostałymi. Nie są w stanie ujawnić w dowolnym czasie nieprawidłowości toku realizacji procesu produkcyjnego i umożliwić stosowanie środków zaradczych,

- harmonogramy liniowe nie pozwalają na szybkie i przejrzyste wydzielenie tych robót, od których zależy czas trwania przedsięwzięcia. Metody sieciowe eksponują te czynności, a ponadto podają zapas czasu dla czynności pozostałych,
- harmonogramy liniowe w przypadku zmiany czasu przebiegu robót w stosunku do czasu planowanego, szybko się dezaktualizują, co oznacza konieczność częstej i trudnej do wykonania aktualizacji. Modele sieciowe można weryfikować bez konieczności ponownego ich rozrysowywania, a nawet przy bardzo skomplikowanych sieciach aktualizacja następuje bardzo szybko, w szczególności gdy korzysta się z komputerów,
- harmonogramy sieciowe pozwalają na prowadzenie pełnej analizy środków a więc znacznie rozszerzają zakres ich stosowania oraz podnoszą wiarygodność uzyskiwanych wyników obliczeń.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że metody sieciowe nie tworzą same w sobie poprawnych rozwiązań organizacyjnych. Stanowią one jedynie bardzo wygodne i użyteczne narzędzie, które w zależności od tego jak będzie stosowane, może przynieść znaczne korzyści, bądź tylko stanowić parawan, za którym będzie ukrywana słabość zastosowanych rozwiązań.

Rozwój metod sieciowych spowodowany został również faktem olbrzymiego rozwoju elektronicznej techniki obliczeniowej. Bez korzystania z komputera trudno sobie wyobrazić obliczenie modeli sieciowych o kilkuset czy kilku tysiącach czynności. Dlatego też zostały opracowane specjalne programy komputerowe, umożliwiające przeprowadzenie obliczeń w krótkim czasie i z możliwie małym nakładem pracy.

2 Klasyfikacja modeli i metod sieciowych

2.1 Sposoby interpretacji modeli sieciowych

Konstrukcja modeli sieciowych oparta jest na teorii grafów (Ignasiak 1975, Korzan 1978). W trakcie rozwoju analizy sieciowej powstało wiele sposobów interpretacji tych modeli matematycznych, jako modeli dowolnego projektu robót. W skrypcie ograniczono się do omówienia modeli o zdeterminowanej strukturze. W tej grupie najważniejszy podział dotyczy sposobu konstruowania samego modelu.

W zależności od tego, jak w powiązaniu z projektem interpretuje się podstawowe elementy tzn. węzły i krawędzie, grafy można podzielić na dwie podstawowe grupy:

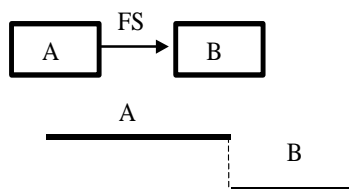
- grafy sieciowe definiowane krawędziowo, tzw. *sieci dwupunktowe*,
- grafy sieciowe definiowane węzłowo, tzw. *sieci jednopunktowe*.

W pierwszym przypadku (modele dwupunktowe) krawędzie tego grafu przedstawiają czynności a węzły, pomiędzy którymi leżą krawędzie wskazują na ich początek i koniec. Innymi słowy ocena krawędzi grafu wyraża czas trwania modelowanej czynności, jej wymagania w stosunku do środków itp., a węzły fakt ich rozpoczęcia lub zakończenia. Krawędź musi być skierowana, a więc mieć określony zwrot, który reprezentuje gdzie jest jej początek i koniec. W modelach tych, węzeł nie może trwać w czasie (a więc opóźniać wykonanie przedsięwzięcia), zużywać środki, definiować nie standardowy sposób rozpoczynania wychodzących z niego czynności lub w jakikolwiek inny sposób modyfikować sposób prowadzenia obliczeń. Kolejność wykonywania czynności wynika z ich wzajemnego położenia w modelu. Aby można było rozpocząć wykonywanie dowolnej czynności należy całkowicie ukończyć wszystkie, które ją poprzedzają. W celu zawarcia wszystkich koniecznych ograniczeń w zakresie kolejności

następowania robót w metodzie tej używa się dodatkowo tzw. czynności zerowych, a więc czynności o czasie trwania równym zero. Taki sposób interpretowania modelu sieciowego jako projektu realizacji jakiegoś przedsięwzięcia jest historycznie starszy i był stosowany od początku rozwoju metod sieciowych (Idźkiewicz 1967, Bładowski 1970, Kapliński, Stefański 1973, Biernacki, Cyunel 1989).

Natomiast w drugim sposobie interpretacji (sieci jednopunktowe) sposób budowy modelu jest odwrotny: węzły grafu reprezentują czynności danego projektu a więc dostarczają informacji o czasie trwania czynności oraz jej wymagania odnośnie środków. Krawędzie leżące pomiędzy węzłami, również o zaznaczonym zwrocie, wskazują na powiązania pomiędzy poszczególnymi czynnościami, a więc wyznaczają kolejność ich wykonania. W celu zmniejszenia występujących krawędzi można stosować tzw. czynności pozorne, a więc czynności o czasie trwania równym zero.

W tym sposobie interpretacji z czasem znacznie rozszerzono definicję krawędzi. Początkowo, krawędź oznaczała, że po całkowitym zakończeniu czynności (węzła) z której wychodzi, może się rozpocząć czynność do której dochodzi (zgodnie z zaznaczonym zwrotem). Ten typ połączenia oznaczono symbolem FS (finish to start, rys. 2.1).

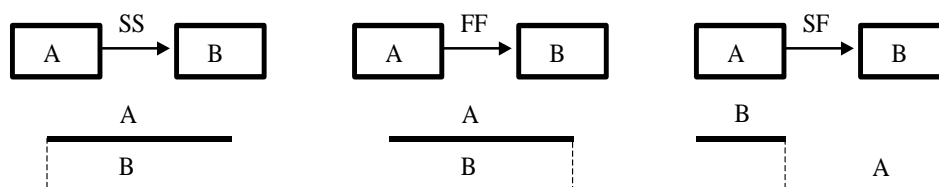


Rys. 2.1. Klasyczny typ połączenia czynności w sieciach jednopunktowych w ujęciu sieciowym i wykresów liniowych Gantta

Nowsze systemy, oparte na sieciach jednopunktowych, dopuszczają definiowanie alternatywnych połączeń powiązań między czynnościami takich jak (rys. 2.2):

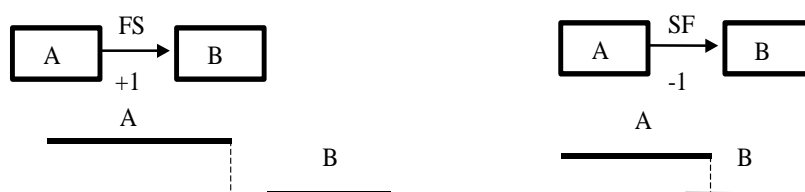
- SS (start to start) - start kolejnych czynności uzależniony jest od rozpoczęcia ich poprzedników,
- FF (finish to finish) - zakończenie kolejnych czynności uzależnione jest od zakończenia ich poprzedników,

- SF (start to finish) - koniec następujących czynności zależy od rozpoczęcia ich poprzedników (przestawienie kolejności wykonania zadań).



Rys. 2.2. Zmodyfikowane typy połączeń czynności w sieciach jednopunktowych w ujęciu sieciowym i wykresów liniowych Gantta

Dodatkowo w systemach tych możliwe jest określanie czasów nakładania się czynności lub wymaganych przerw pomiędzy ich wykonaniem (rys. 2.3). Należy zauważyć, że taki sposób ustalania powiązań między czynnościami podnosi elastyczność budowanej sieci, lecz często komplikuje i usztywnia analizę środków oraz powoduje kłopoty z poprawną interpretacją uzyskanych wyników obliczeń (np. użycie połączeń typu SF).



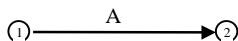
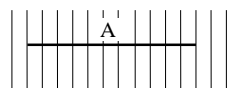
Rys. 2.3. Połączenie czynności w sieciach jednopunktowych typu FS z dodanym opóźnieniem i nakładaniem się czynności w ujęciu sieciowym i wykresów liniowych Gantta

Porównując oba przedstawione sposoby interpretowania modelu sieciowego należy zauważyć, że w dużej mierze są one sobie równoważne, a łatwość ich odczytywania wiąże się przede wszystkim z przyzwyczajeniem. W modelach dwupunktowych operując tylko połączeniem typu FS (jedynym dostępnym) oraz stosując czynności zerowe, możliwe jest odtworzenie dowolnego układu powiązań między czynnościami utworzonego w systemie jednopunktowym, przy zastosowaniu nie standardowych typów połączeń.

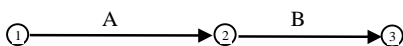
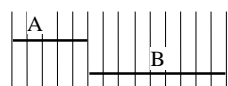
Zaletą takiego rozwiązania jest brak trudności z interpretacją budowy sieci i uzyskanych wyników obliczeń, a wadą zwiększenie liczby czynności.

Na rysunkach 2.4 i 2.5 przedstawiono kilkanaście przykładów sposobu odwzorowań podstawowych rozwiązań logicznych występujących w harmonogramach liniowych w porównaniu z odwzorowaniami na sieci zależności. We wszystkich przykładach zachowano jeden początek i koniec sieci zależności. Na rysunku 2.4 podano konstrukcję sieci wg metody dwupunktowej, z wykorzystaniem czynności zerowych. Na rysunku 2.5 podano konstrukcję tych samych logicznych układów czynności wg metody jednopunktowej, z wykorzystaniem czynności pozornych.

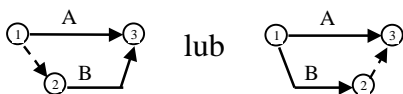
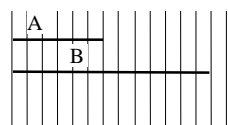
Z kolei na rysunku 2.6 zamieszczono schemat jednej, kilkunasto czynnościowej sieci zależności w układzie dwu i jednopunktowym. W przypadku sieci jednopunktowej przyjęto jeden początek i koniec sieci. Sieć jednopunktowa została rozrysowana w dwóch wariantach. W pierwszym z nich przeniesiono zależności występujące w sieci dwupunktowej dokładnie w tej samej postaci. W drugim wariantcie wprowadzono węzły (oznaczone symbolem „W”), czyli czynności pozorne o czasie trwania równym zero, dzięki czemu zredukowano liczbę zależności pomiędzy czynnościami co między innymi poprawiło czytelność sieci zależności.



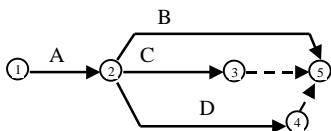
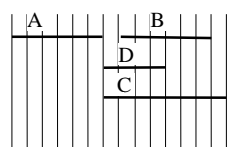
Czynność A.



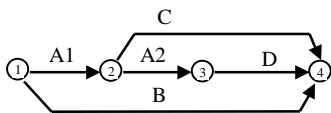
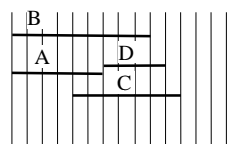
Czynność B rozpoczyna się po zakończeniu czynności A.



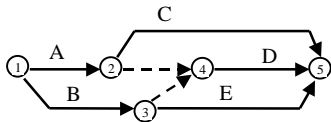
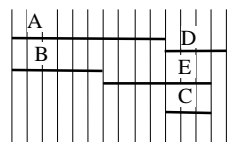
Czynność A i B rozpoczynają się równocześnie.



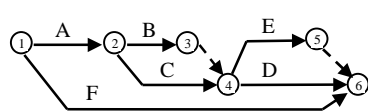
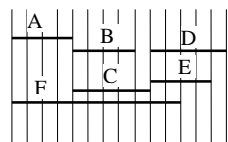
Czynności B, C i D rozpoczynają się po zakończeniu czynności A.



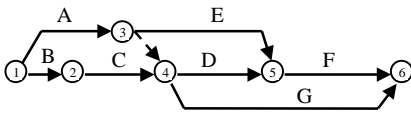
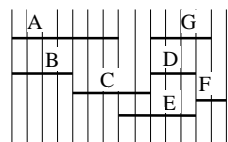
Czynność A i B rozpoczynają się równocześnie. Czynność C rozpoczyna się po pewnym zaawansowaniu czyn. A. Czyn. D rozpoczyna się po zakończeniu czyn. A.



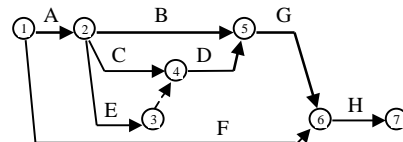
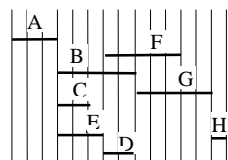
Czynność A, B rozpoczynają się równocześnie. Czynność C rozpoczyna się po zak. czyn. A. Czyn. D rozpoczyna się po zak. A i B. Czyn. E rozpoczyna się po zak. czyn. B.



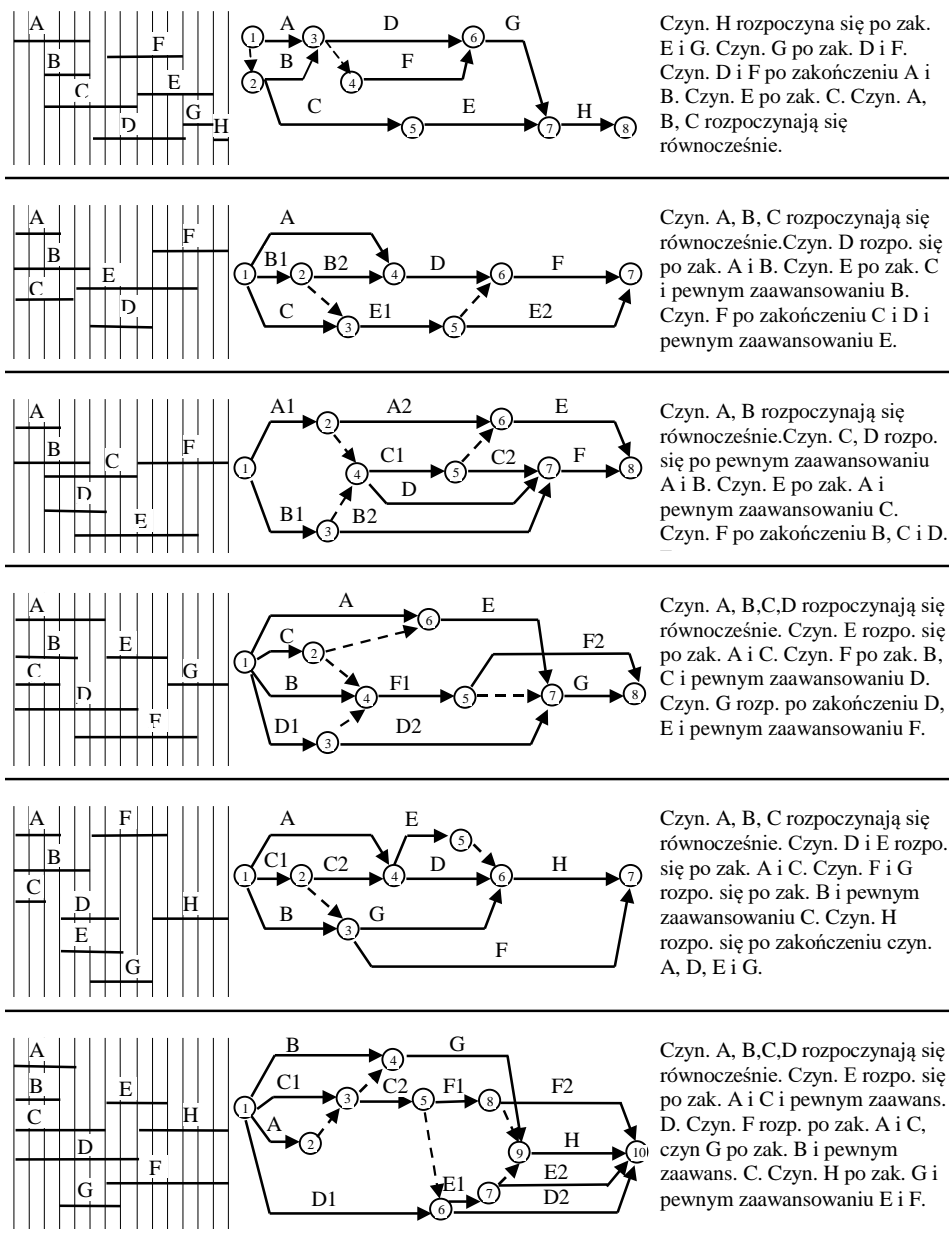
Czynność A i F rozpoczynają się równocześnie. Czynność B i C rozpoczyna się po zak. czyn. A. Czyn. D i E rozpoczyna się po zak. B i C.



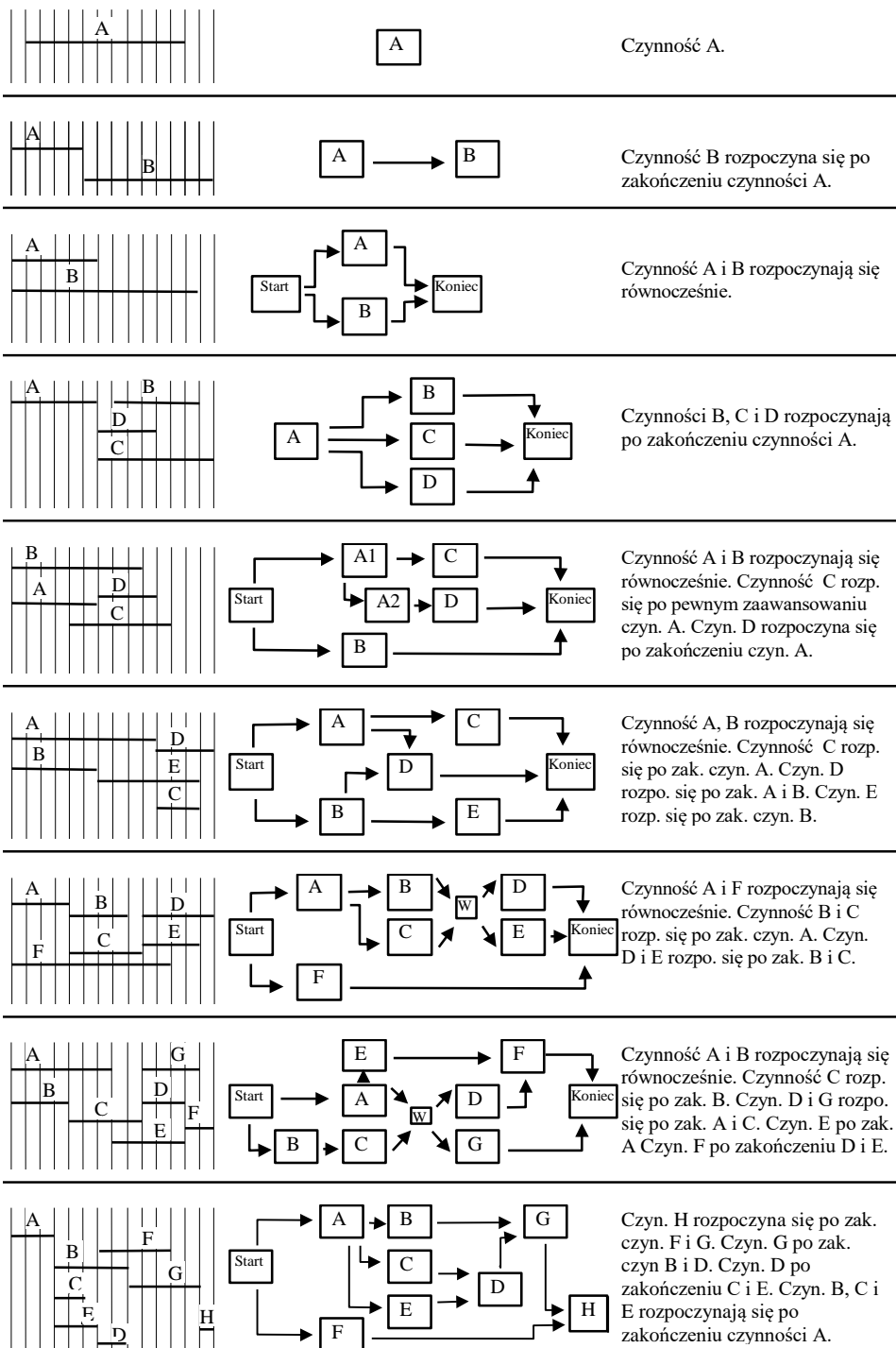
Czynność A i B rozpoczynają się równocześnie. Czynność C rozpoczyna się po zak. B. Czyn. D i G rozpoczyna się po zak. A i C. Czyn. E rozpoczyna się po zak. A. Czyn. F rozpoczyna się po zakończeniu D i E.

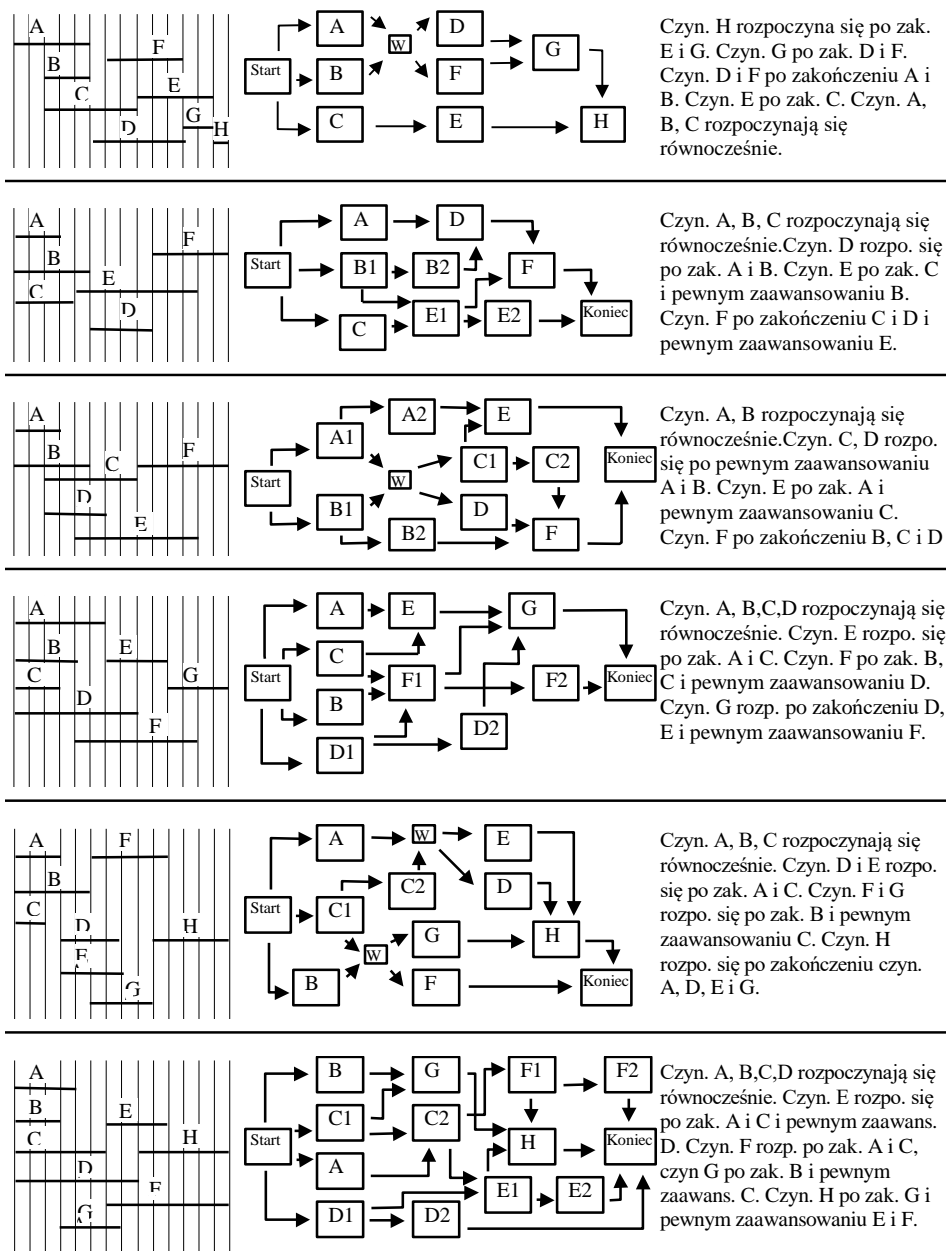


Czyn. H rozpoczyna się po zak. czyn. F i G. Czyn. G rozpoczyna się po zak. czyn B i D. Czyn. D rozpoczyna się po zakończeniu C i E. Czyn. B, C i E rozpoczynają się po zakończeniu czynności A.

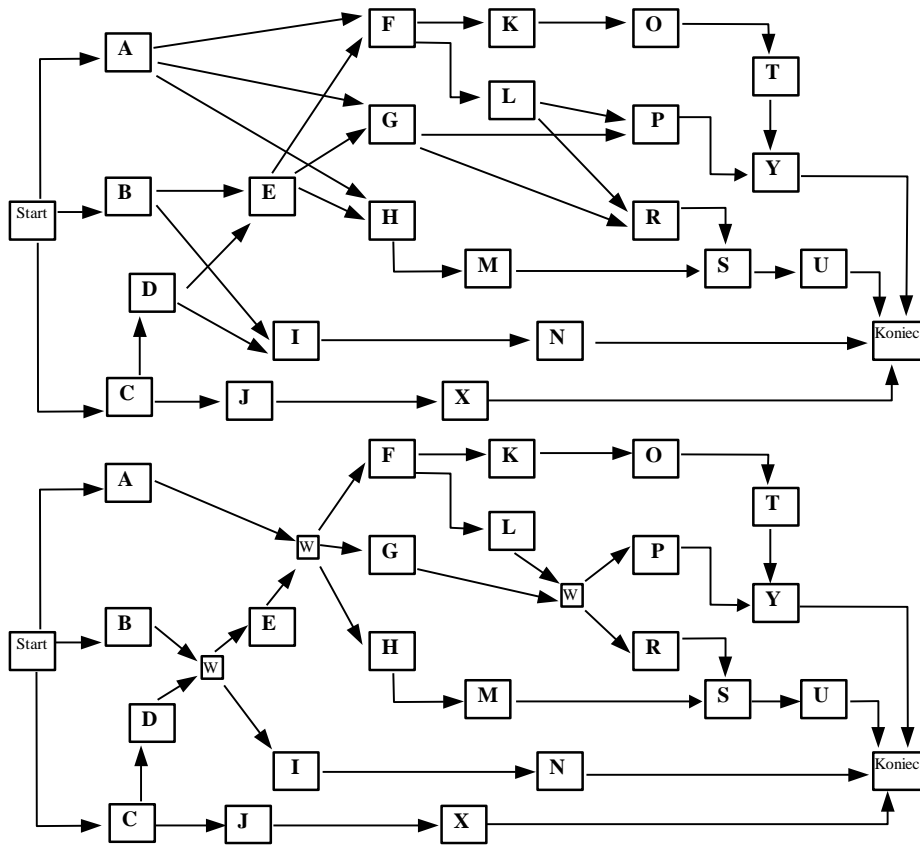
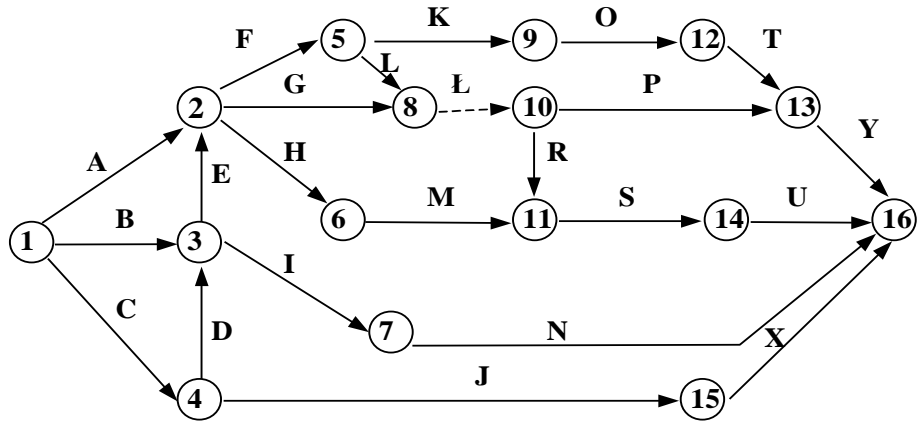


Rys. 2.4. Przykłady odwzorowań wybranych układów czynności występujących w harmonogramach liniowych i w sieciach zależności skonstruowanych wg założeń metody dwupunktowej.





Rys. 2.5. Przykłady odwzorowań wybranych układów czynności występujących w harmonogramach liniowych i w sieciach zależności skonstruowanych wg założeń metody jednopunktowej.



Rys. 2.6. Przykłady odwzorowań jednego układu czynności w sieciach zależności skonstruowanych wg założeń metody dwu i jednopunktowej.

2.2 Rodzaj informacji o czasach trwania czynności

W celu przekształcenia modelu realizacji obiektu jakim jest sieć zależności w harmonogram, planowane czynności należy zlokalizować w czasie. Z tego punktu widzenia, bardzo istotnym zagadnieniem jest problem, jakiego typu zmiennymi - odnośnie czasów trwania czynności - dysponuje się przy analizie modelu sieciowego. W badaniach operacyjnych, w ramach których opracowano metody sieciowe, zmienne, ze względu na ich stopień pewności, dzieli się na cztery grupy:

- deterministyczne - oparte na danych pewnych i wyczerpujących. Mają zastosowanie w sytuacjach, które są opisane i zmierzone w dokumentach źródłowych, ewidencyjnych, katalogach itp.,
- probabilistyczne - oparte na danych niepewnych, ale ze znanym rozkładem prawdopodobieństwa. Mają one zastosowanie tam, gdzie problemy są częściowo nowe, lecz z pewnymi analogiami do problemów już rozwiązanych,
- stochastyczne - w których dane są niepełne i niepewne i nieznanym jest ich rozkład prawdopodobieństwa,
- strategiczne - w których dane są nieokreślone.

W odniesieniu do metod sieciowych będą nas interesowały dwie pierwsze grupy, tzn. zmienne deterministyczne i probabilistyczne, a zwłaszcza te drugie. Wynika to z faktu, że roboty budowlane i melioracyjne charakteryzują się niepowtarzalnością przedsięwzięć i ciągłą zmiennością warunków wykonania. Jednak przez porównanie z innymi obiektami, realizowanymi w podobnych warunkach organizacyjno-technologicznych, będzie można ustalić czas i środki potrzebne do wykonania czynności ze znanym prawdopodobieństwem.

Można zatem stwierdzić, że wszystkie modele metod sieciowych dzielą się na dwa podstawowe *typy*: *deterministyczne* i *probabilistyczne*. W przypadku modelu deterministycznego operuje się tylko jedną oceną czasu trwania czynności, wynikającą bądź z obowiązujących norm pracochłonności, bądź z posiadanego doświadczenia. Natomiast przy modelu probabilistycznym zakłada się, że czas potrzebny na zrealizowanie określonego procesu jest zmienną losową o znanym rozkładzie prawdopodobieństwa. Rozróżnienie tych dwóch podstawowych modeli jest warunkiem koniecznym do zrozumienia dalszych rozwiązań.

2.3 Rodzaj prowadzonych analiz

Kolejnym kryterium podziału metod sieciowych jest zakres analiz, jaki przeprowadza się w trakcie obliczeń. Wyróżnia się dwie podstawowe analizy: analizę czasu i analizę środków.

Analiza modelu sieciowego w funkcji czasu jest podstawowa i musi być przeprowadzona dla każdej sieci zależności. Obliczenia sprowadzają się do określenia dla każdego zdarzenia i każdej czynności najwcześniejszych możliwych i najpóźniejszych dopuszczalnych terminów zaistnienia, a także określenie luzów czasu dla zdarzeń i zapasów czasu dla czynności. W wyniku tego określa się drogę krytyczną, tzn. ciąg czynności, który decyduje o terminie zakończenia całego przedsięwzięcia i w którym nie ma żadnych zapasów czasu.

Wykonując analizę czasu zakłada się, że środki, jakie są niezbędne do realizacji poszczególnych czynności, są nieograniczone. Oczywiście tego rodzaju założenie bardzo często jest nie do przyjęcia. Aby powiązać realizację obiektu ze środkami, jakie są faktycznie do dyspozycji, należy przeprowadzić analizę tych środków. Podstawą do jej wykonania jest analiza czasu oraz zdefiniowanie zapotrzebowania na analizowane środki poszczególnych czynności. Dzięki temu w pierwszym etapie analizy środków można przeprowadzić sumowanie zapotrzebowania na poszczególne środki przy założeniu, że poszczególne czynności będą realizowane według terminów ustalonych w analizie czasu (tzn. terminów najwcześniejszych lub najpóźniejszych). Takie rozwiązanie zastosowano między innymi w systemach Prokor i Korplan opracowanych w Polsce na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych. Umożliwiało to porównanie planowanego zapotrzebowania na poszczególne zasoby z rozkładem ich dostępności, lecz nie zapewniało faktycznej dostępności wszystkich środków w planowanych terminach wykonania czynności. W związku z tym podjęto badania nad poszukiwaniem algorytmu pozwalającego na połączenie okresu realizacji wszystkich czynności harmonogramu sieciowego z posiadanymi zasobami przy zachowaniu różnych uwarunkowań technologiczno-organizacyjnych. Opracowane algorytmy analizy środków pozwalają zdefiniować dopuszczalną dostępność poszczególnych środków w kolejnych okresach wykonywania obiektu, a następnie wykonać obliczenia, czy założone środki wystarczą do ukończenia inwestycji w określonym terminie. Dzięki przeprowadzonej optymalizacji w trakcie analizy uzyskuje się możliwie najlepsze wykorzystanie środków

produkcji w zadanych warunkach. Najczęściej efektem obliczeń z uwzględnieniem analizy środków jest:

- ustalenie terminów realizacji poszczególnych czynności bez przekroczenia poziomów dostępności środków,
- wyznaczenie sumarycznych wykresów zapotrzebowania na poszczególne rodzaje środków przez cały czas trwania wykonania obiektu,
- obliczenie terminu zakończenia realizacji całego zadania.

Należy zwrócić uwagę, że najczęściej możliwe jest zdefiniowanie kosztów użycia analizowanych środków, dzięki czemu metody sieciowe umożliwiają obliczanie, planowanie, kontrolę i minimalizację kosztów realizacji obiektu.

2.4 Rozwój metod sieciowych

Pierwszą metodą analizy sieci zależności była metoda CPM (Critical Path Method) opracowana w 1957 roku w USA. Była ona oparta na sieci definiowanej krawędziowo i dotyczyła analizy czasu w ujęciu deterministycznym. W rok później została opublikowana metoda PERT (Program Evaluation and Review Technique), która pozwala na podstawie krawędziowo definiowanej sieci przeprowadzić analizę czasu w ujęciu probabilistycznym. Na podstawie opracowanych założeń teoretycznych powstało szereg modyfikacji tych metod najczęściej związanych z konkretnym programem obliczeniowym (np. PERTICL 1900, RAMPS, PERT COST, PERT ADVANCE, TIME LINE, ARTEMIS, PROJECT itp.). Każdy z tych programów posiada własne założenia i ograniczenia dotyczące budowy sieci zależności i sposobu ich analizy (np. sposób numerowania zdarzeń, liczba zdarzeń początkowych i końcowych w sieci itp.), jednak we wszystkich tych metodach zasady analizy czasu są oparte na tych samych założeniach i wykonywane na podstawie tych samych algorytmów. Większość z nich w miarę rozwoju została rozszerzona o analizę środków.

Dalsze badania prowadzone nad strukturą sieci zależności oraz sposobami jej analizy doprowadziły do znacznego rozszerzenia definicji zdarzenia. W tradycyjnym ujęciu zakończenie wszystkich czynności dochodzących do zdarzenia umożliwiało rozpoczęcie wszystkich działań wychodzących z niego. W nowym ujęciu zaproponowanym przez Pritskera w sieciach jednopunktowych (Michnowski i in. 1985) rozdzielono wejście

do węzła od wyjścia. Wprowadzono także możliwość rozpoczynania pewnego podzbioru czynności w zależności od zakończenia tylko części z działań dochodzących do węzła, tzn. zdefiniowano węzły o charakterze probabilistycznym. Dzięki temu umożliwiono wprowadzanie do sieci ciągów wielowariantowych i alternatywnych oraz sprzężeń zwrotnych (np. powtarzanie pewnych prac ze względu na złą jakość wykonania). W metodzie GERT, w której najpełniej zastosowano opisane rozwiązania, wprowadzono dodatkowo definiowanie czasu trwania czynności na podstawie kilkunastu rozkładów prawdopodobieństwa. Tak elastyczny sposób modelowania przedsięwzięcia wyeliminował wiele z wad pierwotnej metody PERT i znacznie podniósł wiarygodność prowadzonych obliczeń. Z drugiej strony nadzwyczaj skomplikował proces zbierania danych, projektowania sieci zależności a przede wszystkim zwielokrotnił wymagania co do programów i sprzętu, na którym mogą być przeprowadzone obliczenia. Wydaje się, że w szerokiej praktyce inżynierskiej tak zaawansowane metody nie znajdują na razie zastosowań (Willis 1985). Należy jednak pamiętać, że pierwsze wdrożenia metody PERT również dotyczyły bardzo rozbudowanych projektów wojskowych, a z czasem postęp w zakresie badań operacyjnych i elektroniki pozwolił na zaadaptowanie ich do planowania i kontroli realizacji małych i średnich przedsięwzięć inżynierskich.

3 Założenia metod sieciowych

3.1 Pojęcie sieci zależności

Przedmiotem modelowania w metodach analizy sieciowej jest zawsze pewien zbiór różnorodnych, ale technologicznie i organizacyjnie związanych ze sobą czynności w celu wytworzenia jakiegoś produktu lub wykonanie jakiejś usługi. W trakcie realizacji tych czynności zużywa się siłę roboczą i środki materialne, co pociąga za sobą konieczność wydatkowania odpowiednich środków finansowych. Plan wykonania takich przedsięwzięć można przedstawić za pomocą modelu złożonego z szeregu czynności i zdarzeń. *Graficzne odwzorowanie kolejności przebiegu robót wraz z uwzględnieniem wszystkich niezbędnych zależności i ograniczeń technologicznych i organizacyjnych nazywamy siecią zależności.*

W dalszych rozważaniach w skrypcie rozpatrywane będą wyłącznie grafy sieciowe dwupunktowe. W modelach tych *zdarzenie* jest elementem sieci zależności, które określa fakt rozpoczęcia lub zakończenia czynności. Dla zaistnienia zdarzenia nie jest potrzebny czas czy też środki, jest jednak ono bardzo ważnym i koniecznym elementem sieci, gdyż poprzez zdarzenie wyraża się wszelkie zależności, a więc nadaje sens logiczny modelowi. Zdarzenie zostanie osiągnięte z chwilą zakończenia wszystkich czynności dochodzących do niego. Graficznym obrazem zdarzenia jest kółko. Zdarzenie rozpoczynające daną czynność nazywa się *zdarzeniem poprzedzającym*, zdarzenie kończące daną czynność - *zdarzeniem następującym*. Zdarzenie poprzedzające pierwszą czynność w sieci nazywa się *zdarzeniem początkowym* modelu, a zdarzenie następujące po ostatniej czynności w sieci - *zdarzeniem końcowym* modelu. Z jednego zdarzenia może wchodzić i/lub wychodzić jedna lub kilka czynności. Zdarzenie, w którym kończy się lub rozpoczyna więcej niż jedna czynność nazywa się *węzłem*.

Czynność jest elementem, do którego realizacji potrzebny jest czas, siła robocza i materiały, a więc zużycie pewnych środków. Podstawą do wyznaczenia tych wartości są obowiązujące katalogi nakładów rzeczowych, normy zakładowe oraz posiadane rozeznanie na podstawie doświadczenia przy wykonywaniu takich samych lub podobnych robót. W modelach dwupunktowych czynność łączy dwa kolejne zdarzenia w sieci. Graficznie przedstawiona jest w postaci strzałki, przy czym zwrot strzałki określa jej początek i koniec. Długość strzałki wynika wyłącznie z budowy rysunku sieci i nie odwzorowuje ilości czasu potrzebnej na wykonanie danej czynności. W zapisie i obliczeniach czynność identyfikuje się poprzez podanie numeru zdarzenia z którego wychodzi (poprzedzającego) i do którego dochodzi (następującego).

Czynnością pozorną określa się czynność, której czas trwania jest większy od zera, ale nie zużywa żadnych środków np. dojrzewanie betonu, obniżenie zwierciadła wody gruntowej siecią rowów otwartych czy zadarnieni skarp po wysiewie nasion traw. Graficznie przedstawia się ją za pomocą strzałki przerywanej.

Czynnością zerową nazywa się czynność, która nie trwa w czasie ani nie zużywa żadnych środków, a jedynie obrazuje powiązanie technologiczne i/lub organizacyjne pomiędzy czynnościami rzeczywistymi. Graficznie przedstawia się ją za pomocą strzałki przerywanej.

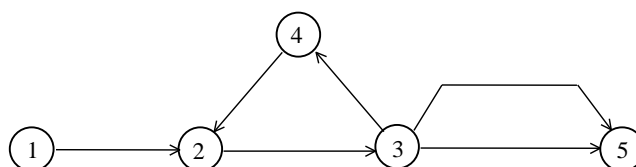
3.2 Zasady porządkowania sieci

Poprawnie zbudowana sieć zależności musi spełniać szereg wymagań. Wymagania stawiane sieciom zależności dzielą się na dwie grupy. Do pierwszej zalicza się takie, których spełnienie jest konieczne ze względu na możliwość rozwiązania zbudowanego modelu. Ponieważ harmonogramy sieciowe aktualnie obliczane są na podstawie wyspecjalizowanych programów komputerowych, każdy z nich narzuca własne ograniczenia. Jednak zdecydowana większość z nich wymaga od sieci zależności spełnienia następujących warunków:

- zdarzenia w sieci muszą być jednoznacznie oznaczone. W praktyce używa się wyłącznie nazw numerycznych, przy czym w jednej sieci każde zdarzenie powinno być oznaczone innym numerem. Kolejność numerowania ze względów formalnych jest dowolna, może natomiast

podlegać pewnym ograniczeniom określonym przez algorytm użyty w określonym programie obliczeniowym,

- w sieci nie może wystąpić pętla, tzn. że graf przedstawiający daną sieć musi być acykliczny (rys. 3.1),
- każde zdarzenie musi być powiązane czynnościami co najmniej z dwoma innymi zdarzeniami. Wyjątkiem są zdarzenia początkowe i końcowe sieci. Niektóre programy dopuszczają definiowanie kilku zdarzeń początkowych i końcowych w obrębie jednej sieci,
- w sieci każda czynność musi posiadać inną parę numerów zdarzeń poprzedzającego i następującego co oznacza, że dwa te same zdarzenia nie mogą być połączone więcej niż jedną czynnością (graf opisujący daną sieć nie może być multigrafem).



Rys. 3.1. Przykład multigrafu (dwie czynności 3 – 5) cyklicznego z cyklem przebiegającym przez zdarzenia nr 2, 3, 4

Drugą grupę warunków stanowią zasady, które mają na celu uporządkowanie sieci zależności i zapewnienie jej jak największej czytelności i komunikatywności. Trzeba podkreślić, że ten bardzo istotny czynnik w praktyce często jest lekceważony, a przecież należy pamiętać, że sieć wykonana prawidłowo pod względem formalnym, lecz trudno czytelna, przestaje spełniać swoją rolę.

A oto zasady, które zwiększają czytelność sieci:

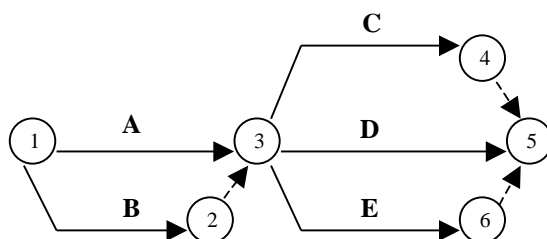
- jeśli w modelowanym przedsięwzięciu można wyróżnić etapy czy grupy robót, zdarzenia kończące i rozpoczynające czynności przynależne do danych etapów należy numerować tak, aby można było łatwo zorientować się, który etap opisują. Np. używać numeracji od 0-99 dla I etapu, od 100-199 dla drugiego etapu itp.,
- czynności należące do jednego etapu należy grupować na rysunku sieci razem i oddzielać wyraźną przerwą od innych etapów. W miarę możliwości powinno się używać różnych kolorów przy rysowaniu kolejnych etapów czy grup robót,

- do rysowania czynności należy używać tylko linii prostych, biegnących poziomo i pionowo (lub prawie pionowo) oraz unikać krzyżowania się linii,
- strzałki oznaczające początek i koniec czynności powinny być skierowane tylko w prawą stronę,
- czynności muszą być opisane nazwą, czasem ich wykonania i w przypadku wykonywania analizy środków zapotrzebowaniem na ich rodzaj i ilość,
- z sieci należy wyeliminować wszystkie zbędne czynności i zależności, pozostawiając tylko te, które są ważne z technologicznego i organizacyjnego punktu widzenia,
- rysunek sieci powinien być wykreślony tak, aby był łatwo czytelny a jednocześnie wygodny w użyciu.

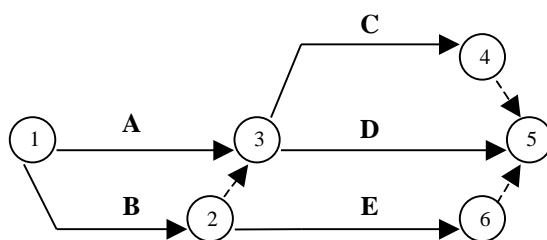
Wykonanie każdego harmonogramu sieciowego należy rozpocząć od dokładnego przeanalizowania wszystkich dostępnych dokumentów dotyczących projektowanego obiektu takich jak: projekt, kosztorys, specyfikacja oferty przetargowej, możliwości i doświadczenie przyszłego wykonawcy itp. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy przyjąć założenia technologiczne i organizacyjne dotyczące sposobu i przebiegu prac na obiekcie. Z chwilą wypracowania podstawowej koncepcji realizacji obiektu można przystąpić do sporządzenia listy czynności, które będą umieszczone w sieci zależności. Listę najwygodniej jest budować zgodnie z kolejnością występowania planowanych prac, rozpoczynając od prac podstawowych i stopniowo ją rozszerzając o prace pomocnicze, uzupełniające, dostawy niezbędnych materiałów itp. Konstruując listę czynności należy pamiętać, aby znalazły się na niej wszystkie istotne z punktu widzenia technologii i organizacji robót prace, a z drugiej strony, aby sporządzona sieć zależności obejmowała wszystkie etapy robót z podobną szczegółowością.

Mając sporządzoną listę czynności można przystąpić do budowy sieci zależności. Sieć zazwyczaj buduje się przed określeniem czasów i środków potrzebnych do zrealizowania zawartych w niej działań (w uzasadnionych przypadkach, budowę sieci zależności można poprzedzić ustaleniem czasów trwania wszystkich lub wybranych czynności). Poszczególne czynności należy tak łączyć, aby każda z nich rozpoczynała się możliwie wcześnie (jak tylko pozwolą na to warunki technologiczne) i kończyła możliwie późno, tzn. dopiero wówczas, gdy jej zakończenie limituje rozpoczęcie następnych

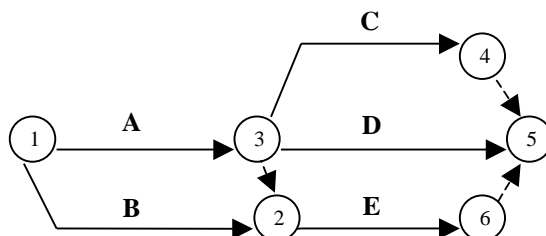
czynności. Czynności, których zakończenie nie limituje rozpoczęcie następnych prac powinny być połączone ze zdarzeniem końcowym sieci. Czynności, których pewne zaawansowanie limituje rozpoczęcie następnych prac, należy podzielić na dwie, lub więcej niezależnych czynności. Szczególną uwagę trzeba zwrócić, czy wprowadzane zależności dotyczące kolejności wykonywanych prac dotyczy tylko tych czynności, w których taka zależność rzeczywiście występuje. Należy unikać takich rozwiązań, w których wprowadzając zależność obejmuje się nią więcej czynności niż rzeczywiście potrzeba. Jeśli np. dochodząca czynność do zdarzenia limituje rozpoczęcie jednej czynności a z danego zdarzenia wychodzi ich więcej, często należy wprowadzić dodatkowe zdarzenie i/lub użyć czynności zerowych, przy czym zwrot czynności zerowych ma zasadnicze znaczenie dla zależności występujących między czynnościami (rys. 3.2 – 3.4).



Rys. 3.2. Czynności C, D, E mogą się rozpocząć po zakończeniu czynności A i B



Rys. 3.3. Czynności C, D mogą się rozpocząć po zakończeniu czynności A i B, czynność E po zakończeniu czynności B



Rys. 3.4. Czynności C, D mogą się rozpocząć po zakończeniu czynności A, czynność E po zakończeniu czynności A i B

Siec zależności rysuje się zazwyczaj kilka razy, nanosząc kolejne poprawki i zmieniając układ poszczególnych czynności aż do momentu, gdy uwzględnione zostaną wszystkie wymagane zależności pomiędzy poszczególnymi czynnościami, a schemat sieci będzie czytelny i przejrzysty. Przy dużych sieciach, liczących po kilkaset czynności, jest to proces żmudny i wymagający dużego nakładu pracy. Sporządzoną listę czynności należy traktować jako pomocniczą i w miarę potrzeby ją modyfikować, dopisując nowe czynności, rozdzielając niektóre z nich na kilka odrębnych, itp.

Trudno jest podać regułę ile czynności powinna liczyć poprawnie sporządzona sieć. Będzie to zależec od celu w jakim jest ona sporządzana (np. zarządzanie operatywne budową, analiza czasowo - kosztowa kilku różnych technologicznie wariantów robót, bilansowanie mocy przerobowych w przedsiębiorstwie), rozmiaru, rodzaju i zakresy modelowanych prac, zakresu wykonywanych analiz i wielu innych czynników. Z doświadczenia można stwierdzić, że najczęściej modele sieciowe wykonania obiektów inżynierskich liczą około 100 do 300 czynności rzeczywistych (bez zerowych), choć autor uczestniczył w opracowywaniu harmonogramów liczących ponad 1000 czynności.

4 Obliczanie modeli sieciowych w funkcji czasu

4.1 Wstęp

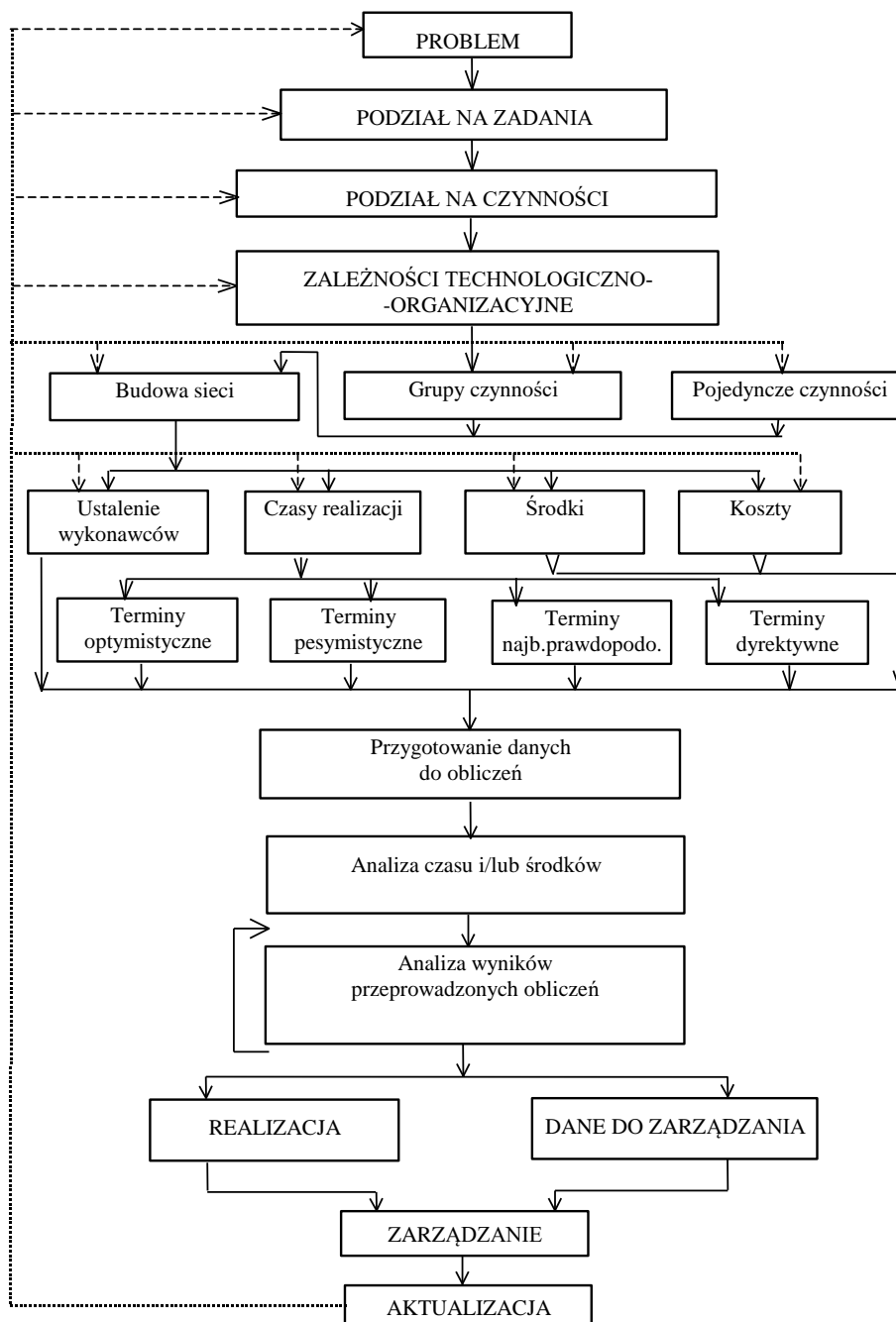
Podstawowym warunkiem przystąpienia do opracowania modelu sieciowego dowolnego przedsięwzięcia jest dobra znajomość jego technologicznej i organizacyjnej struktury. Budując sieć zależności należy pamiętać, że dotyczy ona konkretnych warunków wykonania z wszystkimi konsekwencjami przyjętego modelu technologicznego i organizacyjnego. Nie oznacza to, że nie można tworzyć kilku wariantów realizacji tego samego przedsięwzięcia. Wręcz przeciwnie, metody sieciowe stwarzają bardzo dobre warunki do szukania rozwiązań najkorzystniejszych ze względu na przyjęte kryterium (np. termin zakończenia przedsięwzięcia, koszt realizacji przedsięwzięcia itp.), lecz każdy z tych wariantów powinien stanowić zamkniętą całość, objętą jedną pełną siecią zależności.

Tok postępowania przy budowie modelu sieciowego, jego obliczaniu i analizie podany jest na rysunku 4.1.

4.2 Analiza czasu

Obliczenie modelu sieciowego w funkcji czasu sprowadza się do określenia dla każdego zdarzenia i czynności w sieci zależności najwcześniejszych możliwych i najpóźniejszych dopuszczalnych terminów zaistnienia, a także do określenia luzów i zapasów czasu. W wyniku tego wyznacza się tzw. ścieżkę krytyczną.

Poniżej podano definicje podstawowych terminów związanych z przebiegiem analizy czasu.



Rys. 4.1. Schemat blokowy postępowania przy budowie, obliczaniu i analizie modelu sieciowego

Osiągnięcie zdarzenia – jest to fakt zakończenia wszystkich czynności dochodzących do danego zdarzenia. Osiągnięcie zdarzenia umożliwia rozpoczęcie realizacji wszystkich czynności wychodzących z tego zdarzenia. Rozróżnia się dwa terminy zaistnienia zdarzenia: najwcześniejszy i najpóźniejszy,

Termin rozpoczęcia przedsięwzięcia – jest to data (lub wartość numeryczna) przyjmowana z założenia, która wyznacza termin osiągnięcia zdarzenia początkowego sieci,

Termin zakończenia przedsięwzięcia – jest to data (lub wartość numeryczna), którą wyznacza termin osiągnięcia zdarzenia końcowego sieci. Wartość ta może być ustalona w toku prowadzonych obliczeń lub narzucona jako data dyrektywna,

Najwcześniejszy termin zaistnienia i-tego zdarzenia NWZ_i - jest to najwcześniejszy moment, w którym wszystkie czynności dochodzące do zdarzenia i-tego zostały wykonane,

Najpóźniejszy termin zaistnienia i-tego zdarzenia NPZ_i - jest to najpóźniejszy moment, w którym muszą się zakończyć wszystkie czynności dochodzące do danego zdarzenia, aby ukończyć realizację całego przedsięwzięcia w możliwie najkrótszym czasie,

Najwcześniejszy początek czynności i-j NWP_{ij} - jest to najwcześniejszy moment, w którym można rozpocząć czynność i-j,

Najwcześniejszy koniec czynności i-j NWK_{ij} - jest to najwcześniejszy możliwy do osiągnięcia moment zakończenia czynności i-j,

Najpóźniejszy początek czynności i-j NPP_{ij} - jest to najpóźniejszy moment, w którym należy rozpocząć wykonanie czynności i-j, aby ukończyć realizację całego przedsięwzięcia w możliwie najkrótszym czasie,

Najpóźniejszy koniec czynności i-j NPK_{ij} - jest to moment ostateczny, w którym musi być zakończone wykonywanie danej czynności, jeżeli całe przedsięwzięcie ma być zakończone w możliwie najkrótszym czasie.

W przedsięwzięciu można odróżnić zdarzenia bardziej lub mniej krytyczne za pomocą luzów czasowych. *Luz czasu* dowolnego zdarzenia oznacza, o ile jednostek czasu może opóźnić się osiągnięcie obliczonego terminu zaistnienia zdarzenia, aby termin końcowy całego przedsięwzięcia nie został opóźniony w stosunku do obliczonego. Należy zauważyć, że zmiana luzu jednego zdarzenia w sieci pociąga za sobą zmianę luzów czasu innych zdarzeń. Luz czasu pojedynczego zdarzenia obliczany jest według wzoru:

$$L_i = NPZ_i - NWZ_i$$

gdzie:

L_i - luz czasu i – tego zdarzenia,

$NPZ_i - NWZ_i$ - różnica między najpóźniejszym dopuszczalnym i najwcześniejszym możliwym terminem zaistnienia i – tego zdarzenia.

Luz czasu wyraża określoną rezerwę czasu. Zdarzenia, których luz czasu równy jest zero, a więc nie posiadają żadnych rezerw czasowych, nazywane są *zdarzeniami krytycznymi*. Zdarzenia krytyczne muszą być osiągnięte w obliczonych terminach, jeśli całe przedsięwzięcie ma zostać ukończone w możliwie najkrótszym terminie.

Jeśli termin końcowy realizacji przedsięwzięcia zostanie przyjęty z obliczeń (a nie zostanie ustalony jako data dyrektywna), to luzy czasu wszystkich zdarzeń w sieci będą zawsze nieujemne. Natomiast jeżeli termin zakończenia jest terminem dyrektywnym, wówczas luzy czasu mogą być dodatnie, zerowe i/lub ujemne. Jeżeli występują luzy tylko dodatnie, znaczy to, że przedsięwzięcie może być ukończone przed założonym terminem dyrektywnym. Jeżeli luzy są dodatnie i zerowe, wtedy termin realizacji przedsięwzięcia obliczony przez program pokrywa się z terminem dyrektywnym. Jeżeli natomiast wystąpi chociaż jeden luz ujemny to oznacza, że przedsięwzięcie nie może być ukończone w ustalonym terminie dyrektywnym (przy danej sieci i założonych czasach trwania czynności).

W wyniku przeprowadzenia analizy czasu dla każdej czynności w sieci zostają wyznaczone dwie pary terminów rozpoczęcia i zakończenia: najwcześniejsze i najpóźniejsze. Jeżeli dla danej czynności terminy najwcześniejszego i najpóźniejszego rozpoczęcia i zakończenia są równe,

$$NWP_{ij} = NPP_{ij} \quad \text{i} \quad NWK_{ij} = NPK_{ij}$$

to dana czynność nazywana jest *czynnością krytyczną*. Jeżeli wartości te są różne to oznacza, że istnieją na tej czynności zapasy czasu (w odróżnieniu od luzów zdarzeń).

Rozróżnia się cztery *zapasy czasu* (całkowity, wolny, warunkowy, niezależny). Dla praktyki istotne znaczenie mają dwa pierwsze.

Zapas całkowity Z_{cij} czynności i - j jest różnicą między najpóźniejszym terminem zakończenia i najwcześniejszym terminem rozpoczęcia danej czynności pomniejszoną o czas jej trwania t_{ij}

$$Z_{cij} = NPK_{ij} - NWP_{ij} - t_{ij}$$

Zapas całkowity Z_{cij} czynności i-j można również obliczyć na podstawie terminów zaistnienia zdarzeń pomiędzy którymi dana czynność leży, a mianowicie

$$Z_{cij} = NPZ_j - NWZ_i - t_{ij}$$

Zapas swobodny Z_s jest różnicą między najwcześniejszym terminem zakończenia danej czynności, a najwcześniejszym terminem rozpoczęcia czynności następnej, w związku z czym może być obliczany wyłącznie na podstawie terminów zdarzeń pomiędzy którymi leży

$$Z_{sij} = NWZ_j - NWP_{ij} - t_{ij}$$

a ponieważ $NWP_{ij} = NWZ_i$ więc

$$Z_{sij} = NWZ_j - NWZ_i - t_{ij}$$

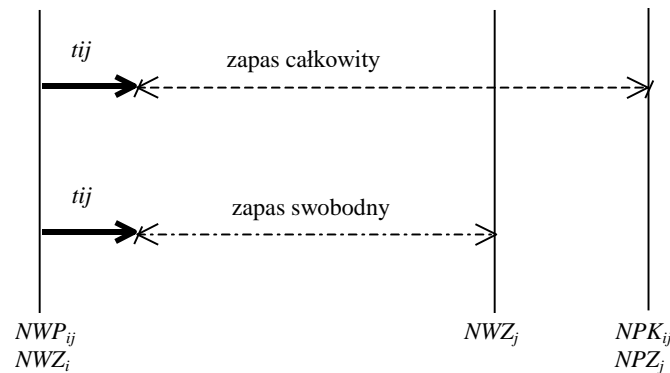
Na rysunku 4.2 podana jest geometryczna interpretacja zapasów czasu.

Zapas całkowity służy głównie do zdefiniowania ścieżki krytycznej. Jeżeli jakaś czynność nie posiada zapasu całkowitego ($Z_{cij} = 0$), tzn. $NWP_{ij} = NPP_{ij}$ i $NWK_{ij} = NPK_{ij}$, to taką czynność nazywa się czynnością krytyczną. Natomiast *nieprzerwany ciąg czynności od zdarzenia początkowego do zdarzenia końcowego sieci o zapasach całkowitych równych zero nazywa się ścieżką krytyczną*. Jeśli zapas całkowity danej czynności jest większy od zera, oznacza to, że można opóźnić jej rozpoczęcie w stosunku do obliczonego terminu najwcześniejszego rozpoczęcia (równocześnie tylko tej jednej czynności), nie powodując opóźnienia całego przedsięwzięcia. Maksymalne opóźnienie tylko tej jednej czynności nie może przekroczyć wartości zapasu całkowitego.

Interpretując wartości obliczonych całkowitych zapasów czasu należy zawsze pamiętać, że pomimo iż są one obliczane dla konkretnych czynności, to jednak *zapas całkowity czasu jest wartością wspólną dla całego ciągu czynności*, co oznacza, że gdy wykorzystamy ten zapas na jednej czynności w sieci (całkowicie lub częściowo) wówczas zmienia się wartości tego zapasu na innych czynnościach (leżących na prawo od tej czynności). Wynika stąd wniosek, że interpretując wielkości zapasu całkowitego czasu kilku czynności w sieci, można dla każdej z nich z osobna określić o ile

jednostek czasu możliwe jest jej maksymalne opóźnienie, jednak nigdy nie można łączyć tej informacji dla kilku czynności równocześnie.

Jeżeli podczas obliczeń zostanie przyjęte założenie, że termin najwcześniejszego i najpóźniejszego zakończenia przedsięwzięcia jest taki sam, to w tak obliczonej sieci zależności zawsze istnieje nieprzerwany ciąg czynności od zdarzenia początkowego do zdarzenia końcowego, posiadający zapasy całkowite równe zero. Warunek ten można traktować jako warunek poprawności obliczenia sieci. Należy zaznaczyć, że w sieci może istnieć więcej niż jedna ścieżka krytyczna, ścieżka ta może się rozwidlać, a w skrajnym przypadku nawet cała sieć może być krytyczna.



Rys. 4.2. Graficzna interpretacja zapasów czasu

Jeżeli terminem najpóźniejszego zakończenia zdarzenia końcowego sieci był terminem dyrektywnym, to również istnieje ścieżka krytyczna, jednak zmienia się jej definicja. Wówczas, pod tym pojęciem rozumiemy ciąg o najmniejszych zapasach całkowitych, przy czym nie musi to być nieprzerwany ciąg od zdarzenia początkowego do końcowego.

W związku z tym, że zapas całkowity jest wspólny dla ciągów czynności nigdy nie należy poprzestawać na obliczeniu tylko tego zapasu, gdyż może to prowadzić do błędów w interpretacji uzyskanych wyników obliczeń.

Zapas swobodny jest to ilość czasu, o którą można opóźnić każdą czynność w sieci, bez wpływu na zmianę najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia innych czynności. A więc jest to zapas przypisany konkretnej czynności i jego naruszenie nie wpływa na

wykonanie kolejnych czynności leżących w tym samym ciągu. Zapas swobodny nigdy nie jest większy od zapasu całkowitego, najczęściej stanowi jego część. Analizując układ czynności, które posiadają zapas swobodny łatwo zauważyć, że są to ostatnie czynności w ciągach, dochodzących do zdarzeń, z których wychodzi więcej niż jedna czynność.

Należy zauważyć, że zapasy czasu czynności (całkowite i swobodne) odnoszą się do najwcześniejszych terminów ich zaistnienia. Czynności wykonywane w terminach najpóźniejszych nie posiadają żadnego zapasu czasu.

Modele sieciowe w funkcji czasu można obliczać według metody deterministycznej lub probabilistycznej.

Model deterministyczny. W modelu tym czas trwania każdej czynności określa się za pomocą jednej wartości. Obliczenie przeprowadza się w dwóch kolejnych etapach.

Etap I. Ustala się dla każdej czynności sieci najwcześniejszy termin rozpoczęcia i zakończenia czynności oraz możliwe najwcześniejsze terminy zaistnienia zdarzeń. Terminy dla czynności i zdarzeń oblicza się zazwyczaj równoległe, a obliczenia prowadzi się od zdarzenia początkowego do końcowego.

Obliczenia rozpoczyna się od przyjęcia pierwszego założenia jakim jest wyznaczenie terminu rozpoczęcia realizacji całego przedsięwzięcia, tzn. przyjęcie najwcześniejszego początku (NWZ_p) dla zdarzenia początkowego. Jeżeli liczone są jedynie kolejne dni realizacji, to najczęściej $NWZ_p = 0$ (choć może to być każda inna wartość); jeżeli natomiast obliczenia prowadzone są na podstawie kalendarza, to NWZ_p zdarzenia początkowego przyjmuje postać konkretnej daty, np. 1.10.1999 r. Terminy najwcześniejszego rozpoczęcia czynności NWP_{ij} pokrywają się z terminami najwcześniejszego zaistnienia zdarzenia, z którego wychodzą, tzn.:

$$NWP_{ij} = NWZ_i$$

Termin najwcześniejszego zakończenia czynności oblicza się dodając do najwcześniejszego terminu rozpoczęcia danej czynności czas jej trwania

$$NWK_{ij} = NWP_{ij} + t_{ij}$$

Najwcześniejszy termin zaistnienia kolejnych zdarzeń równy jest maksymalnej wartości NWK z wszystkich czynności dochodzących do danego zdarzenia, tzn.

$$NWZ_j = \max[NWK_{ij}]$$

Prowadząc obliczenia od zdarzenia początkowego sieci przez kolejne czynności i zdarzenia zgodnie ze zwrotem tych czynności, osiąga się zdarzenie końcowe sieci i wyznacza najwcześniejszy termin jego zaistnienia.

Etap II. Oblicza się dla każdej czynności najpóźniejsze terminy zakończenia i rozpoczęcia czynności oraz najpóźniejsze dopuszczalne terminy zaistnienia zdarzeń. Założeniem drugiego etapu jest przyjęcie terminu najpóźniejszego zaistnienia zdarzenia końcowego w sieci.

Jeżeli nie jest to narzucony termin dyrektywny, to należy przyjąć, że termin najpóźniejszego zaistnienia tego zdarzenia równy jest jego terminowi najwcześniejszego zaistnienia ($NPZ_k = NWZ_k$). Dzięki temu założeniu otrzymuje się ciąg czynności, wyznaczający ścieżkę krytyczną.

Znając termin najpóźniejszego zaistnienia zdarzenia końcowego w sieci można przystąpić do dalszych obliczeń. Obliczenia prowadzi się od zdarzenia końcowego do zdarzenia początkowego, kierując się odwrotnym zwrotem wszystkich czynności.

Termin najpóźniejszego zakończenia każdej czynności NPK_{ij} pokrywają się z terminami najpóźniejszego zaistnienia zdarzenia, do którego dana czynność dochodzi, tzn.

$$NPK_{ij} = NPZ_j$$

Terminy najpóźniejszego rozpoczęcia czynności oblicza się, odejmując od terminu najpóźniejszego zakończenia czynności czas jej trwania, tzn.

$$NPP_{ij} = NPK_{ij} - t_{ij}$$

Najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia równy jest minimalnej wartości NPP wszystkich czynności wychodzących z danego zdarzenia, tzn.

$$NPZ_i = \min[NPP_{ij}]$$

Prowadząc obliczenia od zdarzenia końcowego sieci przez kolejne czynności i zdarzenia odwrotnie do zwrotu tych czynności, osiąga się zdarzenie początkowe sieci i wyznacza najpóźniejszy termin jego zaistnienia. Jeżeli podczas obliczeń zostało przyjęte założenie, że termin najwcześniejszego i najpóźniejszego zakończenia przedsięwzięcia jest taki

sam, to w tak obliczonej sieci zależności termin najpóźniejszego i najwcześniejszego osiągnięcia zdarzenia początkowego jest taki sam.

Po obliczeniu terminów zaistnienia czynności i zdarzeń oblicza się zapasy czasu, całkowity i swobodny. Ostatnią czynnością jest wyznaczenie ścieżki krytycznej.

Model probabilistyczny. Metoda ta opiera się na trzech ocenach czasu pojedynczej czynności, tzn. czasie pesymistycznym, optymistycznym i najbardziej prawdopodobnym. Wynika to z przyjmowanego założenia, że czas potrzebny na zrealizowanie określonego procesu jest zmienną losową o znanym rozkładzie prawdopodobieństwa, tzn. znana jest jego funkcja gęstości. Rozkładem, którym pierwotnie opisywano tę zmienną losową, jest czteroparametryczny rozkład beta (szczególnym jego przypadkiem jest rozkład normalny Gaussa) (Benjamin, Cornell 1977), jednak okazało się, że ten sposób szacowania czasu trwania czynności jest zbyt złożony. Dlatego też w praktyce przyjęto za wystarczająco dokładne szacowanie czasu trwania procesów na podstawie trzech ocen.

Do obliczeń modelu przyjmuje się tzw. wartość oczekiwaną, którą oblicza się jako średnią ważoną z trzech ocen czasu

$$T_e = \frac{w_1 T_A + w_2 T_M + w_3 T_B}{w_1 + w_2 + w_3}$$

gdzie:

- T_e - czas oczekiwany;
- T_A - czas optymistyczny;
- T_M - czas najbardziej prawdopodobny;
- T_B - czas pesymistyczny;
- w_1, w_2, w_3 - przyjęte wagi

Czas optymistyczny (T_A) jest to czas, w którym czynność przebiegałaby w najbardziej korzystnych warunkach realizacji. Jest to czas najkrótszy, nie uwzględniający żadnych strat.

Czas pesymistyczny (T_B) jest to czas trwania czynności wykonywanej w najniekorzystniejszych warunkach realizacji.

Czas najbardziej prawdopodobny (T_M) jest to czas potrzebny do wykonania danej czynności w normalnych warunkach przy założeniu przeciętnej wydajności.

Źródła, z których się korzysta w metodzie probabilistycznej przy określaniu czasu trwania czynności są takie same jak w metodzie

deterministycznej z tym, że jest tu dopuszczana pewna tolerancja wartości szacowanego parametru. Jednym z najczęściej podnoszonych zarzutów w stosunku do takiego sposobu szacowania czasów trwania czynności jest fakt, że definicje trzech przyjmowanych czasów są bardzo nieprecyzyjne i pozostawiają wiele miejsca do interpretacji np. co to znaczy realizacja czynności w najniekorzystniejszych warunkach (Połoński 1979). Nie podważając zasadności tych zarzutów należy jednak stwierdzić, że w praktyce ten sposób szacowania czasów trwania czynności się przyjął, i na ogół specjaliści znający dobrze technologie wykonywania planowanych robót nie mają większych kłopotów z interpretacją tak sformułowanych definicji czasów.

Różnice pomiędzy ocenami czasów pesymistycznym i optymistycznym określają ryzyko oceny czasu wykonania procesu. Miarą wartości tego ryzyka oszacowania czasu wykonania czynności jako zmiennej losowej jest wariancja (lub odchylenie standardowe będące pierwiastkiem kwadratowym z wariancji)

$$\sigma^2 = \left(\frac{T_B - T_A}{6} \right)^2$$

Dzięki wyznaczonym wariancjom metoda probabilistyczna pozwala również na obliczanie prawdopodobieństw dotrzymania obliczonych terminów, co było niemożliwe w metodzie deterministycznej.

4.3 Dane opcjonalne uwzględniane w analizie czasu

W dotychczas prowadzonych obliczeniach o wyniku analizy decydowały wyłącznie trzy czynniki: budowa sieci zależności, przyjęty termin rozpoczęcia robót oraz czasy trwania wszystkich czynności. W pewnych sytuacjach wymagane jest uwzględnienie dodatkowych parametrów. Najczęściej wprowadzane są dwa: *okresowe przerwy w czasie wykonywania robót oraz terminy dyrektywne określające wymagane rozpoczęcie lub zakończenie wybranych czynności i/lub zdarzeń.*

W trakcie realizacji przedsięwzięcia mogą wypadać okresy kiedy prace nie są prowadzone. Spowodowane to może być przerwami zimowymi, przerwami technologicznymi, urlopami itp. Zazwyczaj, przy deklaracji przerwy należy podać początek okresu kiedy ona wypada oraz długość jej trwania lub termin zakończenia. Liczba wprowadzanych przerw do obliczeń

jest nieograniczona, należy jedynie kontrolować czy kolejne przerwy nie nakładają się na siebie, w całości lub częściowo. Jeśli obliczenia realizowane są na komputerze, program którego używa się do obliczeń, zazwyczaj umożliwia ich wykonanie na podstawie kalendarza, w którym istnieje możliwość zadeklarowania świąt stałych, ruchomych, dni wolnych od pracy, liczby dni pracy w tygodniu, itp. W takim przypadku program zadba o uwzględnienie tych wszystkich przerw w wynikach analiz. Wykonując obliczenia ręcznie najwygodniej jest przygotować na początku dwukolumnową tabelę, w której każdemu kolejnemu dniu realizacji bez przerw odpowiada termin z wprowadzonymi wszystkimi przerwami. Pierwotne obliczenia wykonuje się bez uwzględnienia przerw, a następnie na podstawie sporządzonej tabeli zastępuje się wszystkie obliczone terminy ich odpowiednikami z uwzględnionymi przerwami.

Wykonanie obliczeń z uwzględnieniem przerw nie zmienia przebiegu ścieżki krytycznej.

Drugi rodzaj danych opcjonalnych uwzględnianych w trakcie obliczeń dotyczy terminów dyrektywnych tzn. terminów narzuconych przez obliczającego, którymi zastępowane są wskazane terminy wynikające z obliczeń. Termin dyrektywny można przypisać każdemu zdarzeniu i każdej czynności w sieci.

Rozróżnia się następujące terminy dyrektywne:

- *termin dyrektywny wczesny (TDW)* - stosowany jest zarówno do terminów najwcześniejszego osiągnięcia zdarzeń, jak i do rozpoczęcia czynności. Termin dyrektywny wczesny TDW_{ij} czynności oznacza, że nie może ona rozpocząć się wcześniej, niż podany termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najwcześniejszy termin rozpoczęcia czynności NWP_{ij} jest wcześniejszy (mniejszy) niż termin dyrektywny TDW_{ij} , przyjmuje się w dalszych obliczeniach termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najwcześniejszy termin rozpoczęcia czynności NWP_{ij} jest późniejszy (większy) niż termin dyrektywny, przyjmuje się termin wyliczony, gdyż jest spełniony warunek, że czynność nie może rozpocząć się wcześniej niż w terminie dyrektywnym.

Termin dyrektywny wczesny zdarzenia TDW_i oznacza, że zdarzenie nie może zaistnieć wcześniej niż podany termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najwcześniejszy termin zaistnienia zdarzenia NWZ_i jest wcześniejszy (mniejszy) niż wczesny termin dyrektywny TDW_i , przyjmuje się termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najwcześniejszy

termin zaistnienia zdarzenia NWZ_i jest późniejszy (większy) niż termin dyrektywny, przyjmuje się termin wyliczony.

- *termin dyrektywny późny (TDP)* - ustala się dla zakończenia czynności lub terminu najpóźniejszego osiągnięcia zdarzeń. Termin dyrektywny późny TDP_{ij} czynności oznacza, że nie może ona zakończyć się później, niż podany termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najpóźniejszy termin zakończenia czynności NPK_{ij} jest późniejszy (większy) niż termin dyrektywny TDP_{ij} , przyjmuje się w obliczeniach termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najpóźniejszy termin zakończenia czynności NPK_{ij} jest wcześniejszy (mniejszy) niż termin dyrektywny, przyjmuje się termin wyliczony, gdyż jest spełniony warunek, że czynność nie może zakończyć się później niż w narzuconym terminie dyrektywnym. Termin dyrektywny późny zdarzenia TDP_i oznacza, że zdarzenie nie może zaistnieć później niż podany termin dyrektywny. Jeżeli wyliczony najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia NPZ_i jest wcześniejszy (mniejszy) niż późny termin dyrektywny TDP_i , przyjmuje się termin obliczony. I odwrotnie, jeżeli wyliczony najpóźniejszy termin zaistnienia zdarzenia NPZ_i jest późniejszy (większy) niż termin dyrektywny, przyjmuje się termin dyrektywny.

Należy zauważyć, że terminy dyrektywne zdarzeń dotyczą wszystkich czynności związanych z danym zdarzeniem, podczas gdy termin dyrektywny czynności odnosi się tylko do niej.

Zaleca się, aby w pierwszym obliczeniu nie stosować terminów dyrektywnych, a dopiero w kolejnych, wprowadzać pojedynczo niezbędne terminy dyrektywne analizując jednocześnie ich wpływ na wyniki analizy czasu. Deklaracja terminów najwcześniejszych może nadmiernie wydłużyć czas realizacji przedsięwzięcia. Deklaracja terminów najpóźniejszych może spowodować, że zapasy czasu części czynności będą ujemne, co spowoduje brak możliwości ukończenia przedsięwzięcia w terminie obliczonym z analizy czasu. W takim przypadku należy przeanalizować zasadność ich uwzględniania w obliczeniach lub zmienić ich wartości. Wprowadzenie zbyt wielu terminów dyrektywnych do obliczeń zazwyczaj zmniejsza czytelność wyników.

Gdy w obliczeniach uwzględnia się równocześnie przerwy i terminy dyrektywne, w pierwszym rzędzie należy uwzględnić przerwy a dopiero w drugim etapie wprowadzać terminy dyrektywne. Należy również zwrócić uwagę, aby deklarowane terminy dyrektywne nie wypadały w okresie występujących przerw w trakcie robót.

Wprowadzone terminy dyrektywne mogą wpływać na przebieg ścieżki krytycznej. Jeśli trzymać się definicji, że ścieżka krytyczna to ciąg czynności bezpośrednio rzutuujący na termin zakończenia przedsięwzięcia, to w przypadku występowania terminów dyrektywnych nie musi ona być nieprzerwanym ciągiem czynności od zdarzenia początkowego do końcowego.

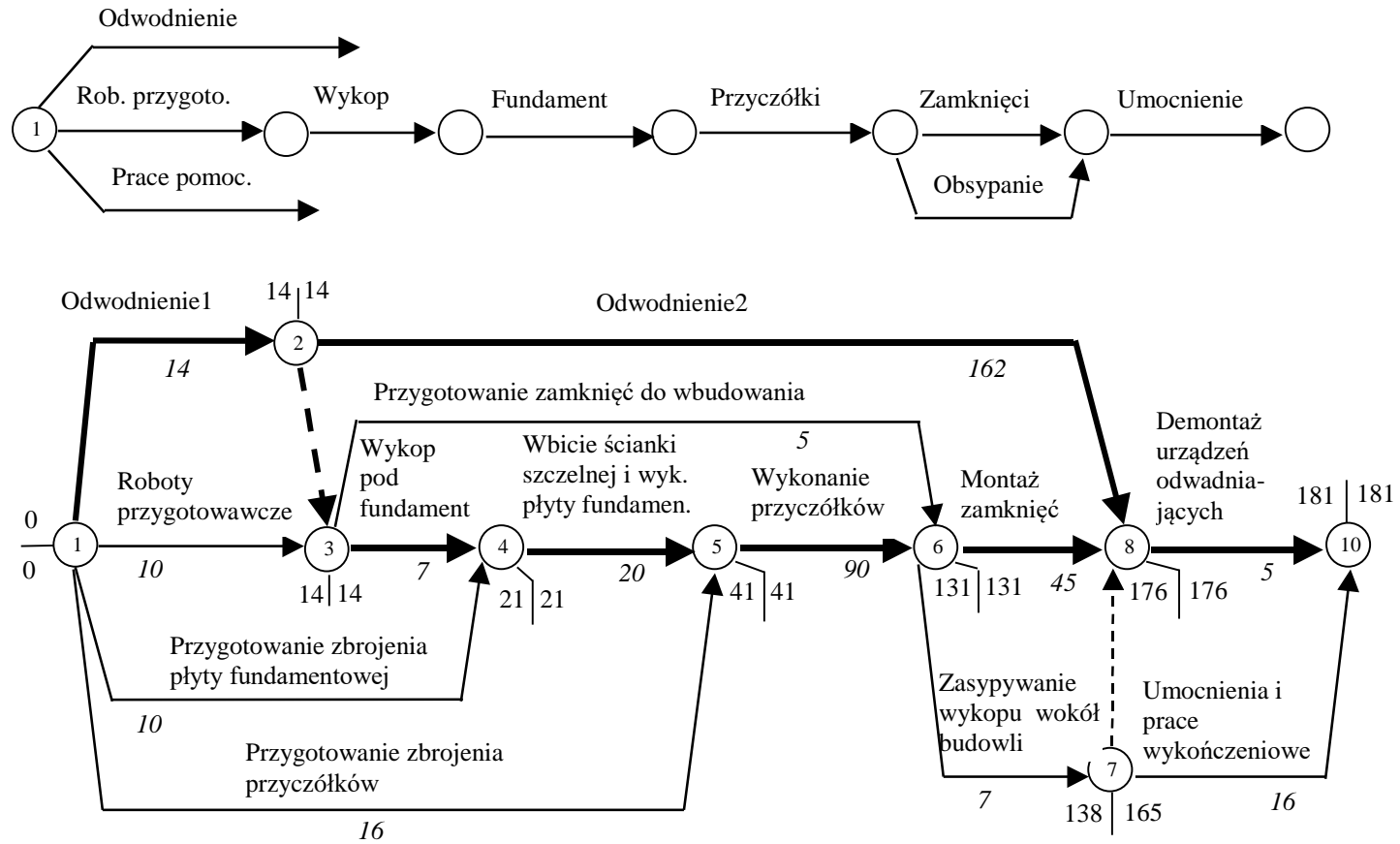
4.4 Przykład 1. Analiza czasu, metoda deterministyczna

Zadanie: Zbudować sieć zależności, obliczyć terminy czynności i zdarzeń, zapasy czasu oraz wyznaczyć ścieżkę krytyczną dla uproszczonego harmonogramu realizacji małego jazu melioracyjnego.

W przykładzie ograniczono się do wydzielenia kilku podstawowych robót, jakie występują przy wykonaniu małego jazu. W pierwszym etapie budowy sieci zależności wyróżniono następujące czynności: prace przygotowawcze i geodezyjne, zamontowanie urządzeń do odwodnienia wykopu fundamentowego, obniżenie zwierciadła wody gruntowej za pomocą pompowania, wykonanie wykopu fundamentowego, wbicie ścianki szczelnej, przygotowanie podłoża, ułożenie zbrojenia i zabetonowanie płyty fundamentowej, wykonanie przyczółków, montaż zamknięć oraz zasypywanie wnętrza budowli z zagęszczaniem gruntu, wykonanie umocnień i prac wykończeniowych.

Mając sporządzoną listę czynności przystąpiono do budowy sieci zależności. Sieć zależności budowano kilka razy, nanosząc kolejne poprawki i zmieniając układ poszczególnych czynności aż do momentu, gdy uwzględnione zostały wszystkie wymagane zależności pomiędzy przyjętymi czynnościami, a rysunek sieci stał się czytelny. Na rysunku 4.3 przedstawiono szkic sieci oraz gotową sieć zależności. Jak widać wstępna lista czynności została rozszerzona o prace związane z przygotowaniem zbrojenia oraz prace związane z odwodnieniem. Te ostatnie zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy obejmuje roboty związane ze wstępnym obniżeniem zwierciadła wody gruntowej, drugi - z ciągłym pompowaniem i utrzymaniem obniżonego poziomu wody gruntowej.

Z chwilą zbudowania sieci określono czasy wykonania poszczególnych czynności. Zgodnie z założeniami metody deterministycznej przyjęto jeden czas dla każdej czynności. Czasy, jakie przyjęto w przykładzie, są opisane pod każdą czynnością na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3. Szkic sieci zależności oraz harmonogram sieciowy realizacji małego jazu

Obliczenia terminów rozpoczyna się od przyjęcia terminu najwcześniejszego zaistnienia zdarzenia początkowego sieci, który założono $NWZ_1 = 0$. Następnie oblicza się terminy najwcześniejszego zakończenia dla czynności wychodzących ze zdarzenia początkowego, które odpowiednio wynoszą:

$$NWK_{1-2} = 0 + 14 = 14$$

$$NWK_{1-3} = 0 + 10 = 10$$

$$NWK_{1-4} = 0 + 10 = 10$$

$$NWK_{1-5} = 0 + 16 = 16$$

Dla zdarzeń, do których dochodzi tylko jedna czynność, termin najwcześniejszego zaistnienia tego zdarzenia pokrywa się z NWK czynności, która do niego dochodzi, np. dla zdarzenia nr 2; $NWZ_2 = NWK_{1-2} = 14$. Natomiast dla zdarzeń, do których dochodzi więcej niż jedna czynność, należy obliczyć NWK dla wszystkich dochodzących czynności i wybrać spośród nich wartość maksymalną, jako NWZ danego zdarzenia. Taki tok postępowania przesądza o kolejności czynności i zdarzeń, dla których obliczamy NWK i NWZ . Znając NWZ dla zdarzenia nr 2 ($NWZ_2 = 14$), można obliczyć następujące terminy czynności:

$$NWK_{2-8} = 14 + 162 = 176$$

$$NWK_{2-3} = 14 + 0 = 14$$

Aby dokonać dalszych obliczeń, konieczne jest określenie NWZ_3 . Jest on równy tej wartości NWK , która jest większa spośród ($NWK_{2-3} = 14$, $NWK_{1-3} = 10$), a więc $NWZ_3 = 14$.

Podobnie postępując ustalono kolejno:

$$NWK_{3-4} = 14 + 7 = 21; \quad NWZ_4 = \max(21, 10) = 21;$$

$$NWK_{4-5} = 21 + 20 = 41; \quad NWZ_5 = \max(41, 16) = 41;$$

$$NWK_{5-6} = 41 + 90 = 131; \quad NWK_{3-6} = 14 + 5 = 19;$$

$$NWZ_6 = \max(131, 19) = 131;$$

$$NWK_{6-8} = 131 + 45 = 176; \quad NWK_{2-8} = 14 + 162 = 176;$$

$$NWK_{6-7} = 131 + 7 = 138; \quad NWZ_7 = 138; \quad NWK_{7-8} = 138 + 0 = 138;$$

$$NWZ_8 = \max(176, 176, 138) = 176;$$

$$NWK_{8-10} = 176 + 5 = 181; \quad NWK_{7-10} = 138 + 16 = 154;$$

$$NWZ_{10} = \max(181, 154) = 181.$$

Po obliczeniu terminów najwcześniejszych można przystąpić do obliczania terminów najpóźniejszych. Obliczenia rozpoczyna się od określenia NPZ dla zdarzenia końcowego sieci, w tym przypadku przyjęto $NPZ_{10} = NWZ_{10} = 181$. Znając termin zakończenia czynności dochodzących do zdarzenia końcowego w sieci można określić ich najpóźniejsze terminy rozpoczęcia. I tak:

$$NPP_{8-10} = 181 - 5 = 176 \text{ i } NPP_{7-10} = 181 - 16 = 165$$

Dla zdarzeń, z których wychodzi tylko jedna czynność, termin najpóźniejszego zaistnienia tego zdarzenia pokrywa się z NPP czynności wychodzącej, w tym przypadku:

$$NPZ_8 = NPP_{8-10} = 176$$

Natomiast dla zdarzeń, w których rozpoczyna się więcej niż jedna czynność, należy obliczyć NPP dla wszystkich wychodzących czynności i wybrać wartość minimalną, jako NPZ danego zdarzenia.

Można kolejno obliczyć NPP dla czynności 7-8 :

$$NPP_{7-8} = 176 - 0 = 176$$

Natomiast NPZ dla zdarzenia nr 7 przybiera najmniejszą wartość z: $NPP_{7-8} = 176$ i $NPP_{7-10} = 165$, a więc $NPZ_7 = \min(176, 165) = 165$.

Kolejno obliczono:

$$NPP_{6-8} = 176 - 45 = 131; \quad NPP_{6-7} = 165 - 7 = 158; \quad NPZ_6 = \min(131, 158) = 131;$$

$$NPP_{5-6} = 131 - 90 = 41; \quad NPZ_5 = 41;$$

$$NPP_{4-5} = 41 - 20 = 21; \quad NPZ_4 = 21;$$

$$NPP_{3-4} = 21 - 7 = 14; \quad NPP_{3-6} = 131 - 5 = 126; \quad NPZ_3 = \min(14, 126) = 14;$$

$$NPP_{2-8} = 176 - 162 = 14; \quad NPP_{2-3} = 14 - 0 = 14; \quad NPZ_2 = \min(14, 14) = 14;$$

$$NPP_{1-2} = 14 - 14 = 0; \quad NPP_{1-3} = 14 - 10 = 4; \quad NPP_{1-4} = 21 - 10 = 11;$$

$$NPP_{1-5} = 41 - 16 = 25; \quad NPZ_1 = \min(0, 4, 11, 25) = 0.$$

W ten sposób obliczono terminy najpóźniejsze dla czynności i zdarzeń.

Wszystkie terminy dla zdarzeń zostały umieszczone na sieci obok zdarzeń (rys.4.3 - z lewej strony NWZ , z prawej NPZ), natomiast terminy

czynności - w tabeli 4.1. Można teraz było przystąpić do określenia zapasów czasu całkowitego i swobodnego dla czynności. Sposób obliczeń i wyniki przedstawiono w tabeli 4.1.

Na koniec na rysunku sieci zależności zaznaczono ścieżkę krytyczną tzn. te czynności, które posiadają zapas całkowity równy zero oraz sprawdzono, czy tworzą one nieprzerwany ciąg od zdarzenia początkowego do końcowego sieci. W przykładzie istnieje taki ciąg, a nawet jest rozwidlony (czynność 2 – 8). Gdyby taki ciąg nie istniał oznaczałoby to, że w obliczeniach popełniono błąd i trzeba je powtórzyć.

4.5 Przykład 2. Analiza czasu, metoda probabilistyczna

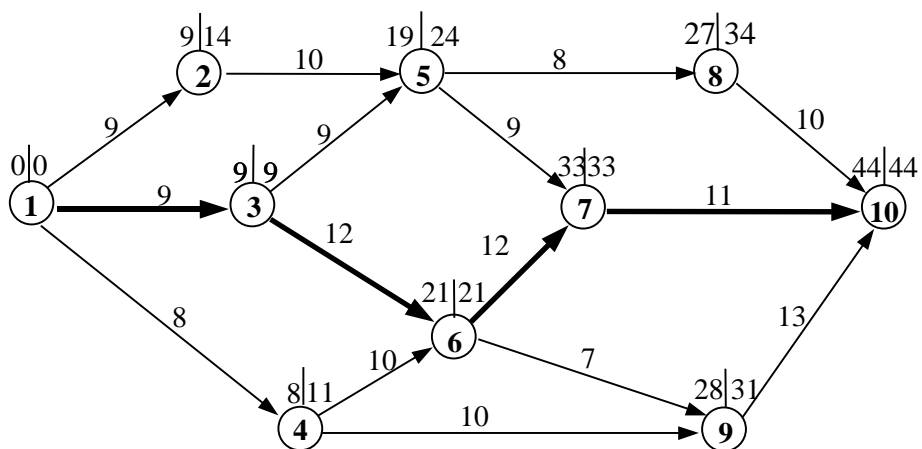
Zadanie: Dla danej sieci zależności obliczyć:

- *wartości oczekiwane czasów trwania czynności,*
- *najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy zaistnienia zdarzeń,*
- *najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy wykonania czynności,*
- *luzy czasu zdarzeń,*
- *całkowite i swobodne zapasy czasu czynności,*
- *wielkości odchyłeń standardowych (z dokładnością do trzeciego miejsca po przecinku),*
- *prawdopodobieństwo wystąpienia luzu czasu obliczonego na podstawie terminów najwcześniejszych i najpóźniejszych dla trzech dowolnych zdarzeń nie leżących na ścieżce krytycznej,*
- *prawdopodobieństwo wystąpienia luzu czasu dla tych samych trzech zdarzeń przy złożeniu opóźnienia osiągnięcia ich najwcześniejszych terminów o 25%, 50% i 75% ich luzu czasu,*
- *prawdopodobieństwo dotrzymania terminu dyrektywnego dla zdarzenia końcowego sieci skróconego o 5%, 10% i 20% w stosunku do terminu obliczonego na podstawie drogi krytycznej,*
- *terminy, w jakich należałoby ukończyć przedsięwzięcie z założonym prawdopodobieństwem ukończenia robót na poziomie 0.8, 0.9 i 0.95,*
- *prawdopodobieństwo, że poszczególne ciągi czynności staną się nową ścieżką krytyczną,*
- *niezawodność poszczególnych czynności oraz wybranych ciągów czynności (według terminów najwcześniejszych i najpóźniejszych),*
- *wzrost kosztów wykonania planowanego przedsięwzięcia przy przejściu od czasów pesymistycznych do optymistycznych.*

Tabela 4.1. Obliczenia do przykładu nr 1

LP	ZP	ZN	t	NWP	NWK	NPP	NPK	$Z_c = NPK_{ij} - NWP_{ij} - t_{ij}$	$Z_s = NWZ_j - NWP_{ij} - t_{ij}$
1	1	2	14	0	14	0	14	$14 - 0 - 14 = 0$	$14 - 0 - 14 = 0$
2	1	3	10	0	10	4	14	$14 - 0 - 10 = 4$	$14 - 0 - 10 = 4$
3	1	4	10	0	10	11	21	$21 - 0 - 10 = 11$	$21 - 0 - 10 = 11$
4	1	5	16	0	16	25	41	$41 - 0 - 16 = 31$	$41 - 0 - 16 = 31$
5	2	3	0	14	14	14	14	$14 - 14 - 0 = 0$	$14 - 14 - 0 = 0$
6	2	8	162	14	176	14	176	$176 - 14 - 162 = 0$	$176 - 14 - 162 = 0$
7	3	4	7	14	21	14	21	$21 - 14 - 7 = 0$	$21 - 14 - 7 = 0$
8	3	6	5	14	19	126	131	$131 - 14 - 5 = 112$	$131 - 14 - 5 = 112$
9	4	5	20	21	41	21	41	$41 - 21 - 20 = 0$	$41 - 21 - 20 = 0$
10	5	6	90	41	131	41	131	$131 - 41 - 90 = 0$	$131 - 41 - 90 = 0$
11	6	7	7	131	138	158	165	$165 - 131 - 7 = 27$	$138 - 131 - 7 = 0$
12	6	8	45	131	176	131	176	$176 - 131 - 45 = 0$	$176 - 131 - 45 = 0$
13	7	8	0	138	138	176	176	$176 - 138 - 0 = 38$	$176 - 138 - 0 = 38$
14	7	10	16	138	154	165	181	$181 - 138 - 16 = 27$	$181 - 138 - 16 = 27$
15	8	10	5	176	181	176	181	$181 - 176 - 5 = 0$	$181 - 176 - 5 = 0$

Na rysunku 4.4 przedstawiono sieć zależności składającą się z piętnastu czynności i odwzorowującą planowany przebieg wykonania fikcyjnego przedsięwzięcia. W tabeli 4.2 podano trzy czasy trwania poszczególnych czynności (optymistyczny, najbardziej prawdopodobny i pesymistyczny) w dniach roboczych. Na ich podstawie dla każdej czynności obliczono, jako średnią ważoną, czas oczekiwany (zaokrąglony do całych dni) oraz odchylenie standardowe i wariancje (zaokrąglone do trzech miejsc po przecinku) a następnie wyznaczono terminy najwcześniejsze i najpóźniejsze dla czynności i zdarzeń (podobnie jak w metodzie deterministycznej). W dalszej kolejności wyznaczono całkowite i swobodne zapasy czasu oraz określono przebieg ścieżki krytycznej. Obliczenie zapasu swobodnego pozwoliło na wyznaczenie wartości Z_s/σ , która jest zmienną standaryzowaną dla określenia niezawodności każdej czynności. Przy ustalaniu niezawodności czynności korzystano się z tabeli 4.3, w której zestawione są wartości dystrybuanty rozkładu normalnego. Wszystkie dotychczas omówione obliczenia zestawiono w tabeli 4.2.



Rys.4.4. Sieć zależności i terminy zdarzeń do przykładu nr 2

TABELA 4.2. Dane i obliczenia terminów czynności, zapasów i niezawodności czynności

<i>LP</i>	<i>ZP</i>	<i>ZN</i>	<i>T_A</i>	<i>T_M</i>	<i>T_B</i>	<i>T_E</i>	σ	σ^2	$\frac{Z_s}{3}$	z_{mo} σ^*	z_{mo} σ^{*2}	<i>NWP</i>	<i>NWK</i>	<i>NPP</i>	<i>NPK</i>	<i>Z_c</i>	<i>Z_s</i>	$\frac{Z_s}{\sigma}$	<i>r</i>	<i>k₁</i>	<i>k₂</i>
1	1	2	5	9	10	9	0,833	0,694	0,000	0,833	0,694	0	9	5	14	5	0	0,00	0,5	4	6
2	1	3	6	9	14	9	1,333	1,777	0,000	1,333	1,777	0	9	0	9	0	0	0,00	0,5	6	7
3	1	4	4	8	10	8	1,00	1,00	0,000	1,000	1,000	0	8	3	11	3	0	0,00	0,5	7	8
4	2	5	7	10	12	10	0,833	0,694	0,000	0,833	0,694	9	19	14	24	5	0	0,00	0,5	8	10
5	3	5	6	9	11	9	0,833	0,694	0,333	0,500	0,250	9	18	15	24	6	1	1,20	0,885	12	14
6	3	6	10	12	15	12	0,833	0,694	0,000	0,833	0,694	9	21	9	21	0	0	0,00	0,5	5	6
7	4	6	6	11	13	10	1,167	1,361	1,000	0,167	0,028	8	18	11	21	3	3	2,57	0,995	8	9
8	4	9	8	10	12	10	0,667	0,444	3,333	0,000	0,000	8	18	21	31	13	10	14,99	1,0	9	10
9	5	7	7	9	12	9	0,833	0,694	1,667	0,000	0,000	19	28	24	33	5	5	6,00	1,0	13	15
10	5	8	6	8	10	8	0,667	0,444	0,000	0,667	0,445	19	27	26	34	7	0	0,10	0,540	16	17
11	6	7	9	12	13	12	0,667	0,444	0,000	0,667	0,445	21	33	21	33	0	0	0,00	0,5	3	4
12	6	9	4	7	11	7	1,167	1,361	0,000	1,167	1,362	21	28	24	31	3	0	0,00	0,5	10	11
13	7	10	6	11	15	11	1,50	2,250	0,000	1,500	2,250	33	44	33	44	0	0	0,00	0,5	13	14
14	8	10	9	10	12	10	0,50	0,250	2,333	0,000	0,000	27	37	34	44	7	7	14,00	1,0	17	18
15	9	10	10	13	17	13	1,167	1,361	1,000	0,167	0,028	28	41	31	44	3	3	2,57	0,995	9	10

Tabela 4.3. Wartość dystrybuanty rozkładu normalnego (0,1)

X	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.500	0.504	0.508	0.512	0.516	0.520	0.524	0.528	0.532	0.536
0.1	0.540	0.544	0.548	0.552	0.556	0.560	0.564	0.567	0.571	0.575
0.2	0.579	0.583	0.587	0.591	0.595	0.599	0.603	0.606	0.610	0.614
0.3	0.618	0.622	0.626	0.629	0.633	0.637	0.641	0.644	0.648	0.652
0.4	0.655	0.659	0.663	0.666	0.670	0.674	0.677	0.681	0.684	0.688
0.5	0.691	0.695	0.698	0.702	0.705	0.709	0.712	0.716	0.719	0.722
0.6	0.726	0.729	0.732	0.736	0.739	0.742	0.745	0.749	0.752	0.755
0.7	0.758	0.761	0.764	0.767	0.770	0.773	0.776	0.779	0.782	0.785
0.8	0.788	0.791	0.794	0.797	0.800	0.802	0.805	0.808	0.811	0.813
0.9	0.816	0.819	0.821	0.824	0.826	0.829	0.831	0.834	0.836	0.839
1	0.841	0.844	0.846	0.848	0.851	0.853	0.855	0.858	0.860	0.862
1.1	0.864	0.867	0.869	0.871	0.873	0.875	0.877	0.879	0.881	0.883
1.2	0.885	0.887	0.889	0.891	0.893	0.894	0.896	0.898	0.900	0.901
1.3	0.903	0.905	0.907	0.908	0.910	0.911	0.913	0.915	0.916	0.918
1.4	0.919	0.921	0.922	0.924	0.925	0.926	0.928	0.929	0.931	0.932
1.5	0.933	0.934	0.936	0.937	0.938	0.939	0.941	0.942	0.943	0.944
1.6	0.945	0.946	0.947	0.948	0.949	0.951	0.952	0.953	0.954	0.954
1.7	0.955	0.956	0.957	0.958	0.959	0.960	0.961	0.962	0.962	0.963
1.8	0.964	0.965	0.966	0.966	0.967	0.968	0.969	0.969	0.970	0.971
1.9	0.971	0.972	0.973	0.973	0.974	0.974	0.975	0.976	0.976	0.977
2	0.977	0.978	0.978	0.979	0.979	0.980	0.980	0.981	0.981	0.982
2.1	0.982	0.983	0.983	0.983	0.984	0.984	0.985	0.985	0.985	0.986
2.2	0.986	0.986	0.987	0.987	0.987	0.988	0.988	0.988	0.989	0.989
2.3	0.989	0.990	0.990	0.990	0.990	0.991	0.991	0.991	0.991	0.992
2.4	0.992	0.992	0.992	0.992	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.994
2.5	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
2.6	0.995	0.995	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
2.7	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
2.8	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
2.9	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999
≥ 3	≅ 1.000									

Gdy $x < 0$ $F(-x) = 1 - F(x)$

Po wykonaniu podstawowych obliczeń dotyczących najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów osiągnięcia zdarzeń i czynności można przystąpić do wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia obliczonego luzu czasu dla zdarzeń przy założeniu dotrzymania wszystkich terminów ustalonych w analizie czasu. Wykonanie takich obliczeń jest możliwe dzięki potraktowaniu czasu przebiegu pojedynczej czynności jako zmiennej losowej i znajomości wariancji szacowań tych trzech ocen czasu.

Obliczenie każdego prawdopodobieństwa wykonuje się w dwóch etapach. W pierwszym oblicza się wartość tzw. zmiennej standaryzowanej. W drugim na podstawie tablic dystrybuanty rozkładu normalnego (tablica 4.3) odczytuje się poszukiwane prawdopodobieństwo (w zakresie 0 do 1), traktując wartość zmiennej standaryzowanej jako wartość zmiennej losowej, dla której odczytuje się dystrybuantę (prawdopodobieństwo).

Zmienną standaryzowaną oblicza się ze wzoru:

$$U_L = \frac{NPZ_L - NWZ_L}{\sqrt{\sum(\sigma^2)_L^W + \sum(\sigma^2)_L^P}}$$

gdzie:

$NPZ_L - NWZ_L$ - różnica terminów najpóźniejszych i najwcześniejszych w analizowanym zdarzeniu (luz czasu na zdarzeniu),

$\sqrt{\sum(\sigma^2)_L^W + \sum(\sigma^2)_L^P}$ - pierwiastek z sumy kwadratów odchyłeń standardowych (wariancji) ze ścieżki, która zdecydowała o terminach występujących na danym zdarzeniu.

Pierwszy człon sumy wariancji dotyczy ciągu czynności od zdarzenia początkowego sieci do rozpatrywanego zdarzenia a suma czasów czynności na tym ciągu powinna odpowiadać terminowi wczesnemu rozpatrywanego zdarzenia NWZ_L . Drugi człon sumy wariancji dotyczy ciągu czynności od rozpatrywanego zdarzenia do zdarzenia końcowego sieci i suma czasów czynności na tym ciągu plus termin najpóźniejszego osiągnięcia rozpatrywanego zdarzenia NPZ_L musi dać termin osiągnięcia zdarzenia końcowego sieci.

Wzór na zmienną standaryzowaną został wyprowadzony na podstawie centralnego twierdzenia granicznego, które dowodzi, że gdy zmienne losowe są niezależne i są one opisane tymi samymi lub różnymi typami rozkładów, można bezpośrednio sumować poszczególne wartości losowe

przez dodawanie ich wartości średnich oraz wariancji, a sumaryczna wartość zmiennej ma rozkład gęstości zbliżony do normalnego, nawet gdy sumuje się niewielką liczbę zmiennych losowych.

Poniżej podano sposób obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia luzu czasu dla trzech zdarzeń o numerach: 2, 4 i 5 na podstawie podanego wzoru i tabeli 4.3

Jak łatwo zauważyć, wyznaczanie prawdopodobieństwa wystąpienia luzu czasu na zdarzeniu ma sens wyłącznie dla zdarzeń nie leżących na ścieżce krytycznej, gdyż zdarzenia krytyczne w liczniku wzoru na zmienną standaryzowaną (luz czasu zdarzenia) będą posiadały zero, a więc niezależnie od wartości mianownika zmienne standaryzowane będą posiadały wartość zero a odpowiadające im prawdopodobieństwo będzie zawsze wynosić 0.5. Ta sama uwaga dotyczy zdarzeń realizowanych wg terminów najpóźniejszych, gdy wszystkie wartości luzów czasu równe są zero. A więc zamieszczone poniżej obliczenia dotyczą zdarzeń, realizowanych w terminach najwcześniejszych.

Obliczenia dla zdarzenia nr 2: $NPZ_2 = 14$; $NWZ_2 = 9$

$$\sum (\sigma^2)_2^W = \sigma_{1-2}^2 = 0,694$$

$$\sum (\sigma^2)_2^P = \sigma_{7-10}^2 + \sigma_{5-7}^2 + \sigma_{2-5}^2 = 2,25 + 0,694 + 0,694 = 3,638$$

$$U_2 = \frac{14 - 9}{\sqrt{0,694 + 3,638}} = \frac{5}{\sqrt{4,332}} = 2,402$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia zdarzenia drugiego w terminie $NWZ_2 = 9$ (a więc osiągnięcia luzu czasu na tym zdarzeniu równego 5 dni) wynosi $P_2 = 0,992$.

Obliczenia dla zdarzenia nr 4: $NPZ_4 = 11$; $NWZ_4 = 8$

$$\sum (\sigma^2)_4^W = \sigma_{1-4}^2 = 1,00$$

$$\sum (\sigma^2)_4^P = \sigma_{7-10}^2 + \sigma_{6-7}^2 + \sigma_{4-6}^2 = 2,25 + 0,444 + 1,361 = 4,055$$

$$U_4 = \frac{11 - 8}{\sqrt{1,00 + 4,055}} = \frac{3}{\sqrt{5,055}} = 1,335$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia luzu czasu na zdarzeniu nr 4 równego 3 dni wynosi $P_4 = 0,909$.

Obliczenia dla zdarzenia nr 5: $NPZ_5 = 24$; $NWZ_5 = 19$

$$\sum (\sigma^2)_5^W = \sigma_{1-2}^2 + \sigma_{2-5}^2 = 0,694 + 0,694 = 1,388$$

$$\sum (\sigma^2)_5^P = \sigma_{7-10}^2 + \sigma_{5-7}^2 = 2,25 + 0,694 = 2,944$$

$$U_5 = \frac{24 - 19}{\sqrt{1,388 + 2,944}} = \frac{5}{\sqrt{4,332}} = 2,402$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia luzu czasu na zdarzeniu nr 5 równego 5 dni wynosi $P_5 = 0,993$.

Kolejne obliczenia dotyczą również prawdopodobieństwa wystąpienia luzu czasu na zdarzeniach, jednak o zmniejszonych wartościach w stosunku do dotychczas obliczonego. Zmiana luzu czasu na zdarzeniu może nastąpić na skutek wystąpienia opóźnień przy realizacji niektórych czynności lub nałożenia terminów dyrektywnych na wybrane zdarzenia. Efektem takich zmian jest między innymi zmiana luzu czasu na zdarzeniach. Obliczenia zostały przeprowadzone dla tych samych trzech zdarzeń co poprzednio. Sprawdzono w nich jak zmieni się prawdopodobieństwo wystąpienia luzu czasu, jeśli ten luz zmniejszy o 25%, 50% i 75%.

Obliczenia przeprowadza się wg tych samych wzorów co poprzednio. Ponieważ ciągi czynności, które zadecydowały o wystąpieniu luzu czasu nie uległy zmianie, mianowniki we wzorach pozostają bez zmian, a modyfikacji ulega jedynie licznik wyrażający wartość nowego luzu czasu.

Oryginalne wartości luzu czasu dla wybranych zdarzeń wynoszą:

$$\text{dla zdarzenia 2: } L_2 = NPZ_2 - NWZ_2 = 14 - 9 = 5$$

$$\text{dla zdarzenia 5: } L_5 = NPZ_5 - NWZ_5 = 24 - 19 = 5$$

$$\text{dla zdarzenia 4: } L_4 = NPZ_4 - NPZ_4 = 11 - 8 = 3$$

Następnie oblicza się o ile zmniejszy się luz czasu na zdarzeniu przy założeniu skrócenia o 25%, 50% i 75%.

Dla luzu czasu wynoszącego 5 jednostek skrócenie wynosi odpowiednio:

$$0,25 \cdot 5 = 1,25$$

$$0,50 \cdot 5 = 2,50$$

$$0,75 \cdot 5 = 3,75$$

Dla luzu czasu wynoszącego 3 jednostki

$$0,25 \cdot 3 = 0,75$$

$$0,50 \cdot 3 = 1,50$$

$$0,75 \cdot 3 = 2,25$$

Ostatecznie oblicza się wartości zmiennych standaryzowanych wyznaczających poszukiwane prawdopodobieństwa:

Prawdopodobieństwo wystąpienia luzu czasu dla zdarzeń 2 i 5 można obliczyć wspólnie, gdyż posiadają taki sam licznik i mianownik:

$$U_{2,5 \rightarrow 25\%} = \frac{5 - 1,25}{\sqrt{4,332}} = \frac{3,75}{2,081} = 1,802$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia luzu czasu na zdarzeniu nr 2 i 5 skróconego o 25% wynosi $p = 0,964$

$$U_{2,5 \rightarrow 50\%} = \frac{5 - 2,5}{\sqrt{4,332}} = \frac{2,5}{2,081} = 1,201$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia luzu czasu na zdarzeniu nr 2 i 5 skróconego o 50% wynosi $p = 0,885$

$$U_{2,5 \rightarrow 75\%} = \frac{5 - 3,75}{\sqrt{4,332}} = \frac{1,25}{2,081} = 0,601$$

Prawdopodobieństwo osiągnięcia luzu czasu na zdarzeniu nr 2 i 5 skróconego o 75% wynosi $p = 0,726$

Prawdopodobieństwo wystąpienia skróconego luzu czasu dla zdarzenia 4 wynosi odpowiednio:

$$U_{4 \rightarrow 25\%} = \frac{3 - 0,75}{\sqrt{5,055}} = \frac{2,25}{2,248} = 1,00$$

$$p = 0,841 \text{ dla skrócenia } 25\%$$

$$U_{4 \rightarrow 50\%} = \frac{3 - 1,5}{\sqrt{5,055}} = \frac{1,5}{2,248} = 0,667$$

$p = 0,748$ dla skrócenia 50%

$$U_{4 \rightarrow 75\%} = \frac{3 - 2,25}{\sqrt{5,055}} = \frac{0,75}{2,248} = 0,333$$

$p = 0,630$ dla skrócenia 75%

Terminem, którym szczególnie jesteśmy zainteresowani przeprowadzając analizę harmonogramu sieciowego, jest termin zakończenia robót na całym obiekcie. Wyznacza go termin osiągnięcia zdarzenia końcowego sieci. W szczególności ważna jest możliwość skrócenia tego terminu. Obliczenie prawdopodobieństwa dotrzymania terminu dyrektywnego dla zdarzenia końcowego krótszego np. o 5%, 10% lub 20% od terminu ustalonego z drogi krytycznej przeprowadza się na podstawie tych samych wzorów, modyfikując jedynie wartości licznika i mianownika. Ponieważ termin zakończenia przedsięwzięcia zostaje skrócony, licznik zostaje zmniejszony o wartość całkowitego skrócenia, natomiast w mianowniku pod pierwiastkiem sumujemy wariancje z drogi krytycznej, gdyż to jest właśnie ciąg czynności, który wyznaczył termin zakończenia przedsięwzięcia. Należy zwrócić uwagę, że zmienna standaryzowana w tym przypadku będzie zawsze ujemna, co oznacza, że wyznaczone prawdopodobieństwo będzie mniejsze od 0.5.

W przykładzie obliczenia wykonuje się dla zdarzenia nr 10:

$$NPZ_{10} = NWZ_{10} = 44$$

$$U_{10} = \frac{NPZ_{10} - [NPZ_{10} + \% (NPZ_{10})]}{\sqrt{\sum (\sigma^2 \text{ ścieżka kr.})}}$$

$$\sum (\sigma^2) = 1,777 + 0,694 + 0,444 + 2,25 = 5,165$$

Zmienna standaryzowana dla terminu przedsięwzięcia krótszego o 5% wynosi:

$$\text{skrócenie: } 0,05 \cdot 44 = 2,2$$

$$U_{10} = \frac{44 - [44 + 2,2]}{\sqrt{5,165}} = \frac{-2,2}{\sqrt{5,165}} = -0,968$$

Prawdopodobieństwo dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia skróconego o 5% wynosi $p = (1 - 0,834) = 0,166$.

Zmienna standaryzowana dla terminu przedsięwzięcia krótszego o 10%

$$0,1 \cdot 44 = 4,4$$

$$U_{10} = \frac{-4,4}{\sqrt{5,165}} = -1,936$$

Prawdopodobieństwo dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia skróconego o 10% wynosi $p = (1-0,973)=0,027$.

Zmienna standaryzowana dla terminu przedsięwzięcia krótszego o 20%

$$0,2 \cdot 44 = 8,8$$

$$U_{10} = \frac{-8,8}{\sqrt{5,165}} = -3,872$$

Prawdopodobieństwo dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia skróconego o 20% wynosi $p = 0$.

W analogiczny sposób do ww. można przeprowadzić obliczenia w jakim terminie należałoby ukończyć przedsięwzięcie z założonym prawdopodobieństwem. W takim przypadku, znana jest wartość zmiennej standaryzowanej, a poszukiwany luz czasu na zdarzeniu końcowym.

I tak luz czasu o jaki należy wydłużyć przebieg robót na obiekcie przy prawdopodobieństwie dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia na poziomie równym 0.8 wynosi

$$U_{10} = 0,840 = \frac{L_{10}}{\sqrt{5,165}} \Rightarrow L_{10} = 0,840 \cdot \sqrt{5,165} = 1,909$$

a więc całość robót powinna trwać $44 + 1,909$ co w przybliżeniu daje 46 dni.

Przy prawdopodobieństwie dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia na poziomie równym 0.9 wydłużenie robót powinno wynosić

$$U_{10} = 1,280 = \frac{L_{10}}{\sqrt{5,165}} \Rightarrow L_{10} = 2,909$$

a więc całość robót powinna trwać $44 + 2,909$ co w przybliżeniu daje 47 dni.

Przy prawdopodobieństwie dotrzymania terminu zakończenia całego przedsięwzięcia na poziomie równym 0.95 wydłużenie robót powinno wynosić

$$U_{10} = 1,645 = \frac{L_{10}}{\sqrt{5,165}} \Rightarrow L_{10} = 3,739$$

a więc całość robót powinna trwać $44 + 3,739$ co w przybliżeniu daje 48 dni.

Dalszy ciąg obliczeń dotyczy sprawdzenia prawdopodobieństwa, że poszczególne drogi staną się nową ścieżką krytyczną. Może to nastąpić, gdy w trakcie wykonywania planowanych robót zaczną ulegać zmianie założone czasy trwania czynności. Niektóre z czynności będą się opóźniać, inne mogą zostać zrealizowane w szybszym terminie. Po przeprowadzonej aktualizacji może się okazać, że przewidywana ścieżka krytyczna zmieni przebieg. Ciągi, które posiadają wysokie prawdopodobieństwa stania się nowymi ścieżkami krytycznymi nazywa się ciągami podkrytycznymi i powinny w trakcie wykonywania robót podlegać szczególnej kontroli.

Celem obliczeń prowadzonych w tym punkcie jest sprawdzenie, czy założony ciąg czynności (od zdarzenia początkowego do końcowego) może w przyszłości stać się ścieżką krytyczną i jakie jest tego prawdopodobieństwo. Przy określaniu tego prawdopodobieństwa korzysta się z tego samego wzoru, przy czym w liczniku oblicza się różnicę pomiędzy sumą czasów oczekiwanych z rozpatrywanej drogi, a sumą czasów oczekiwanych na istniejącej ścieżce krytycznej. W mianowniku natomiast określa się pierwiastek z sumy kwadratów odchyłeń standardowych z rozpatrywanej drogi. Należy zwrócić uwagę, że również w tym przypadku zmienna standaryzowana będzie zawsze ujemna, a wyznaczone prawdopodobieństwo będzie mniejsze od 0.5.

W przykładzie rozpatrzono następujące ciągi czynności:

ciąg I przebiegający przez zdarzenia 1-2-5-8-10:

Suma czasów na wyznaczonym ciągu wynosi:

$$T_I = 9 + 10 + 8 + 10 = 37$$

$$U_I = \frac{37 - 44}{\sqrt{\sigma_{1-2}^2 + \sigma_{2-5}^2 + \sigma_{5-8}^2 + \sigma_{8-10}^2}} = \frac{-7}{\sqrt{0,694 + 0,694 + 0,444 + 0,25}} =$$

$$\frac{-7}{\sqrt{2,082}} = \frac{-7}{1,443} = -4,851$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-2-5-8-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0$.

ciąg II przebiegający przez zdarzenia 1-2-5-7-10

$$T_{II} = 9 + 10 + 9 + 11 = 39$$

$$U_{II} = \frac{39 - 44}{\sqrt{0,694 + 0,694 + 0,694 + 2,25}} = \frac{-5}{\sqrt{4,332}} = \frac{-5}{2,081} = -2,402$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-2-5-7-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0,008$

ciąg III przebiegający przez zdarzenia 1-3-5-8-10

$$T_{III} = 9 + 9 + 8 + 10 = 36$$

$$U_{III} = \frac{36 - 44}{\sqrt{1,777 + 0,694 + 0,444 + 0,25}} = \frac{-8}{\sqrt{3,165}} = \frac{-8}{1,779} = -4,497$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-3-5-8-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0$

ciąg IV przebiegający przez zdarzenia 1-3-5-7-10

$$T_{IV} = 9 + 9 + 9 + 11 = 38$$

$$U_{IV} = \frac{38 - 44}{\sqrt{1,777 + 0,694 + 0,694 + 2,25}} = \frac{-6}{\sqrt{5,415}} = \frac{-6}{2,327} = -2,578$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-3-5-7-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0,005$

ciąg V przebiegający przez zdarzenia 1-3-6-9-10

$$T_v = 9 + 12 + 7 + 13 = 41$$

$$U_v = \frac{41 - 44}{\sqrt{1,777 + 0,694 + 1,361 + 1,361}} = \frac{-3}{\sqrt{5,193}} = \frac{-3}{2,279} = -1,316$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-3-6-9-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0.094$

ciąg VI przebiegający przez zdarzenia 1-4-6-7-10

$$T_v = 8 + 10 + 12 + 11 = 41$$

$$U_v = \frac{41 - 44}{\sqrt{1,000 + 1,361 + 0,444 + 2,250}} = \frac{-3}{\sqrt{5,055}} = \frac{-3}{2,248} = -1,334$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-4-6-7-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0.091$

ciąg VII przebiegający przez zdarzenia 1-4-6-9-10

$$T_v = 9 + 10 + 7 + 13 = 38$$

$$U_v = \frac{38 - 44}{\sqrt{1,000 + 1,361 + 1,361 + 1,361}} = \frac{-6}{\sqrt{5,083}} = \frac{-6}{2,255} = -2,661$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-4-6-9-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0,004$

ciąg VIII przebiegający przez zdarzenia 1-4-9-10

$$T_v = 8 + 10 + 13 = 31$$

$$U_v = \frac{31 - 44}{\sqrt{1,000 + 0,444 + 1,361}} = \frac{-13}{\sqrt{2,805}} = \frac{-13}{1,675} = -7,762$$

Prawdopodobieństwo, że ciąg czynności 1-4-9-10 stanie się nową ścieżką krytyczną wynosi $p = 0$.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że największe prawdopodobieństwa stania się ciągiem podkrytycznym spośród rozpatrywanych ciągów posiadają ciągi czynności nr V (1-3-6-9-10) oraz nr VI (1-4-6-7-10).

W dotychczas przeprowadzonych obliczeniach, jako ciąg czynności decydujący o terminie zakończenia robót przyjmowano ścieżkę krytyczną. Istnieje jednak możliwość innego sposobu poszukiwania ciągu czynności, który zostanie uznany za najważniejszy z punktu widzenia terminu zakończenia prac. Obliczenia takie prowadzi się rozpatrując niezawodność

realizacji poszczególnych czynności i ich ciągów (Jaworski 1999). Jako miarę niezawodności r_{ij} czynności ij przyjęto prawdopodobieństwo, że zostanie ona ukończona w terminie, który nie spowoduje deaktualizacji programu sieciowego, natomiast niezawodność R całego programu sieciowego oznacza prawdopodobieństwo jego zrealizowania w terminie nie dłuższym od zaplanowanego. W przypadku programów sieciowych realizowanych wg najwcześniejszych terminów, terminem który jest przydzielany poszczególnym czynnościom, jest suma obliczonych terminów ich zakończenia (NWK) i swobodnego zapasu czasu. Programy sieciowe realizowane wg najpóźniejszych terminów czynności nie mają żadnych zapasów czasu, a więc nie powinny przekroczyć obliczonych terminów ich ukończenia (NPK).

Przechodząc do analizy wpływu ciągów czynności na termin zakończenia robót wyznaczany w całym harmonogramie można przyjąć, że każdy z istniejących ciągów posiada inny wpływ na ww. termin. Jeśli założyć stały poziom niezawodności jaki musi osiągnąć każdy z tych ciągów, możliwe jest policzenie o ile należy wydłużyć każdy z nich, aby założony poziom niezawodności został osiągnięty. W konsekwencji, największe znaczenie dla terminu zakończenia przedsięwzięcia (przy założonym poziomie niezawodności) będzie miał ciąg, który będzie trwał najdłużej. Ciąg taki nazywany jest ciągiem decydującym. Pozornie może się wydawać, że ciąg decydujący pokryje się z przebiegiem ścieżki krytycznej. Jednak głębsza analiza tego zagadnienia wykazała, że nie jest to regułą.

W celu wybrania ciągu decydującego należy przeanalizować zbiór wszystkich występujących w sieci zależności ciągów, przebiegających od zdarzenia początkowego do końcowego a następnie wyznaczyć czasy ich trwania przy założonym poziomie niezawodności. Ciąg o najdłuższym czasie trwania wyznaczy ciąg decydujący. Okres ΔT_l o jaki należy wydłużyć dany ciąg l , aby zapewnić jego wykonanie na określonym poziomie niezawodności, wyznacza się ze wzoru:

$$\Delta T_l = \sigma_l \cdot k$$

gdzie

σ_l – odchylenie standardowe l -tego ciągu czynności,

k – współczynnik, przez który należy przemnożyć odchylenie standardowe, w celu uzyskania wymaganej niezawodności.

Wartość współczynnika k odczytuje się z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego dla założonego poziomu prawdopodobieństwa. Natomiast odchylenie standardowe l -tego ciągu czynności σ_l wyznacza się ze wzoru

$$\sigma_l = \sqrt{\sum_{n=1}^m \sigma_{ij}^2}$$

gdzie

σ_l – odchylenie standardowe l -tego ciągu czynności,

m – liczba czynności w ciągu l ,

σ_{ij}^2 – wariancja czynności ij należącej do ciągu l .

W tabeli 4.4 zamieszczono wyniki obliczeń dla analizowanej sieci przy założeniu niezawodności zrealizowania wszystkich ciągów w zaplanowanych najpóźniejszych terminach na poziomie 0.97. Wartość współczynnika k odczytana z tablicy dystrybuanty rozkładu normalnego odpowiadająca założonemu poziomowi niezawodności wynosi 1,88. Jako termin T_l najpóźniejszego zakończenia ciągu przyjęto NPK ostatniej czynności ciągu. Jak wynika z obliczeń ciągiem decydującym w tym wypadku jest ciąg 1-3-5-7-10, pomimo, że nie jest on ścieżką krytyczną.

Tabela 4.4. Obliczenia do wyznaczenia decydującego ciągu na poziomie niezawodności 0.97 wg terminów najpóźniejszych.

Ciąg czynności	Odchylenie standardowe ciągu	Rezerwa czasu	Termin T_l ciągu wg terminów najpóźniejszych	Wymagana długość ciągu
1-2-5-8-10	1.443	2.713	44.000	46.713
1-2-5-7-10	2.081	3.912	44.000	47.912
1-3-5-8-10	1.779	3.345	44.000	47.345
1-3-5-7-10	2.327	4.375	44.000	48.375
1-3-6-7-10	2.273	4.273	44.000	48.273
1-3-6-9-10	2.279	4.285	44.000	48.285
1-4-6-7-10	2.248	4.226	44.000	48.226
1-4-6-9-10	2.255	4.239	44.000	48.239
1-4-9-10	1.675	3.149	44.000	47.149

W celu wyznaczenia decydującego ciągu przy realizacji obiektu wg terminów najwcześniejszych postępuje się podobnie, jednak należy zmodyfikować wartości odchyłeń standardowych czynności. Ponieważ w tym przypadku część czynności posiada zapasy swobodne czasu ich odchylenie standardowe zostaje zmniejszone (a więc zwiększona niezawodność ich wykonania w terminach, które nie zagrażają opóźnieniem innych czynności w harmonogramie). Wartość odchylenia standardowego tych czynności powinna ulec zmianie wg następującej formuły:

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} - \left(\frac{Zs_{ij}}{3} \right)$$

gdzie

σ_{ij}^* – zmodyfikowane odchylenie standardowe czynności ij,

σ_{ij} – odchylenie standardowe czynności ij,

Zs_{ij} – zapas swobodny czasu czynności ij.

Gdy zapas swobodny czynności ij przekracza wartość $3 \cdot \sigma_{ij}$ można nie uwzględniać jej losowego charakteru i za wartość zmodyfikowanego odchylenia standardowego σ_{ij}^* przyjąć zero.

W tabeli 4.5 zamieszczono wyniki obliczeń dla analizowanej sieci przy założeniu niezawodności zrealizowania wszystkich ciągów w zaplanowanych najwcześniejszych terminach na poziomie 0.97. Jako termin T_l najpóźniejszego zakończenia ciągu przyjęto NWK ostatniej czynności ciągu. Wartości zmodyfikowanych odchyłeń standardowych dla pojedynczych czynności podano w tabeli 4.2. Jak wynika z obliczeń ciągiem decydującym w tym wypadku jest ciąg 1-3-6-7-10, i pokrywa się ze ścieżką krytyczną.

Analiza niezawodności może również posłużyć do wyznaczenia niezawodności poszczególnych czynności. Wyznaczenie wartości zapasu swobodnego czynności pozwoliło na określenie wartości Z_s/σ tych czynności, która jest zmienną standaryzowaną dla określenia niezawodności r_{ij} każdej czynności ij (zamieszczono je w tabeli 4.2).

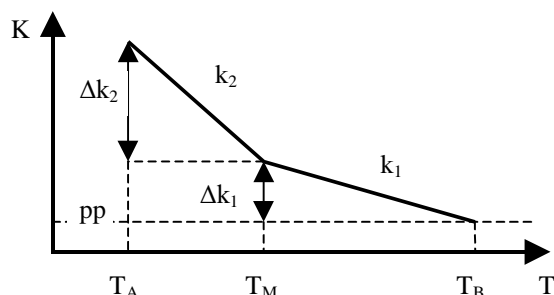
Tabela 4.5. Obliczenia do wyznaczenia decydującego ciągu na poziomie niezawodności 0.97 wg terminów najwcześniejszych.

Ciąg czynności	Odchylenie standardowe	Rezerwa czasu	Termin T_l ciągu wg terminów najwcześniejszych	Wymagana długość ciągu
1-2-5-8-10	1.354	2.546	37.000	39.546
1-2-5-7-10	1.907	3.585	44.000	47.585
1-3-5-8-10	1.572	2.955	37.000	39.955
1-3-5-7-10	2.068	3.888	44.000	47.888
1-3-6-7-10	2.273	4.273	44.000	48.273
1-3-6-9-10	1.965	3.694	41.000	44.694
1-4-6-7-10	1.929	3.627	44.000	47.627
1-4-6-9-10	1.555	2.923	41.000	43.923
1-4-9-10	1.014	1.906	41.000	42.906

Jak łatwo zauważyć, niezawodność pojedynczej czynności (a tym samym całych programów sieciowych) w dużej mierze zależy od wartości zapasu swobodnego czasu. Sposób obliczania tego zapasu powoduje, że zawsze koncentruje się on na ostatniej czynności ciągu, dochodzącego do innego ciągu czynności. W celu zwiększenia niezawodności został opracowany specjalny algorytm (Jaworski 1978), który pozwala rozdzielić zapas swobodny na wszystkie czynności danego ciągu bez zmiany struktury sieci zależności a więc bez zmiany przyjętego układu zależności technologiczno – organizacyjnych.

Ostatnim elementem przykładu jest określenie związku pomiędzy czasem trwania robót na planowanym obiekcie a kosztem jego wykonania. Związek ten określa wzrost kosztów wykonania realizacji całego przedsięwzięcia przy przejściu od czasów pesymistycznych T_B wykonania wszystkich czynności do optymistycznych T_A . Do wykonania takich obliczeń niezbędne są oprócz dotychczas dostarczonych danych jeszcze parametry wyrażające zmianę kosztu wykonania pojedynczej czynności w zależności od jej czasu, nazywane gradientami wzrostu kosztów. Związek

czasu i kosztu wykonania jednej czynności można opisać funkcją przedstawioną na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Wykres kosztów skrócenia pojedynczej czynności

Zakładając, że jest dany koszt wykonania czynności w czasie pesymistycznym (wyrażany w przykładzie jako poziom odniesienia), każde przyspieszenie realizacji tej czynności łączy się z poniesieniem dodatkowych kosztów, przy czym koszty te zazwyczaj nie rosną proporcjonalnie do skrócenia czasu, lecz są tym większe, im większe jest wymagane przyspieszenie jej wykonania. Do celów obliczeniowych funkcja opisująca ten związek została aproksymowana dwoma odcinkami prostymi, od czasu T_B do T_M oraz od T_M do T_A . Wzrost kosztów na każdym z tych odcinków opisuje gradient: k_1 i k_2 . Gradient k_1 wyznacza wzrost kosztów wykonania czynności przy przejściu z czasu pesymistycznego do najbardziej prawdopodobnego; gradient k_2 przy zmianie czasu z najbardziej prawdopodobnego do optymistycznego. Ponieważ koszty skracania czynności rosną proporcjonalnie do wielkości skrócenia musi być zachowana zależność $k_1 < k_2$ (gradienty dla poszczególnych czynności w przykładzie zostały podane w tabeli 4.2). Z przyjętych założeń wynika, że całkowite skrócenie jednej czynności kosztuje:

$$\Delta k_{ij} = (T_{B\ ij} - T_{M\ ij}) k_{1\ ij} + (T_{M\ ij} - T_{A\ ij}) k_{2\ ij} = \Delta k_1 + \Delta k_2$$

Ogólny schemat wykonania obliczeń przedstawia się następująco. Analizę należy rozpocząć od określenia najkrótszego możliwego terminu ukończenia całego przedsięwzięcia. Termin ten można obliczyć przyjmując jako czasy wykonania wszystkich czynności w sieci czasy optymistyczne. W ten sposób ustala się krańcową współrzędną wykresu obrazującego wzrost kosztów w miarę skracania cyklu realizacji przedsięwzięcia. Następnie

oblicza się najdłuższy termin ukończenia całego przedsięwzięcia przyjmując za czasy wykonania wszystkich czynności czasy pesymistyczne. Dalsze obliczenia prowadzi się w kolejnych krokach, z których każdy prowadzi do skrócenia całego przedsięwzięcia poprzez skrócenie jednej czynności leżącej na ścieżce krytycznej (lub kilku czynności równocześnie, gdy ścieżka krytyczna się rozwidła) oraz obliczenia kosztów tego skrócenia. Skróceniu podlega ta czynność, której skrócenie kosztuje najtaniej, a więc ta, której gradient wzrostu kosztów jest najmniejszy. Po skróceniu wyznaczonej czynności (lub kilku równocześnie) ponawia się obliczenia sieci zależności i wyznacza nowy przebieg ścieżki krytycznej oraz termin zakończenia całego przedsięwzięcia. Nowo wyznaczona ścieżka krytyczna może przebiegać tak samo jak w poprzednim kroku, lub przerzucić się na nowy ciąg czynności. Obliczony termin zakończenia robót na obiekcie musi w każdym kroku ulec skróceniu. Obliczenia kontynuuje się tak długo, aż termin zakończenia prac na obiekcie zostanie skrócony do terminu ustalonego na podstawie czasów optymistycznych na początku analizy. Wyniki obliczeń uzyskane w kolejnych krokach zestawia się w tabeli a po zakończeniu analizy na ich podstawie sporządza się wykres, przedstawiający związek pomiędzy całkowitym kosztem wykonania obiektu a czasem jego zakończenia.

Przedstawiony ogólny schemat obliczeń wymaga przyjęcia jeszcze jednego założenia, a mianowicie należy ustalić ile będzie wynosiło jednorazowe skrócenie czynności. Jeżeli chce się uzyskać dokładny przebieg poszukiwanego wykresu, skrócenie w każdym kroku prowadzonej analizy powinno być równe jednostce czasu, z jaką zostały określone czasy trwania czynności (najczęściej jeden dzień). Obliczenia można również prowadzić w sposób przybliżony, zakładając, że każda czynność będzie skrócona tylko dwa razy: od czasu pesymistycznego do najbardziej prawdopodobnego oraz od najbardziej prawdopodobnego do optymistycznego, niezależnie ile jednostek czasu obejmuje każde skrócenie. Taki sposób wykonania obliczeń znacznie je przyspiesza, jednak wyniki obliczeń obciążone są pewnym błędem. Pojawia się on w sytuacjach, gdy skrócenie całego przedsięwzięcia w pojedynczym kroku jest mniejsze od skrócenia czynności na ścieżce krytycznej. Sytuacja taka może wystąpić, gdy w kolejnym kroku analizy ścieżka krytyczna zmieni przebieg. Naliczony wówczas koszt skrócenia czynności będzie wyższy od rzeczywiście wymaganego do uzyskania skrócenia przedsięwzięcia. Nieuzasadniony wzrost kosztów w metodzie przybliżonej można ograniczyć, gdy najmniejszy gradient występuje na

kilku czynnościach równocześnie. W takiej sytuacji, należy skracać czynność, dla której czas o jaki skracamy Δt jest najmniejszy.

Innym sposobem podejścia jest skracanie czynności, na których jest nie najmniejszy gradient, lecz iloczyn gradientu i czasu o jaki skracamy czynność Δt . W tym przypadku, konsekwentnie przez cały czas obliczeń pod czynnościami nie należy opisywać gradientów, lecz obliczone wcześniej iloczyny gradientów i skróceń Δt . Wydaje się jednak, że jest to sposób na tyle pracochłonny, że lepiej zastosować dokładną metodę obliczeń.

Należy również zauważyć, że nie zawsze wybór czynności, które należy w danym kroku skrócić, jest oczywisty. Sytuacja taka występuje, gdy ścieżka krytyczna zaczyna się rozwidlać, przy czym im więcej jest rozwidleń, tym trudniej jest dokonać właściwego wyboru czynności do skrócenia. Należy wówczas przeanalizować możliwe warianty skróceń i wybrać ten, który jest najtańszy. Dokonując wyboru czynności podlegających skróceniu, trzeba pamiętać, że muszą one spowodować przyspieszenie realizacji całego obiektu.

Poniżej przedstawiono sposób prowadzenia obliczeń metodą uproszczoną, poszukując najmniejszych gradientów. Czasy trwania czynności (t_1 , t_2) i założone gradienty wzrostu kosztów k zamieszczono w tabeli 4.2. Na początku wyznaczono termin najszybszego możliwego ukończenia przedsięwzięcia – 31 (rys. 4.6). Następnie po podstawieniu czasów pesymistycznych wyznaczono najdłuższy czas wykonania obiektu – 57 dni (rys. 4.6). Dalsze obliczenia przedstawiono na kolejnych wykresach n rysunku 4.6 i w tabeli 4.6. W każdym kroku po określeniu ścieżki krytycznej skracano czas trwania czynności, leżącej na ścieżce krytycznej i mającej najmniejszy liczbowo gradient wzrostu kosztów. Jeśli był to k_1 , to czas pesymistyczny zastępowano czasem najbardziej prawdopodobnym; jeśli k_2 , to czas najbardziej prawdopodobny - czasem optymistycznym. Raz wykorzystany gradient nie mógł być oczywiście użyty po raz drugi. Koszt skrócenia w danym kroku obliczano mnożąc użyty gradient przez różnicę pomiędzy czasem optymistycznym, a najbardziej prawdopodobnym (dla k_2) lub czasem pesymistycznym a najbardziej prawdopodobnym (dla k_1). Następnie wyznaczano przebieg nowej ścieżki krytycznej i nowy termin zakończenia całego przedsięwzięcia przy założonym nowym czasie skracanej jednej lub kilku czynności (czasy pozostałych czynności pozostają bez zmian) i obliczenia ponawiano. W ten sposób postępowano aż do momentu, w którym termin ukończenia przedsięwzięcia pokrył się z wcześniej obliczonym najkrótszym terminem możliwym do osiągnięcia.

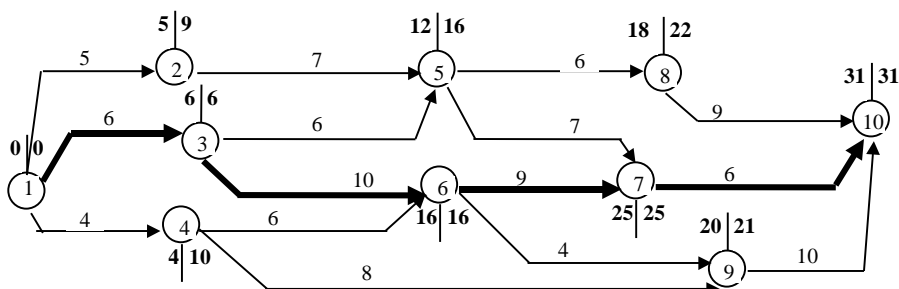
Wszystkie obliczenia zestawiono w tabeli 4.6 a na ich podstawie sporządzono wykres, obrazujący zależność pomiędzy kosztem realizacji przedsięwzięcia a długością cyklu jego realizacji (rys. 4.7).

Każda sieć zależności z rysunku 4.6. posiada obliczone terminy zdarzeń i zaznaczoną ścieżkę krytyczną. Nad każdą czynnością wpisany jest aktualny czas jej trwania. Pod czynnościami krytycznymi wypisana jest wartość aktualnego gradientu. Pozwala to na dokładne prześledzenie toku obliczeń. W przypadku gdy ścieżka krytyczna rozwidła się, niezbędne było wykonanie obliczeń pomocniczych, gdyż istnieją dwie drogi postępowania. Można skrócić jedną czynność na odcinku nie rozwidlonym lub po jednej czynności na każdym rozwidlonym ramieniu równocześnie. O wyborze właściwego wariantu decydują mniejsze sumaryczne koszty skrócenia. Za każdym razem, gdy zdarza się taka sytuacja, obok rysunku sieci zależności zamieszczone są obliczenia kosztów skrócenia dla rozważanych wariantów.

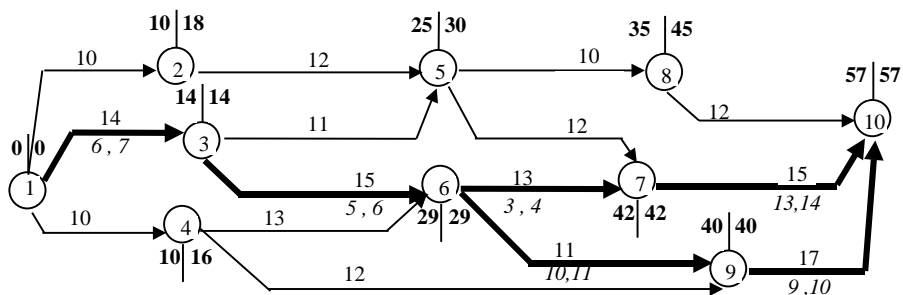
Zakładając określone efekty ekonomiczne z tytułu wcześniejszego oddania obiektu do eksploatacji (w postaci równania liniowego), można określić zysk, jaki otrzyma się z tytułu przyspieszenia realizacji w poszczególnych okresach czasu od terminu najdłuższego do najszybszego. Maksimum zysku określa optymalny termin realizacji obiektu.

Przyjmując, że wcześniejsze oddanie do eksploatacji obiektu przynosi 25 jednostek dochodu każdego dnia, wyznaczono optymalny termin realizacji obiektu (rys. 4.7, tabela 4.6). Wynosi on 44 jednostki czasu. Wymaga to 168 jednostek dodatkowego nakładu, przynosi dochód 325 jednostek, co określa zysk z przyspieszenia realizacji $325 - 168 = 157$ jednostki. Terminy poszczególnych zdarzeń przy terminie końcowym przedsięwzięcia równym 44 obliczone są na rysunku 4.6 w kroku nr 8.

W celu porównania wyników obliczeń uzyskanych metodą uproszczoną i dokładną w tabeli 4.7 i na rysunku 4.8 zestawiono wyniki obliczeń przeprowadzone tą drugą metodą. Każdy kolejny krok obliczeń zakłada skrócenie dokładnie o jeden dzień. Jak wynika z tych obliczeń optymalny termin realizacji obiektu wynosi 39 dni a maksymalny zysk z przyspieszenia realizacji 178 jednostek.



Obliczenie najkrótszego możliwego czasu trwania przedsięwzięcia na podstawie czasów optymistycznych

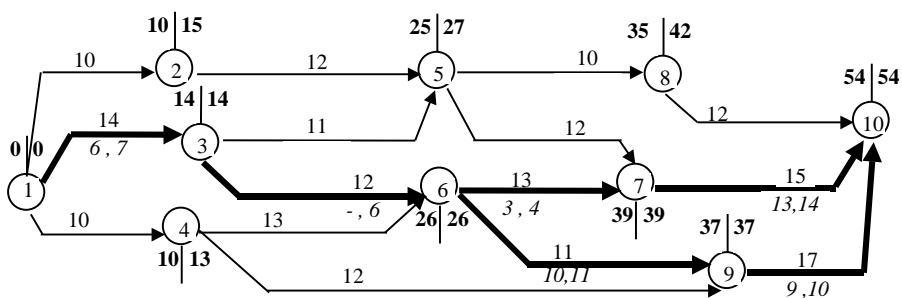


Obliczenie najdłuższego możliwego czasu trwania przedsięwzięcia na podstawie czasów pesymistycznych

Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{3-6} = 5(15-12)=15$;

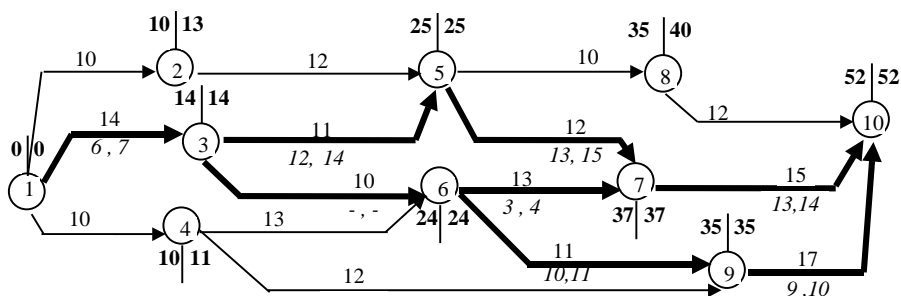
II/ $\Delta k_{9-10} + \Delta k_{6-7} = 9(17-13) + 3(13-12)=39$

Krok 1. Skrócono czynność 3-6 z 15 do 12 kosztem 15



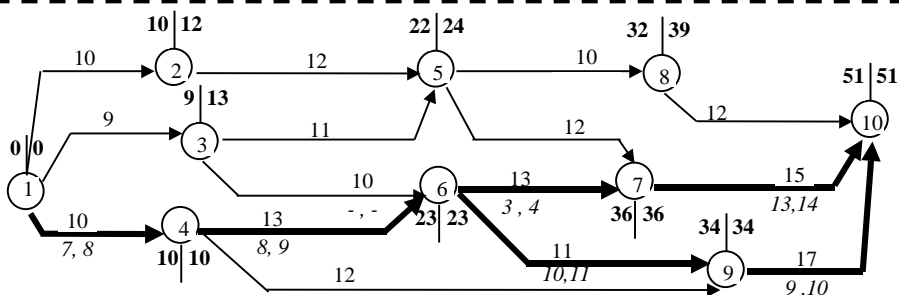
Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{3-6} = 6(12-10)=12$;

II/ $\Delta k_{9-10} + \Delta k_{6-7} = 9(17-13) + 3(13-12)=39$

Krok 2. Skrócono czynność 3-6 z 12 do 10 kosztem 12

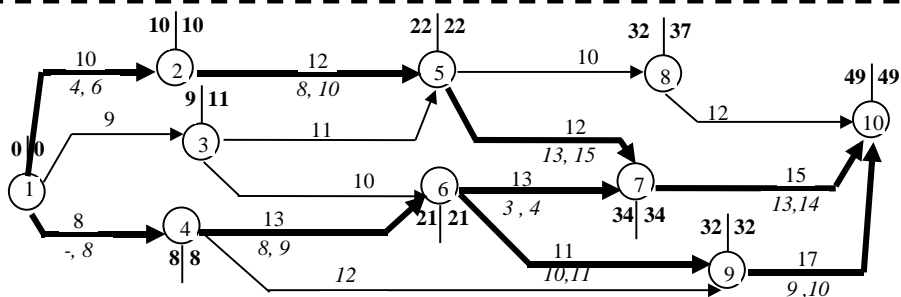
Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{1-3} = 6(14-9)=30$;

II/ $\Delta k_{7-10} + \Delta k_{9-10} = 13(15-11) + 9(17-13)=88$

Krok 3. Skrócono czynność 1-3 z 14 do 9 kosztem 30

Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{1-4} = 7(10-8)=14$;

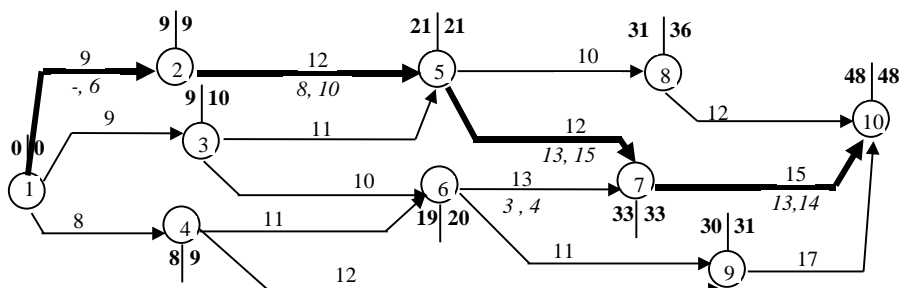
II/ $\Delta k_{6-7} + \Delta k_{9-10} = 3(13-12) + 9(17-13)=39$

Krok 4. Skrócono czynność 1-4 z 10 do 8 kosztem 14

Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{7-10} + \Delta k_{9-10} = 13(15-11) + 9(17-13)=88$

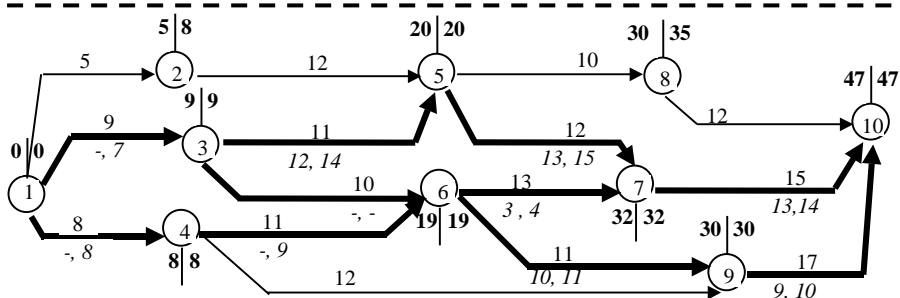
II/ $\Delta k_{1-2} + \Delta k_{4-6} = 4(10-9) + 8(13-11)=20$

Krok 5. Skrócono czynności 1-2 z 10 do 9 kosztem 4 i czynności 4-6 z 13 do 11 kosztem 16



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{1-2} = 6(9-5) = 24$

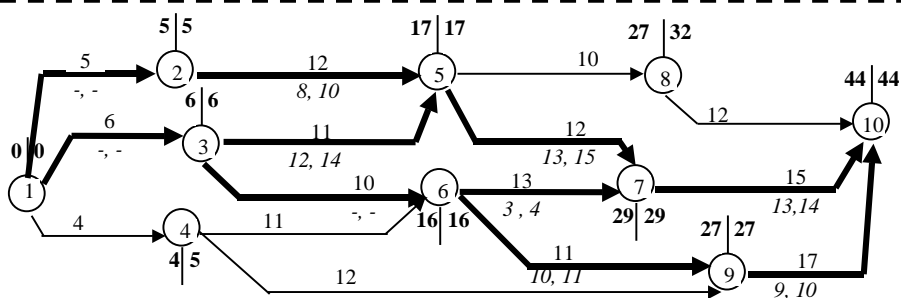
Krok 6. Skrócono czynności 1-2 z 9 do 5 kosztem 24



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{1-3} + \Delta k_{1-4} = 7(9-6) + 8(8-4) = 53$

II/ $\Delta k_{7-10} + \Delta k_{9-10} = 13(15-11) + 9(17-13) = 88$

Krok 7. Skrócono czynności: 1-3 z 9 do 6 kosztem 21 i 1-4 z 8 do 4 kosztem 32

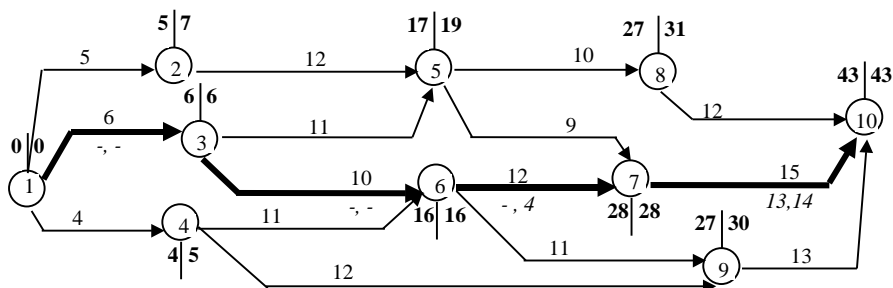


Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{7-10} + \Delta k_{9-10} = 13(15-11) + 9(17-13) = 88$

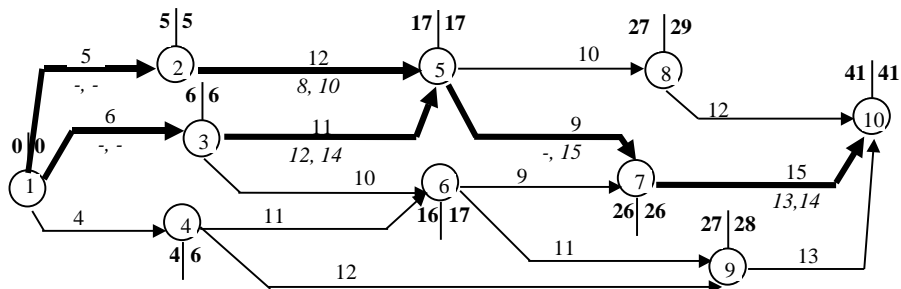
II/ $\Delta k_{5-7} + \Delta k_{6-7} + \Delta k_{9-10} = 13(12-9) + 3(13-12) + 9(17-13) = 78$

III/ $\Delta k_{2-5} + \Delta k_{3-5} + \Delta k_{6-7} + \Delta k_{9-10} = 8(12-10) + 12(11-9) + 3(13-12) + 9(17-13) = 79$

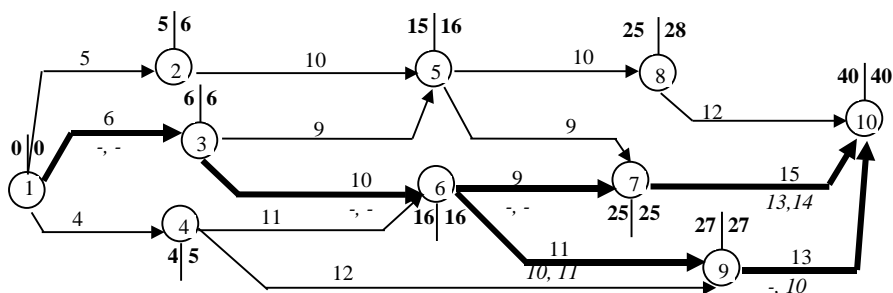
Krok 8. Skrócono czynności 5-7 z 12 do 9 kosztem 39 i czynności 6-7 z 13 do 12 kosztem 3 i czynności 9-10 z 17 do 13 kosztem 36



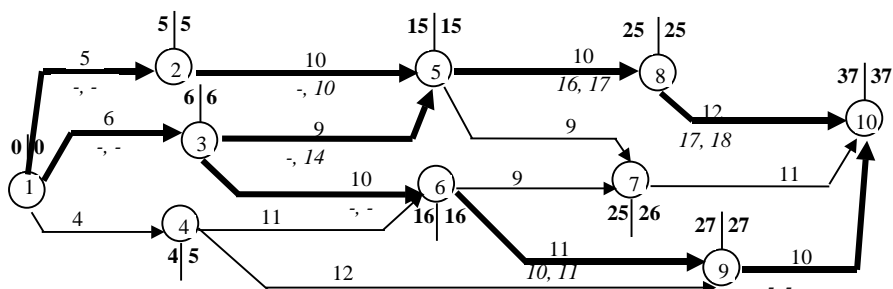
Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{6-7} = 4(12-9) = 12$
Krok 9. Skrócono czynności 6-7 z 12 do 9 kosztem 12



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{2-5} + \Delta k_{3-5} = 8(12-10) + 12(11-9) = 40$
 II/ $\Delta k_{7-10} = 13(15-11) = 52$
Krok 10. Skrócono czynności 2-5 z 12 do 10 kosztem 16 i 3-5 z 11 do 9 kosztem 24



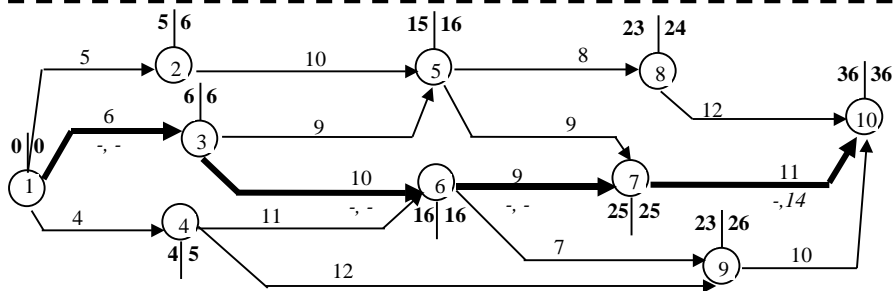
Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{7-10} + \Delta k_{9-10} = 13(15-11) + 10(13-10) = 82$
Krok 11. Skrócono czynności 7-10 z 15 do 11 kosztem 52 i czynności 9-10 z 13 do 10 kosztem 30



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{5-8} + \Delta k_{6-9} = 16(10-8) + 10(11-7) = 72$

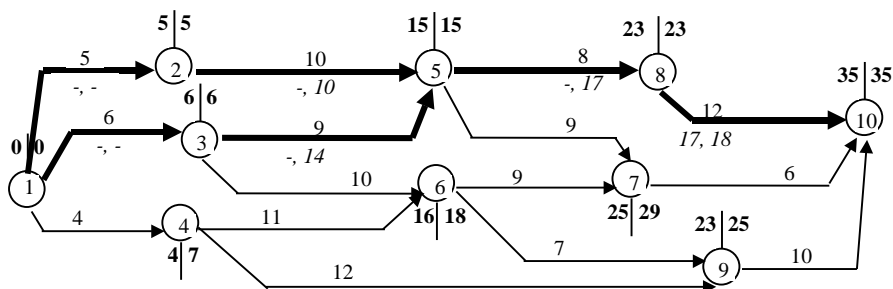
II/ $\Delta k_{2-5} + \Delta k_{3-5} + \Delta k_{6-9} = 10(10-7) + 14(9-6) + 10(11-7) = 112$

Krok 12. Skrócono czynności 5-8 z 10 do 8 kosztem 32 i czynności 6-9 z 11 do 7 kosztem 40



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{7-10} = 14(11-6) = 70$

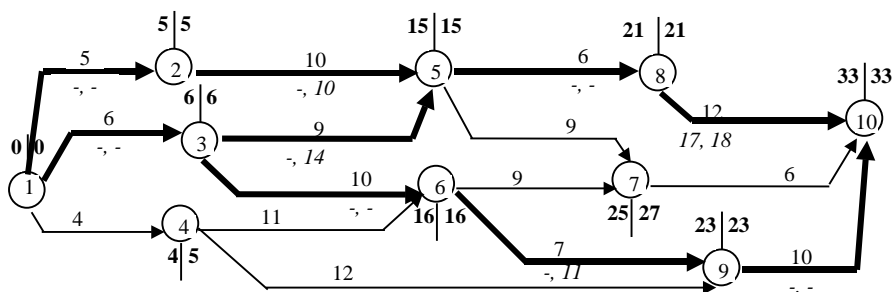
Krok 13. Skrócono czynności 7-10 z 11 do 6 kosztem 70



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{2-5} + \Delta k_{3-5} = 10(10-7) + 14(9-6) = 72$

II/ $\Delta k_{5-8} = 17(8-6) = 34$

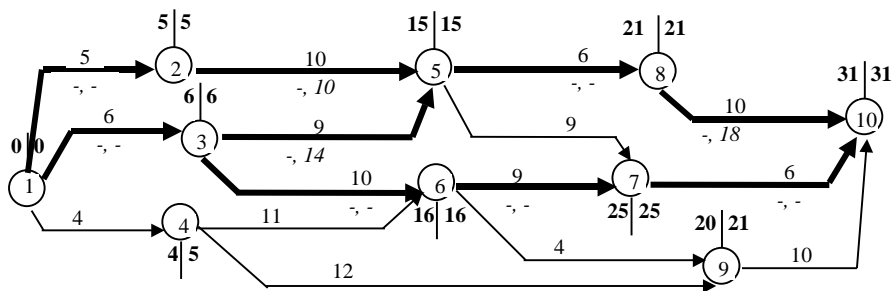
Krok 14. Skrócono czynności 5-8 z 8 do 6 kosztem 34



Warianty skróceń: I/ $\Delta k_{8-10} + \Delta k_{6-9} = 17(12-10) + 11(7-4) = 67$

II/ $\Delta k_{2-5} + \Delta k_{3-5} + \Delta k_{6-9} = 10(10-7) + 14(9-6) + 11(7-4) = 105$

Krok 15. Skrócono czynności 8-10 z 12 do 10 kosztem 34 i czynności 6-9 z 7 do 4 kosztem 33

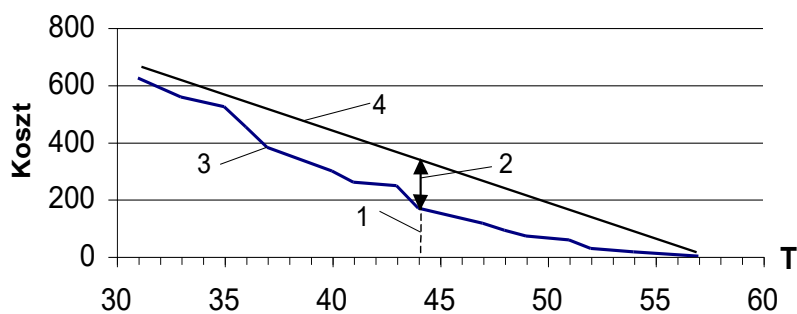


Po piętnastym skróceniu czynności osiągnięto najkrótszy możliwy termin realizacji przedsięwzięcia.

Rys. 4.6. Wyniki obliczeń analizy kosztów metodą uproszczoną

TABELA 4.6. Wyniki obliczeń analizy kosztów metodą uproszczoną

L p.	Nr czyn.	t_1	t_2	Δt	k	$\Delta k = k \cdot \Delta t$	T	Koszt $K \sum(k \cdot \Delta t)$	Skrócenie przedsięwzięcia	Zysk ze skrócenia	Zysk – koszt
							57	0	0	0	0
1	3-6	15	12	3	5	15	54	15	3	75	60
2	3-6	12	10	2	6	12	52	27	5	125	98
3	1-3	14	9	5	6	30	51	57	6	150	93
4	1-4	10	8	2	7	14	49	71	8	200	129
5	1-2	10	9	1	4	4	48	91	9	225	134
6	4-6	13	11	2	8	16	47	115	10	250	135
7	1-2	9	5	4	6	24	44	168	13	325	157
	1-4	8	4	4	8	32					
8	5-7	12	9	3	13	39					
	6-7	13	12	1	3	3					
	9-10	17	13	4	9	36	43	246	14	350	104
9	6-7	12	9	3	4	12	41	258	16	400	142
10	2-5	12	10	2	8	16					
	3-5	11	9	2	12	24	40	298	17	425	127
11	7-10	15	11	4	13	52					
	9-10	13	10	3	10	30	37	380	20	500	120
12	5-8	10	8	2	16	32					
	6-9	11	7	4	10	40	36	452	21	525	73
13	7-10	11	6	5	14	70	35	522	22	550	28
14	5-8	8	6	2	17	34	33	556	24	600	44
15	8-10	12	10	2	17	34					
	6-9	7	4	3	11	33	31	623	26	650	27

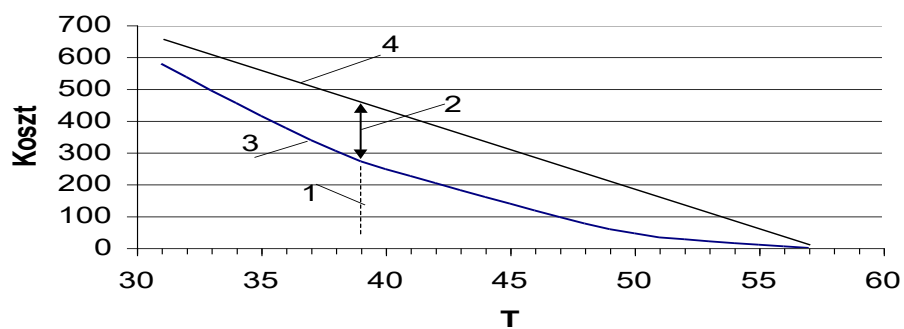


Rys. 4.7. Wykres kosztów wykonania przedsięwzięcia przy przejściu od czasów pesymistycznych do optymistycznych uzyskany metodą uproszczoną: 1 – optymalny termin realizacji obiektu, 2 – maksymalny zysk z przyspieszenia realizacji obiektu, 3 – koszty poniesione na przyspieszenie realizacji, 4 – zysk z tytułu przyspieszenia

TABELA 4.7. Wyniki obliczeń analizy kosztów metodą dokładną

L p.	Nr czyn.	t_1	t_2	Δt	k	$\Delta k = k \cdot \Delta t$	T	Koszt $K \sum(k \cdot \Delta t)$	Skrócenie przedsięwzięcia	Zysk ze skrócenia	Zysk – koszt
							57	0	0	0	0
1	3-6	15	14	1	5	5	56	5	1	25	20
2	3-6	14	13	1	5	5	55	10	2	50	40
3	3-6	13	12	1	5	5	54	15	3	75	60
4	3-6	12	11	1	6	6	53	21	4	100	79
5	3-6	11	10	1	6	6	52	27	5	125	98
6	1-3	14	13	1	6	6	51	33	6	150	117
7	1-3	13	12	1	6	6					
	1-4	10	9	1	7	7	50	46	7	175	129
8	1-3	12	11	1	6	6					
	1-4	9	8	1	7	7	49	59	8	200	141
9	1-2	10	9	1	4	4					
	1-3	11	10	1	6	6					
	1-4	8	7	1	8	8	48	77	9	225	148
10	1-2	9	8	1	6	6					
	1-3	10	9	1	6	6					
	1-4	7	6	1	8	8	47	97	10	250	153
11	1-2	8	7	1	6	6					
	1-3	9	8	1	7	7					
	1-4	6	5	1	8	8	46	118	11	275	157
12	1-2	7	6	1	6	6					
	1-3	8	7	1	7	7					
	1-4	5	4	1	8	8	45	139	12	300	161
13	1-2	6	5	1	6	6					
	1-3	7	6	1	7	7					
	4-6	13	12	1	8	8	44	160	13	325	165
14	7-10	15	14	1	13	13					
	9-10	17	16	1	9	9	43	182	14	350	168
15	7-10	14	13	1	13	13					
	9-10	16	15	1	9	9	42	204	15	375	171
16	7-10	13	12	1	13	13					
	9-10	15	14	1	9	9	41	226	16	400	174
17	7-10	12	11	1	13	13					
	9-10	14	13	1	9	9	40	248	17	425	177
18	7-10	11	10	1	14	14					
	9-10	13	12	1	10	10	39	272	18	450	178
19	2-5	12	11	1	8	8					
	3-5	11	10	1	12	12					
	6-7	13	12	1	3	3					
	6-9	11	10	1	10	10	38	305	19	475	170

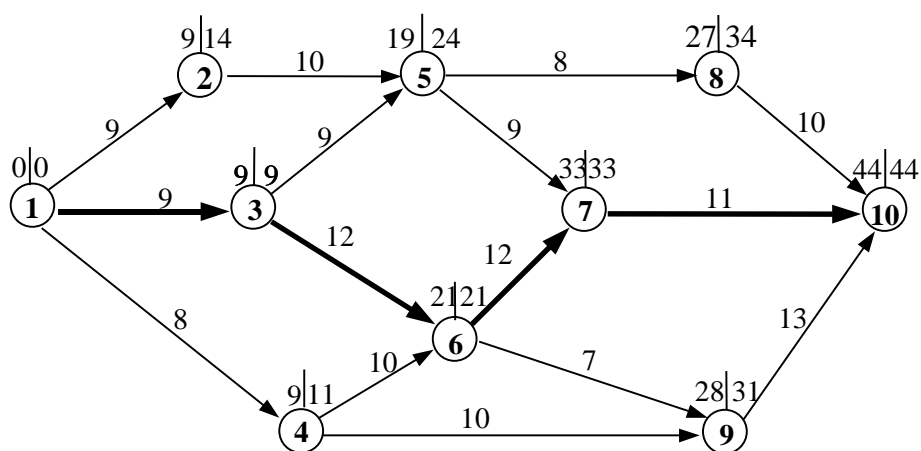
20	2-5 3-5 6-7 6-9	11 10 12 10	10 9 11 9	1 1 1 1	8 12 4 10	8 12 4 10	37	339	20	500	161
21	2-5 3-5 6-7 6-9	10 9 11 9	9 8 10 8	1 1 1 1	10 14 4 10	10 14 4 10	36	377	21	525	148
22	2-5 3-5 6-7 6-9	9 8 10 8	8 7 9 7	1 1 1 1	10 14 4 10	10 14 4 10	35	415	22	550	135
23	5-8 7-10 9-10	10 10 12	9 9 11	1 1 1	16 14 10	16 14 10	34	455	23	575	120
24	5-8 7-10 9-10	9 9 11	8 8 10	1 1 1	16 14 10	16 14 10	33	495	24	600	105
25	8-10 7-10 6-9	12 8 7	11 7 6	1 1 1	17 14 11	17 14 11	32	537	25	625	88
26	8-10 7-10 6-9	11 7 6	10 6 5	1 1 1	17 14 11	17 14 11	31	579	26	650	71



Rys. 4.8. Wykres kosztów wykonania przedsięwzięcia przy przejściu od czasów pesymistycznych do optymistycznych uzyskany metodą dokładną: 1 – optymalny termin realizacji obiektu, 2 – maksymalny zysk z przyspieszenia realizacji obiektu, 3 – koszty poniesione na przyspieszenie realizacji, 4 – zysk z tytułu przyspieszenia

4.6 Przykład 3. Analiza czasu, terminy dyrektywne i przerwy

W rozdziale tym zamieszczono przykład obliczenia sieci zależności podanej w rozdziale 4.4.5 (rys. 4.9) zakładając, że w trakcie robót nastąpią dwie przerwy: pierwsza od dziesiątego dnia przez kolejne pięć dni, druga od trzydziestego dnia przez kolejne dziesięć dni (rys. 4.10, tabela 4.8).



Rys. 4.9. Sieć zależności i terminy zdarzeń do przykładu nr 3 – realizacja bez przerw i terminów dyrektywnych.

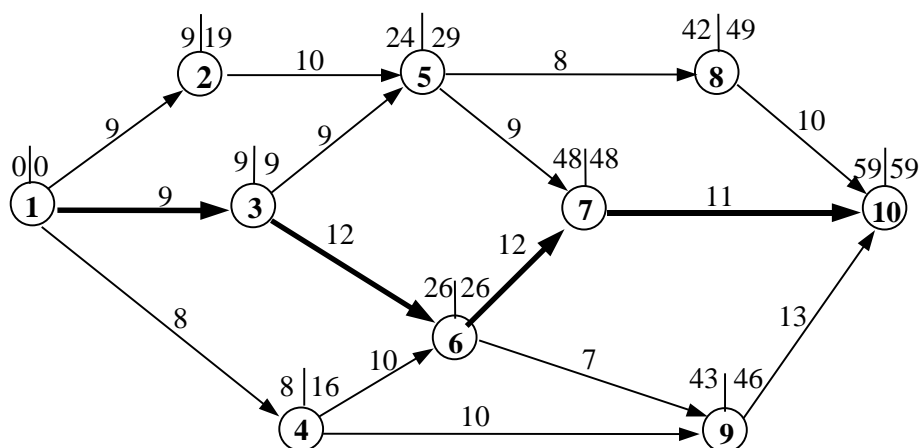
Drugi rodzaj danych uwzględnianych w trakcie obliczeń dotyczy terminów dyrektywnych tzn. terminów narzuconych przez obliczającego, którymi zastępowane są wskazane terminy wynikające z obliczeń. Poniżej zamieszczono przykład obliczenia sieci zależności podanej na rys. 4.9 zakładając, że w trakcie obliczeń zostaną uwzględnione dwa terminy dyrektywne wczesne: na zdarzeniu 4 termin 12 oraz na czynności 5-8 termin 23. Jak wynika z obliczeń (rys. 4.11, tabela 4.9) czynność 1-3, 3-6 i 1-4 nie są krytyczne, gdyż ich całkowity zapas czasu jest większy od zera. Termin zakończenia całego przedsięwzięcia został opóźniony o jeden dzień a ścieżka krytyczna nie jest ciągiem przebiegającym od zdarzenia początkowego do końcowego.

Kolejny zamieszczony przykład obliczenia tej samej sieci zależności zakłada, że w trakcie obliczeń zostanie uwzględniony jeden termin dyrektywny późny: na zdarzeniu 9 termin 26. Jak wynika z obliczeń

(rys.4.12, tabela 4.10) czynność 6-9 staje się krytyczną, gdyż jej całkowity zapas czasu jest mniejszy od zera. Ujemny zapas czasu na czynnościach 1-3, 3-6 oraz 6-9 wskazuje, że przedsięwzięcie w tych warunkach nie może zostać ukończone w obliczonym terminie 44 dni i obliczenia należałoby powtórzyć odrzucając lub zmieniając wartość założonego terminu dyrektywnego.

Tabela 4.8. Obliczenia terminów czynności do analizy czasu przy założeniu dwóch przerw w trakcie realizacji, od 10 dnia przez 5 dni oraz od 30 dnia przez 10 dni

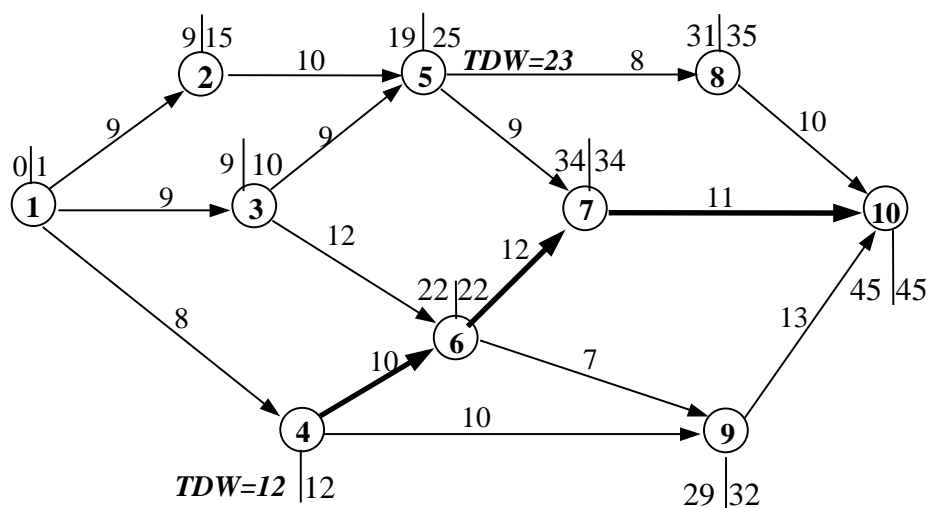
LP	ZP	ZN	TE	NWP	NWK	NPP	NPK	ZC	ZS
1	1	2	9	1	5	9	19	5	0
2	1	3	9	1	1	9	9	0	0
3	1	4	8	1	3	8	16	3	0
4	2	5	10	9	19	24	29	5	0
5	3	5	9	9	20	23	29	6	1
6	3	6	12	9	9	26	26	0	0
7	4	6	10	8	16	23	26	3	3
8	4	9	10	8	26	23	46	13	10
10	5	7	9	24	29	43	48	5	5
9	5	8	8	24	41	42	49	7	0
11	6	7	12	26	26	48	48	0	0
12	6	9	7	26	29	43	46	3	0
13	7	10	11	48	48	59	59	0	0
14	8	10	10	42	49	52	59	7	7
15	9	10	13	43	46	56	59	3	3



Rys. 4.10. Sieć zależności i obliczenia terminów czynności do analizy czasu przy założeniu dwóch przerw w trakcie realizacji, od 10 dnia przez 5 dni oraz od 30 dnia przez 10 dni

Tabela 4.9. Obliczenia terminów czynności do analizy czasu przy założeniu dwóch terminów dyrektywnych wczesnych: na zdarzeniu 4 termin 12 oraz na czynności 5-8 termin 23

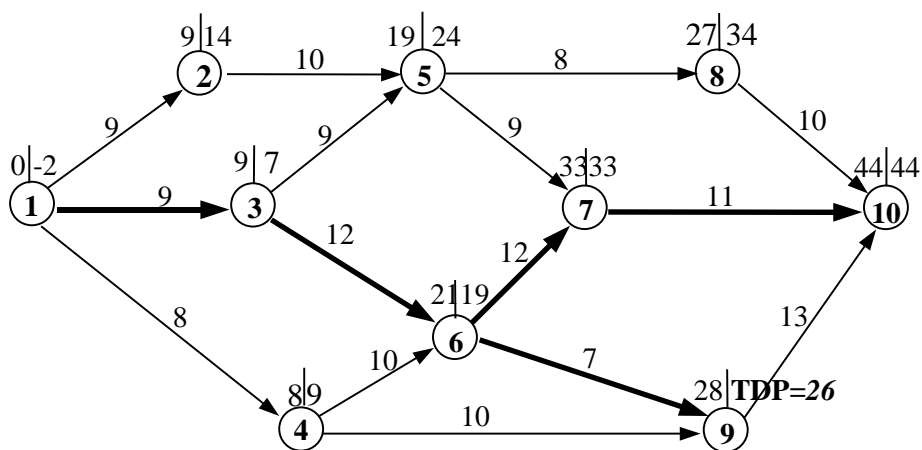
LP	ZP	ZN	TE	NWP	NWK	NPP	NPK	ZC	ZS
1	1	2	9	1	6	9	15	6	0
2	1	3	9	1	1	9	10	1	0
3	1	4	8	1	4	8	12	4	4
4	2	5	10	9	15	19	25	6	0
5	3	5	9	9	16	18	25	7	1
6	3	6	12	9	10	21	22	1	1
7	4	6	10	TDW=12	12	22	22	0	0
8	4	9	10	TDW=12	22	22	32	10	7
10	5	7	9	19	25	28	34	6	6
9	5	8	8	TDW=23	27	31	35	4	0
11	6	7	12	22	22	34	34	0	0
12	6	9	7	22	25	29	32	3	0
13	7	10	11	34	34	45	45	0	0
14	8	10	10	31	35	41	45	4	4
15	9	10	13	29	32	42	45	3	3



Rys. 4.11. Sieć zależności i obliczenia terminów czynności do analizy czasu przy założeniu dwóch terminów dyrektywnych wczesnych: na zdarzeniu 4 termin 12 oraz na czynności 5-8 termin 23

Tabela 4.10. Obliczenia terminów czynności do analizy czasu przy założeniu terminu dyrektywnego późnego 26 na zdarzeniu 9.

LP	ZP	ZN	TE	NWP	NWK	NPP	NPK	ZC	ZS
1	1	2	9	0	9	5	14	5	0
2	1	3	9	0	9	-2	7	-2	-2
3	1	4	8	0	8	1	9	1	0
4	2	5	10	9	19	14	24	5	0
5	3	5	9	9	18	15	24	6	1
6	3	6	12	9	21	7	19	-2	-2
7	4	6	10	8	18	9	19	1	1
8	4	9	10	8	18	16	TDP=26	8	8
9	5	7	9	19	28	24	33	5	5
10	5	8	8	19	27	26	34	7	0
11	6	7	12	21	33	21	33	0	0
12	6	9	7	21	28	19	TDP=26	-2	-2
13	7	10	11	33	44	33	44	0	0
14	8	10	10	27	37	34	44	7	7
15	9	10	13	28	41	31	44	3	3



Rys. 4.12. Sieć zależności i obliczenia terminów zdarzeń do analizy czasu przy założeniu terminu dyrektywnego późnego 26 na zdarzeniu 9.

5 Obliczanie modeli sieciowych w funkcji środków

5.1 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.

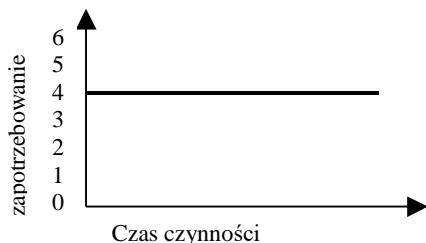
Zapotrzebowanie na środki

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:

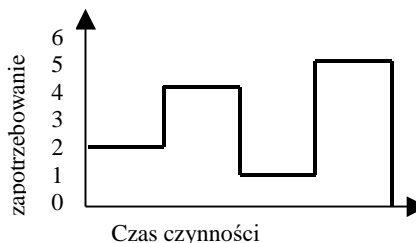
- poprzez określenie *dziennego zużycia* (np. 4 zbrojarzy pracujących każdego dnia), stosowane zwłaszcza do środków, których nie można magazynować (tzw. zasoby odnawialne, które nie mogą być magazynowane w czasie),
- poprzez podanie *całkowitego zużycia* środka w trakcie wykonania czynności (np. 4000 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.

5.2 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.

5.3 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:

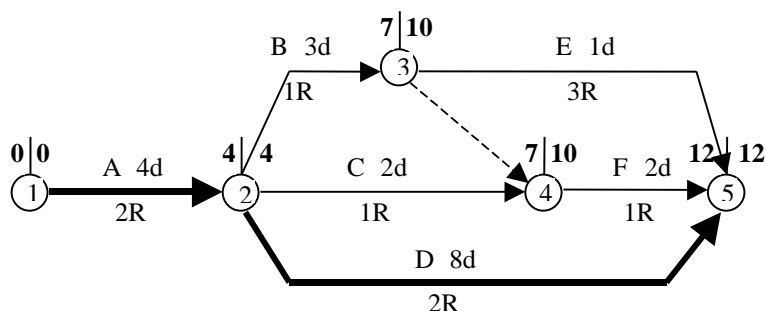
- terminy rozpoczęcia i zakończenia każdej czynności w sieci zależności. Jeśli czynność została zaplanowana w kilku etapach podane zostaną szczegółowe informacje o terminach każdego z nich. Często informacja o terminach ustalonych przez analizę środków zostaje uzupełniona o terminy ustalone w analizie 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.

5.4 Przykład 4. Analiza środków

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)

Etap 1. Oblicza się najwcześniejsze terminy zaistnienia (NWZ) dla zdarzeń 1,2,3,4,5:

$$NWZ_1 = 0; \quad NWZ_2 = 0 + 4 = 4; \quad NWZ_3 = 4 + 3 = 7; \quad NWZ_4 = \max(7 + 0; 4 + 2) = 7$$

$$NWZ_5 = \max(7 + 1; 7 + 2; 4 + 8) = 12$$

Etap 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

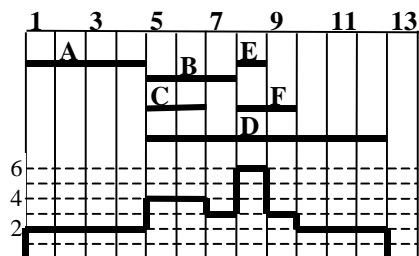
Jak wynika z obliczeń, ścieżka krytyczna przebiega przez zdarzenia 1, 2, 5, tzn. że na ścieżce krytycznej leżą czynności A i D.

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.

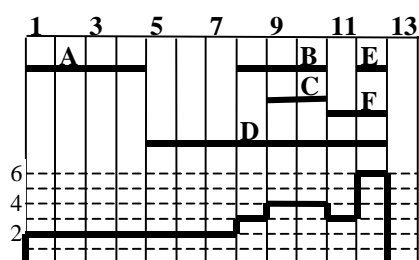
Na podstawie uzyskanych wykresów łącznego zapotrzebowania można było ustalić wartość dostępności środków, którą w tym przypadku przyjęto jako dostępność prostą w ilości trzech robotników do dyspozycji przez cały okres trwania przedsięwzięcia. Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono wyniki analizy środków. 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.



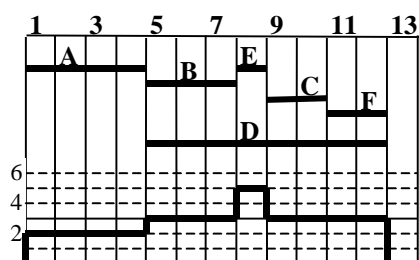
Rys. 5.4.
Układ czynności wg terminów
najwcześniejszych analizy czasu

Wykres sumowy środków wg
terminów najwcześniejszych



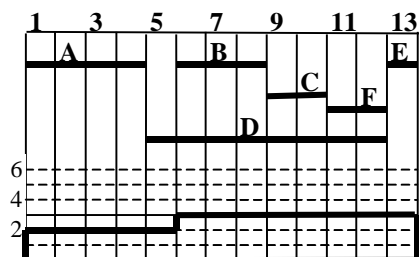
Rys. 5.5.
Układ czynności wg terminów
najpóźniejszych analizy czasu

Wykres sumowy środków wg
terminów najpóźniejszych



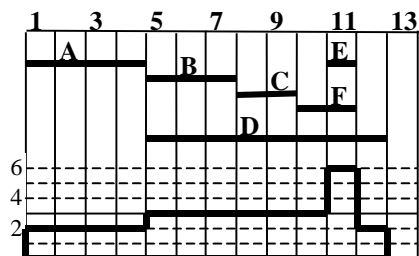
Rys. 5.6.
Układ czynności wg analizy środków
przy kryterium nieprzekraczalności
czasu zakończenia z analizy czasu

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



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

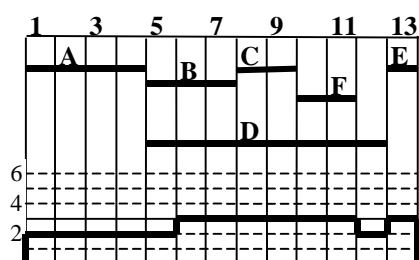
Wykres sumowy środków wg analizy
środków przy kryterium nieprzekra-
czalności dostępności środków,
dostępność środka - 3



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

6 Zalecany sposób prowadzenia analizy czasu i środków

Poprawne sporządzenie modelu sieciowego oraz przeprowadzenie niezbędnych analiz w celu sporządzenia harmonogramu wymaga od użytkownika pewnej wiedzy i doświadczenia. Poniżej zestawiono kolejne etapy obliczeń, które powinny być przeprowadzone w celu wykonania poprawnej analizy i sporządzenia właściwej dokumentacji (Połoński 1987).

Budowa sieci zależności

Jest to podstawowa czynność, która w dużym stopniu przesądza o wynikach prowadzonych w dalszej kolejności obliczeń. Konstrukcja sieci powinna być poddana szczegółowej analizie pod kątem zastosowanych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych, właściwego wymodelowania przyjętych założeń, możliwie 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 środki potrzebne do realizacji poszczególnych czynności, 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.

Praca nad budową sieci zależności najczęściej powinna przebiegać w kilku etapach. Po sporządzeniu wstępnej listy czynności należy opracować pierwszy schemat sieci, a następnie wprowadzając kolejne poprawki tworzyć nowe, coraz lepsze wersje. Proces ten powinien być kontynuowany tak długo, aż w sieci zostaną zawarte wszystkie wymagane czynności i ich wzajemne powiązania, a rysunek grafu będzie czytelny i łatwy do interpretacji.

Określenie czasu trwania czynności i wykonanie analizy czasu

Czasy trwania czynności powinny być określone na podstawie realnych możliwości wykonawcy. Dodatkowo możliwe jest deklarowanie terminów dyrektywnych wczesnych i późnych dla poszczególnych czynności i/lub zdarzeń. 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. Jeżeli uzyskany termin zakończenia przedsięwzięcia jest zbyt krótki, wykonanie całego obiektu można wydłużyć, deklarując odpowiedni, najwcześniejszy termin zdarzenia końcowego sieci. 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 środków może być najwyżej wydłużony, ale nigdy skrócony. Jeśli termin zakończenia całości robót lub poszczególnych czynności jest niezadowolający, należy rozważyć możliwość wprowadzenia jednej lub kilku następujących zmian:

- przyspieszyć datę rozpoczęcia przedsięwzięcia,
- zmienić oceny czasów trwania czynności (szczególnie leżących na ścieżce krytycznej i ciągach podkrytycznych),
- przeanalizować wpływ terminów dyrektywnych na wyniki i ewentualnie zmienić ich wartości lub je usunąć,
- zmodyfikować budowę sieci zależności.

Sporządzenie listy środków poddanych analizie

Wszystkie środki, 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 środka powinny zostać określona cena jego użycia.

Przypisanie środków potrzebnych do realizacji czynności

Na podstawie dokonanej oceny czasu trwania czynności i sporządzonej listy zasobów wszystkim czynnościom należy przypisać zapotrzebowanie ilości środków, jakie są niezbędne do ich wykonania. Część czynności może pozostać bez przydzielonych zapotrzebowań (np. przerwy technologiczne). Jeśli w sieci występują czynności zerowe należy pamiętać, że nie można im przypisywać zapotrzebowania na zasoby.

Ustalenie łącznego zapotrzebowania na środki wg terminów najwcześniejszych i najpóźniejszych

Jeśli program dopuszcza taką możliwość należy sprawdzić łączne zapotrzebowania na zasoby wg tego wariantu analizy. Wykonanie tych analiz zazwyczaj nie wymaga deklaracji poziomów dostępności. Dzięki temu użytkownik może zorientować się w występujących w czasie realizacji obiektu łącznych zapotrzebowaniach na poszczególne środki, może ustalić ich najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy zapotrzebowania, liczbę czynności obciążonych danym środkiem itp.

Deklaracja poziomów dostępności

Do przeprowadzenia analizy przy ograniczonym czasie lub środkach konieczne jest zdefiniowanie dostępności poszczególnych zasobów. Jeśli jest taka możliwość należy pamiętać o użyciu środków rezerwowych. Wartość dostępności należy deklarować kierując się z jednej strony ograniczeniami występującymi na placu budowy, z drugiej biorąc pod uwagę wymagane zapotrzebowania ustalone w poprzednim etapie 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. Jeśli jakiś środek został wprowadzony do analizy, tylko po to, aby ustalić w jakich terminach wystąpi jego zapotrzebowanie, zadeklarowana dla niego dostępność powinna być określona na tak wysokim poziomie, aby użycie tego środka było możliwe w każdej chwili bez ograniczeń.

Symulacja realizacji obiektu

Na tym etapie użytkownik może sprawdzić, czy przyjęte wcześniej założenia odnośnie realizacji obiektu przynoszą pożądane rezultaty. Symulację zazwyczaj należy przeprowadzić kilkakrotnie, w różnych układach: dostępność a termin i koszt wykonania. Zaleca się przeprowadzić zarówno analizę przy ograniczonym czasie jak i ograniczonych środkach oraz porównać wyniki. Następnie należy zbadać wpływ dostępności poszczególnych środków na przebieg robót. Często zdarza się, że tylko jeden lub dwa środki z całej listy mają kluczowe znaczenie na końcowe wyniki obliczeń. Po każdej wykonanej analizie użytkownik powinien prześledzić wykorzystanie poszczególnych środków oraz określić ich wpływ na przebieg robót. Jeśli korekty dostępności nie zapewniają pożądanych rezultatów, można próbować skorzystać z opcji wykonania czynności etapami. Gdy to również nie daje właściwych wyników, należy rozważyć zastosowanie rezerwy czasu, a gdy nie jest to możliwe, należy ponownie przeanalizować poziomy dostępności. W niektórych sytuacjach mogą być konieczne zmiany konstrukcji sieci zależności i/lub czasów trwania czynności i zapotrzebowania na środki.

Systemy analizy środków zostały tak zaprojektowane, aby dać użytkownikowi możliwość prowadzenia wielu, łatwo modyfikowalnych analiz oraz poszukiwania takiego rozwiązania, które w ramach istniejących ograniczeń najlepiej spełnia jego wymagania. Jeżeli sieć została zbudowana prawidłowo, a dane o czasach czynności i zasobach dobrano zgodnie z możliwościami wykonawcy, używany program dostarczy informacji o realnych możliwościach wykonania obiektu, prawdopodobnym terminie jego zakończenia, niezbędnych dostępnościach zasobów, nakładach finansowych itp. Jeśli wyniki analiz nie spełniają oczekiwań, najprawdopodobniej planowane warunki wykonania obiektu są zbyt optymistyczne lub wręcz niemożliwe do osiągnięcia. Z finansowego punktu widzenia komputerowa symulacja przebiegu wykonania przedsięwzięcia jest wielokrotnie tańsza od eksperymentowania bezpośrednio na budowie w trakcie realizacji obiektu. Wskazane jest więc dłużej planować, a krótko i sprawnie realizować inwestycję niż odwrotnie.

Sporządzenie dokumentacji wynikowej

Przeprowadzony proces symulacji prowadzi do wyboru jednego wariantu, na podstawie którego zostanie zaplanowana realizacja obiektu. Na

zakończeniu obliczeń należy sporządzić odpowiednią dokumentację opracowanego harmonogramu, na którą powinny zostać złożone następujące załączniki:

- sieć zależności, na podstawie której wykonywano obliczenia,
- dane ogólne o obiekcie: termin rozpoczęcia i zakończenia robót, planowane przerwy, koszt realizacji obiektu, ogólny opis zastosowanych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych, lista rozpatrywanych zasobów itp.,
- wydruk przyjętych do obliczeń czasów trwania czynności, zapotrzebowania na środki oraz analizowanych dostępności,
- terminy realizacji wszystkich czynności wg analizy czasu i środków;
- raporty o łącznym zapotrzebowaniu na poszczególne środki w kolejnych dniach wykonania obiektu; każdy analizowany zasób powinien mieć sporządzone zestawienie, w którym wykazano jego sumaryczne zapotrzebowanie i dostępność w każdym dniu robót,
- informacje statystyczne o wykorzystaniu poszczególnych środków po przeprowadzonej analizie.

7 Wybór czasu trwania realizacji inwestycji na podstawie harmonogramów sieciowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykład możliwości praktycznego zastosowanie analizy harmonogramów sieciowych do określenia jednego z podstawowych elementów dokumentacji technologiczno-organizacyjnej jakim jest czas trwania realizacji inwestycji. Długość cyklu inwestycyjnego ma bezpośredni wpływ na rodzaj i liczbę niezbędnych środków produkcji, na zatrudnienie, określenie odpowiednich technologii i rozwiązań organizacyjnych, a zatem i na opracowanie harmonogramu prac na obiekcie. Wszelkie błędy popełnione przy określaniu właściwego cyklu realizacji obiektu będą rzutowały na pozostałe elementy dokumentacji technologiczno-organizacyjnej, a w dalszej kolejności na przebieg prac w trakcie realizacji obiektu.

Wybór długości cyklu realizacji inwestycji jest procesem złożonym (Kalabiński, Michnowski 1977). Istnieje duża liczba czynników, które wpływają w sposób bezpośredni na jego wartość, a równocześnie są współzależne od siebie (Połoński 1984). Na rysunku 7.1 przedstawiono je w ujęciu systemowym. Zawarto tam te elementy, które można i powinno się uwzględnić przy określaniu cyklu realizacji inwestycji melioracyjnych.

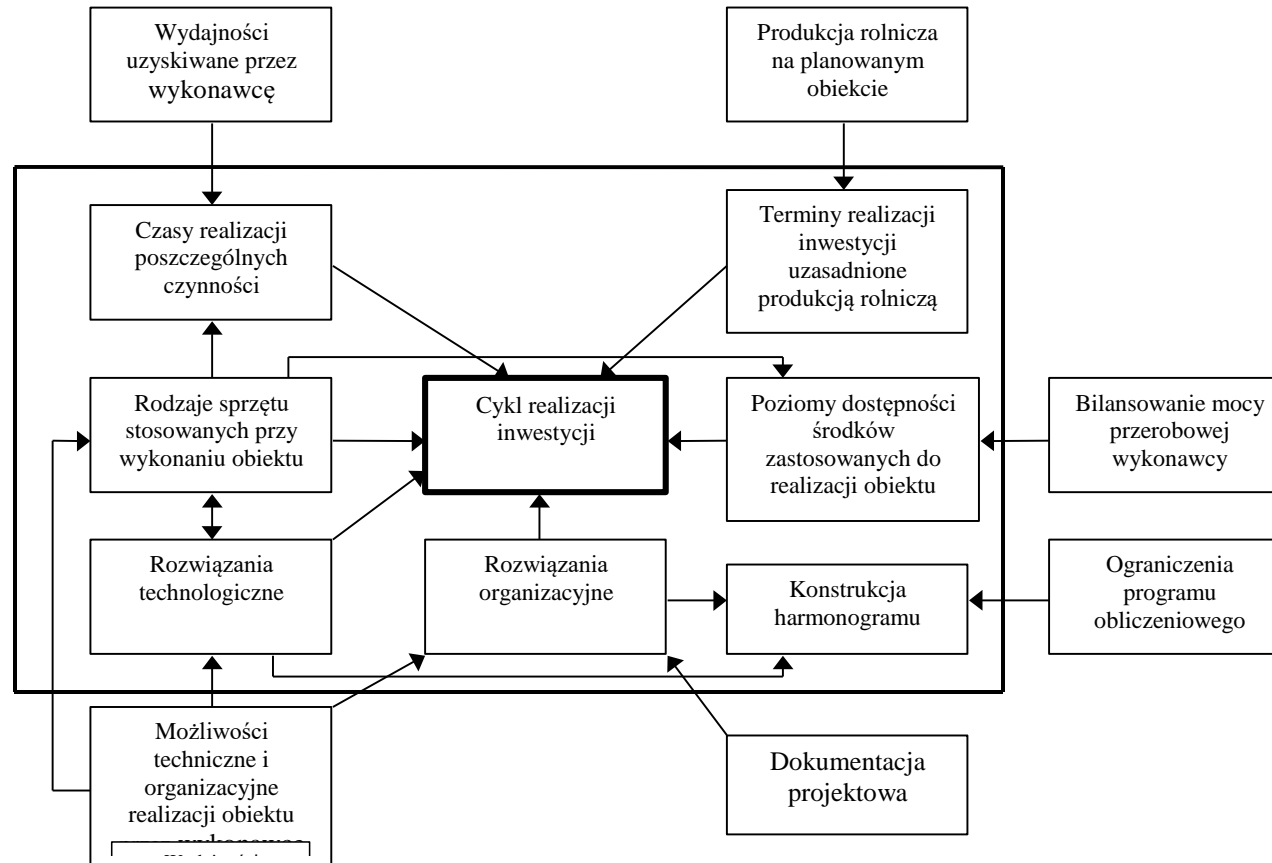
Przed wyborem długości cyklu dokonano następujących założeń:

- cykl realizacji każdego obiektu jest ustalony indywidualnie,
- czas realizacji inwestycji powinien być w ścisły sposób połączony ze środkami, jakimi będzie dysponował wykonawca podczas trwania budowy,
- czas realizacji inwestycji powinien być skrócony do terminu uzasadnionego z punktu widzenia ekonomicznego przy zachowaniu ograniczeń panujących na budowie,

- jeśli planowana inwestycja dotyczy obiektów rolniczych, termin rozpoczęcia i zakończenia prac na obiekcie musi uwzględniać okresy wykonywania prac polowych,
- założone rozwiązania techniczne, technologiczne i organizacyjne muszą być dostosowane do aktualnych możliwości wykonawcy. Dotyczy to zarówno norm wydajności uzyskiwanych przez danego wykonawcę, jak również posiadanego przez niego sprzętu, kwalifikacji robotników, mocy przerobowych, doświadczenia w realizacji poszczególnych rodzajów robót itp.,
- opracowanie dokumentacji technicznej i technologiczno-organizacyjnej powinno być przeprowadzone przy zachowaniu ścisłej współpracy pomiędzy projektantem i wykonawcą oraz w miarę potrzeby – inwestorem,
- projektowane rozwiązania technologiczne i organizacyjne należy przedstawić w postaci sieci zależności,
- na podstawie posiadanych informacji o dostępności poszczególnych środków należy dokonać ich analizy, co pozwoli uwzględnić wpływ ilości siły roboczej, sprzętu mechanicznego i ewentualnie materiałów na czas trwania prac na budowie.

Ponieważ założono, że czas realizacji inwestycji musi być połączony ściśle ze środkami jakimi będzie dysponował wykonawca, do przeprowadzenia obliczeń niezbędna jest znajomość środków przeznaczonych do realizacji danego obiektu. Ważne jest przy tym, aby podane wartości były realne i konsekwentnie utrzymane w trakcie realizacji. Oczywiście podczas prowadzenia robót mogą zajść pewne zmiany spowodowane awariami, płynnością kadr, nieterminowymi dostawami itp. Będą one wpływały na przebieg prac na obiekcie, lecz nie mogą stanowić podstawowych czynników decydujących o terminie zakończenia budowy. Należy o tym pamiętać przy ustalaniu czasów trwania poszczególnych czynności oraz głównych poziomów dostępności środków.

Celem nadrzędnym, dla którego wykonane są inwestycje w rolnictwie, jest wzrost produkcji rolniczej. W związku z tym, jeśli planowany obiekt związany jest z rolnictwem, to cykl realizacji takiej inwestycji nie może wynikać z mechanicznych obliczeń, lecz powinien być dostosowany do wykonywanych tam zabiegów rolniczych.



Rys. 7.1. Cykl realizacji inwestycji jako system

Niezależnie od ustalenia terminów realizacji robót, które w możliwie najmniejszy sposób kolidować będą z produkcją rolniczą, należy również przeanalizować zmiany struktury zasiewu w okresie trwania prac i takiego doboru roślin, które poniosą najmniejsze straty w wyniku prowadzenia robót.

W celu właściwego połączenia robót i produkcji rolniczej należy wyznaczyć kilka (dwa, trzy) terminów zakończenia robót TR, które byłyby wskazane ze względu na rodzaj upraw i związanych z tym zabiegów agrotechnicznych wykonanych na obiekcie, a następnie skorelować termin zakończenia robót z którymś z nich. W takim przypadku na początku na podstawie modelu sieciowego należy obliczyć najwcześniejszy możliwy do osiągnięcia termin zakończenia obiektu. Wyniknie on z analizy postawionych do dyspozycji środków. Następnie termin ten należy dostosować do terminów uzasadnionych produkcją rolniczą.

Jako wstępny termin zakończenia robót na obiekcie należy założyć najwcześniejszy możliwy do osiągnięcia termin uzasadniony zabiegami rolniczymi. Może się również zdarzyć tak, że w trakcie prowadzenia analizy trzeba będzie założyć termin zakończenia robót. Należy wówczas podać taką datę, która będzie uwzględniać produkcję rolniczą. Tak ustalona data nazywana jest wstępnym terminem realizacji obiektu WTRE. Opóźnienie zakończenia realizacji obiektu w stosunku do potencjalnych możliwości wykonawcy jest w tym przypadku uzasadnione, ponieważ nie przynosi strat w produkcji rolniczej, zmniejsza zużycie środków na obiekcie, dzięki czemu może być przyspieszona realizacja innych zadań wykonywanych przez danego wykonawcę oraz podnosi niezawodność osiągnięcia zaplanowanego terminu zakończenia robót.

Kolejne założenie, które w sposób zasadniczy kształtuje opisaną metodę, to konieczność skrócenia cyklu realizacji do terminu uzasadnionego ekonomicznie i uwzględniającego ograniczenia panujące na budowie. Chodzi mianowicie o to, aby skrócenie cyklu dało możliwie maksymalny efekt ekonomiczny. Za kryterium opłacalności skrócenia cyklu - zgodnie z tym co zostało wyżej podane – można przyjąć zysk uzyskany ze zwiększonej produkcji pomniejszony o poniesione nakłady na przyspieszenie realizacji obiektu. Należy więc spróbować skrócić wstępnie ustalony cykl realizacji obiektu i zbadać, jakie wartości przyjmuje kryterium oceny tego skrócenia. Skrócenie to można uzyskać różnymi sposobami. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę na przyjęte rozwiązania technologiczne i organizacyjne. Być może zmiana niektórych z nich

przyspieszy realizację inwestycji. W tym celu należy dokładnie prześledzić konstrukcję sieci zależności oraz wyniki obliczeń, na podstawie których ustalono wstępny termin realizacji. Skrócenie cyklu można również osiągnąć przez zwiększenie dostępności środków, szczególnie tych, które wpływają w sposób zasadniczy na ostateczny termin realizacji. W przypadkach, gdy o końcowym terminie realizacji inwestycji decyduje zbyt mała liczba któregoś środka, należy rozważyć zwiększenie jego dostępności lub przeanalizować możliwość zatrudnienia części pracowników w godzinach nadliczbowych. O tym, czy możliwe jest takie rozwiązanie muszą zdecydować warunki, jakie istnieją na konkretnej budowie. Często będzie to dotyczyło realizacji jedynie wybranych czynności, które zostaną ustalone w trakcie obliczeń.

Skrócenie cyklu realizacji inwestycji jest opłacalne tylko wówczas, gdy zysk ze skrócenia tego cyklu będzie większy od poniesionych nakładów na przyspieszenie realizacji obiektu. Na zysk ten składa się:

- wzrost wartości produkcji związany z szybszym oddaniem inwestycji do eksploatacji z uwzględnieniem kosztów produkcji oraz kosztów konserwacji,
- w przypadku inwestycji rolniczych skrócenie czasu wyłączenia tych terenów z produkcji,
- skrócenie czasu zamrożenia nakładów inwestycyjnych.

Natomiast dodatkowe koszty spowodowane są między innymi: płacami za godziny nadliczbowe, premiami motywacyjnymi, kosztami dodatkowego transportu, kosztami dodatkowego nadzoru oraz kosztami zwiększonego zaplecza socjalnego.

Oznaczając realizację obiektu w normalnym czasie jako wariant I, według cyklu skróconego jako wariant II, ostateczny efekt ekonomiczny z tytułu przyspieszenia realizacji (E) można wyrazić za pomocą wzoru:

$$E = \Delta W + \Delta Z - \Delta KP - \Delta KM - I$$

gdzie:

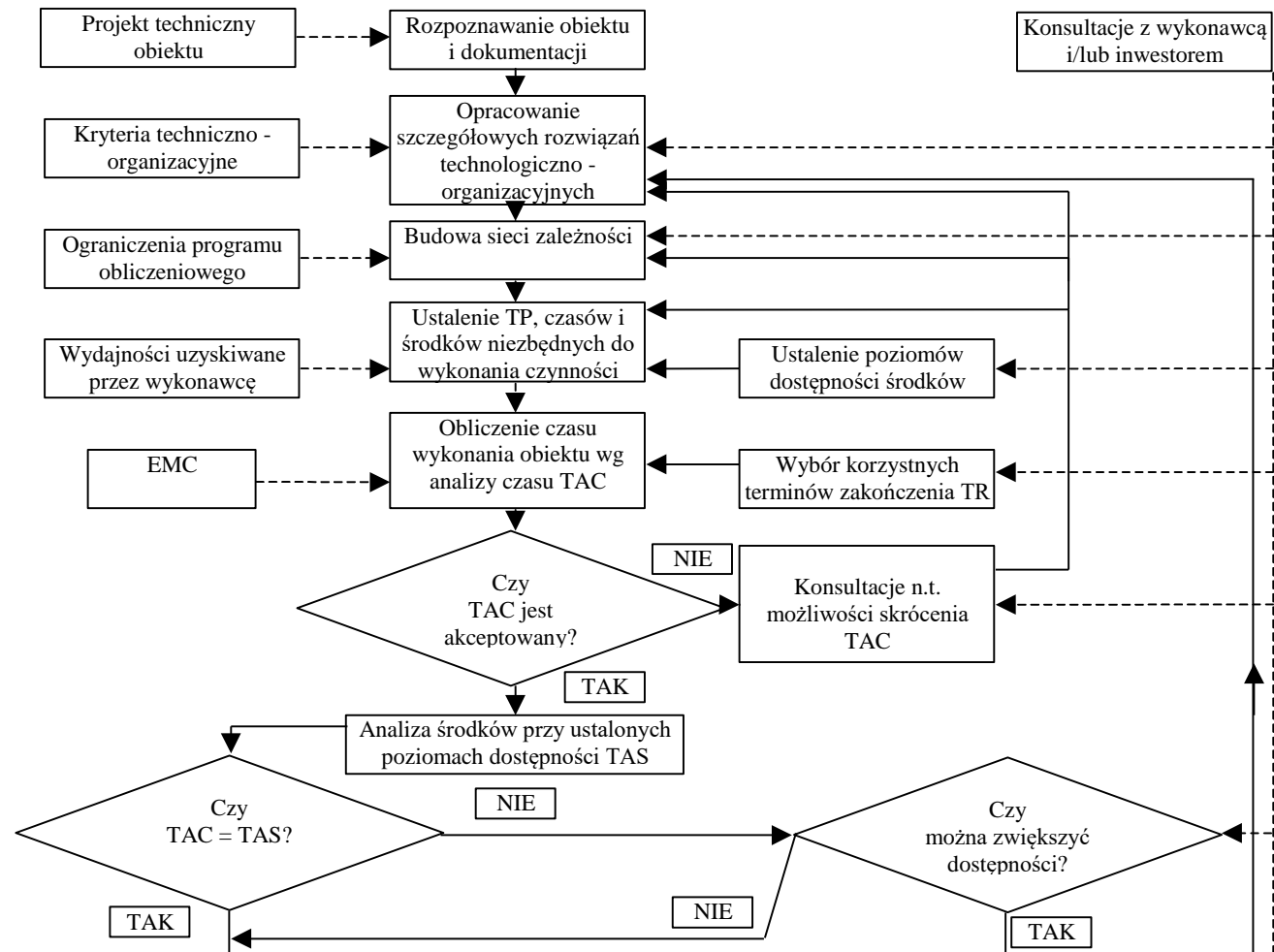
- ΔW - różnica wartości produkcji uzyskana w wariantach I i II;
- ΔZ - różnica zamrożenia nakładów inwestycyjnych w wariantach I i II;
- ΔKP - różnica w pełnych kosztach produkcji w wariantach I i II;
- ΔKM - różnica w kosztach konserwacji i eksploatacji w wariantach I i II;
- I - całkowite nakłady poniesione na skrócenie cyklu inwestycyjnego, tzn. skrócenie okresu realizacji obiektu z wariantu I i II.

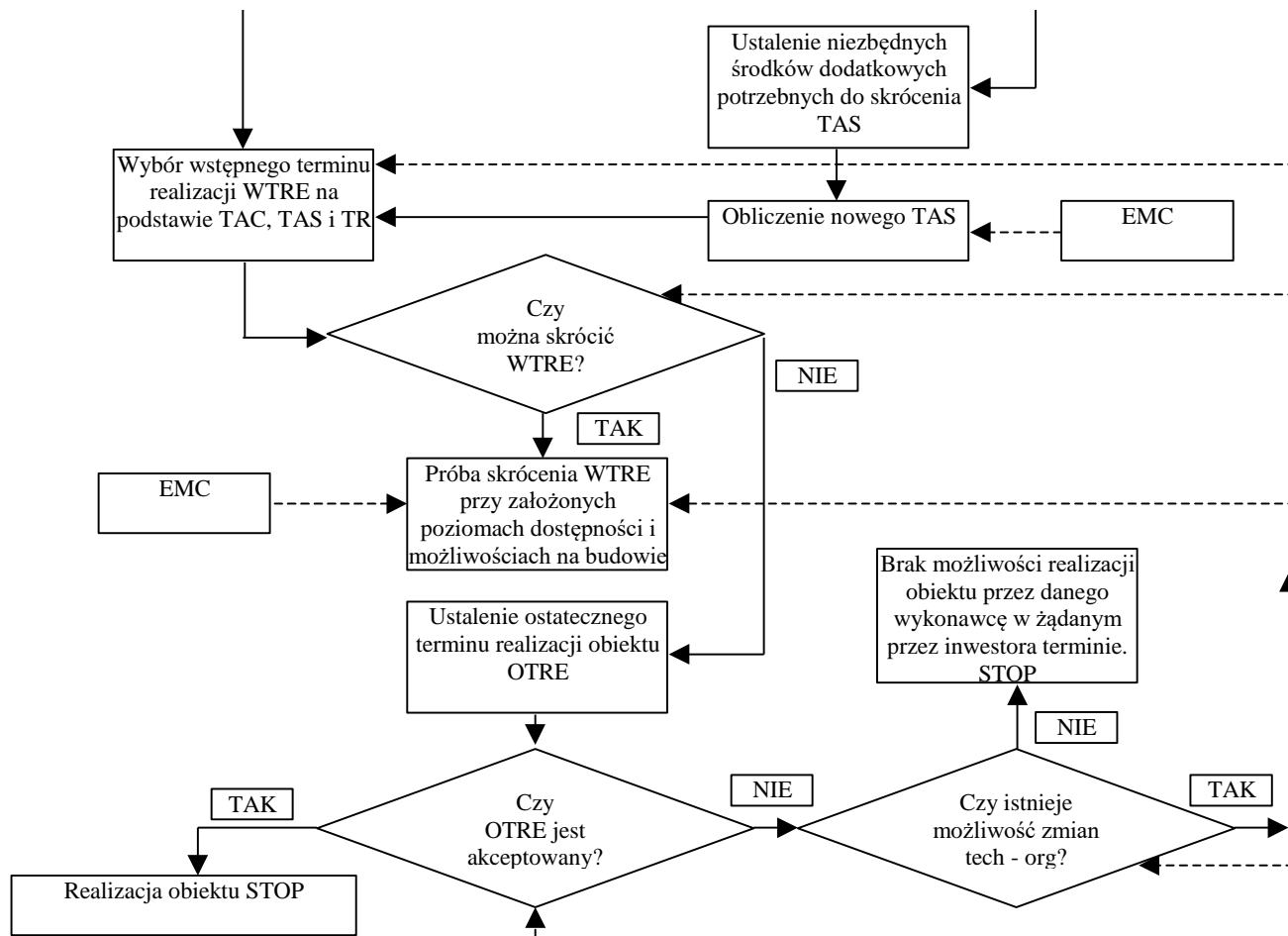
Warunkiem opłacalności skrócenia cyklu realizacji inwestycji jest $E > 0$.

Maksymalne możliwe do osiągnięcia skrócenie wszystkich wyznaczonych czynności w procesie realizacji inwestycji będzie limitowało największe możliwe do osiągnięcia skrócenie całego cyklu realizacji. Należy sprawdzić, czy w ten sposób obliczone skrócenie całego cyklu jest na tyle duże, że umożliwia wykonanie obiektu we wcześniejszym terminie uzasadnionym zabiegami rolniczymi. Jeśli tak, to należy obliczyć, czy przyspieszenie realizacji jest opłacalne. Być może taką analizę trzeba będzie wykonać dla kilku wariantów rozwiązań technologiczno-organizatorskich i wybrać najkorzystniejszy z nich. Ostateczny termin zakończenia realizacji obiektu zostanie ustalony jako:

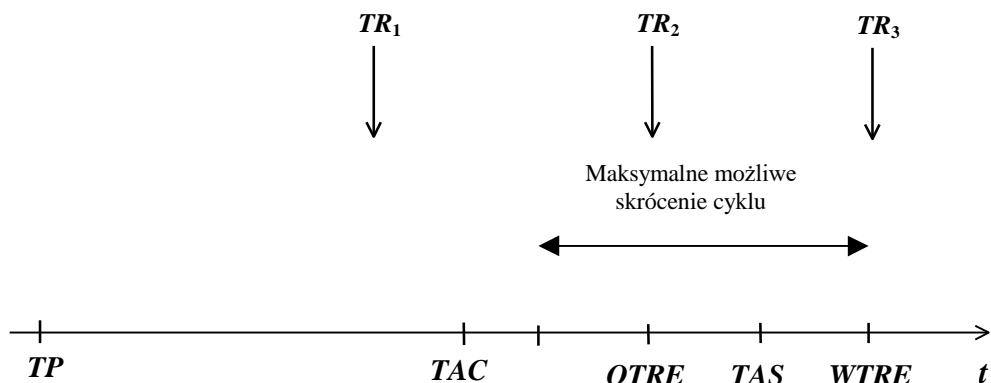
- skrócony do terminu uzasadnionego zabiegami rolniczymi i przynoszący największy możliwy w danych warunkach zysk;
- wstępny termin realizacji obiektu, gdy skrócenie jest niemożliwe, nieopłacalne lub nie spowoduje zakończenia obiektu w terminie uzasadnionym zabiegami rolniczymi.

Na rysunku 7.2 przedstawiono ogólny schemat blokowy, w którym ujęto wszystkie ważniejsze etapy analizy oraz naniesiono wymogi odnośnie dostępności podstawowych danych i niezbędnych konsultacji, jakie muszą być przeprowadzone w trakcie ustalania cyklu realizacji inwestycji. Sposób ustalania cyklu realizacji zgodnie z przyjętymi założeniami pokazano na rysunku 7.3.





Rys. 7.2. Schemat blokowy wyboru długości cyklu realizacji inwestycji na podstawie sieci zależności.



gdzie:

TP - termin rozpoczęcia robót

TR_n - terminy zakończenia obiektu uzasadnione produkcją rolniczą,

TAC - pierwotny termin zakończenia obiektu ustalony na podstawie analizy czasu,

$OTRE$ - ostateczny termin zakończenia robót,

TAS - termin zakończenia robót ustalony na podstawie analizy środków,

$WTRE$ - wstępny termin zakończenia robót.

Rys. 7.3. Schemat ustalania wstępnego i ostatecznego terminu realizacji obiektu

Podstawowymi etapami analizy cyklu realizacji inwestycji są:

- rozpoznanie obiektu i dokumentacji projektowej oraz możliwości wykonawcy,
- opracowanie szczegółowych założeń rozwiązań technologiczno-organizacyjnych z uwzględnieniem warunków panujących na obiekcie i możliwości technicznych wykonawcy,
- budowa szczegółowej sieci zależności obrazującej w sposób graficzny przyjęte koncepcje rozwiązań technologiczno-organizacyjnych,
- ustalenie czasów i środków realizacji poszczególnych czynności w sieci oraz wstępnych poziomów dostępności środków ze szczególnym uwzględnieniem możliwości konkretnego wykonawcy,
- ustalenie terminu rozpoczęcia robót (TP) oraz wykonanie analizy czasu i ustalenie najszybszego możliwego terminu wykonania obiektu (TAC),
- wykonanie analizy środków i ustalenie terminu zakończenia robót z uwzględnieniem dostępności i zapotrzebowania na środki (TAS),

- wybór wstępnego terminu realizacji obiektu na podstawie analizy środków i terminów uzasadnionych produkcją rolniczą (TR_n , WTRE),
- próba skrócenia wstępnego terminu realizacji przy zachowaniu ograniczeń wynikających z możliwości wykonawcy oraz ekonomiczne uzasadnienie opłacalności skrócenia cyklu,
- wybór ostatecznego terminu realizacji obiektu (OTRE), ustalenie końcowych poziomów dostępności środków oraz przygotowanie dokumentacji, którą będzie można wykorzystać do operatywnego zarządzania budową.

8 Kontrola realizacji obiektu i aktualizacja harmonogramu

W trakcie wykonywania robót nie zawsze udaje się dotrzymać zaplanowane terminy. Odstępstwa od planu mogą powstać między innymi na skutek:

- zmiennych warunków atmosferycznych,
- problemów kadrowych,
- awaryjności maszyn i urządzeń budowlanych,
- zmian wielkości planowanych dostępności środków produkcji,
- nieterminowości dostaw materiałów, maszyn i urządzeń,
- braku odpowiedniej wielkości rezerw materiałowych,
- zwłoki w podjęciu decyzji lub nieprawidłowych decyzji,
- złej dyscypliny pracy itp.

Każde opóźnienie prac powoduje potrzebę zaangażowania 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 ponownie przeanalizować. Sporządzony na etapie planowania harmonogram sieciowy stanowi do tego dobry punkt wyjścia a powszechność sprzętu, na którym przeprowadza się symulację wykonania obiektu powoduje, że niezbędne poprawki w danych i ponowne obliczenia można wykonać bezpośrednio na budowie, gdzie dostęp do wszystkich wymaganych informacji jest najprostszyszy i najszybszy.

Potrzeba aktualizacji pojawia się najczęściej w następujących przypadkach:

- opóźnienie (lub przyspieszenie) realizacji poszczególnych czynności,
- zmiana poziomów dostępności środków w trakcie wykonywania robót,
- zmiana zapotrzebowania na środki na poszczególnych czynnościach,

- konieczność przyspieszenia terminu realizacji całości przedsięwzięcia,
- wykrycie usterek w pierwotnej konstrukcji sieci zależności,
- konieczność zmian przyjętych rozwiązań technologiczno-organizacyjnych.

Wszystkie wymienione przypadki, z wyjątkiem dwóch ostatnich, nie wymagają zmian w konstrukcji sieci zależności. Konieczne jest jedynie zebranie danych o wszystkich czynnościach zakończonych oraz stopniu zaawansowania czynności będących w trakcie wykonania. Jeśli w związku z opóźnieniem zmienia się zapotrzebowanie na środki, należy określić ich nowe poziomy. W razie zmian w dostępności zasobów również konieczne jest podanie nowych, aktualnych wartości. Następnie poprawione dane należy wprowadzić do analizy harmonogramu.

Wskazane jest wykonanie poprawek przy zachowaniu pierwotnej struktury sieci zależności. Czynności, które zostały zakończone, należy pozostawić w sieci, definiując ich czas trwania jako zero. Czynnościom w trakcie robót należy przypisać czas trwania, jaki jest potrzebny do ich zakończenia. Pozostałe czynności pozostawia się bez zmian. Jeśli wprowadzane poprawki wymagają dodania nowych czynności, należy je oznaczyć numerami zdarzeń, które dotychczas nie były użyte w sieci. Przy ich dołączaniu do istniejącej struktury sieci należy w miarę potrzeby używać czynności zerowych.

Tak zaktualizowany zbiór informacji poddaje się ponownej analizie. Zazwyczaj w pierwszym etapie obliczenia przeprowadzone są w funkcji czasu. W związku z wprowadzonymi poprawkami konieczna jest zmiana daty podstawowej, określającej termin rozpoczęcia prac. Jako nową datę rozpoczęcia podaje się termin, w jakim przeprowadzona jest aktualizacja. Daty dyrektywne i przerwy wypadające przed nowo wprowadzonym początkiem należy usunąć lub zdefiniować. Dalszy tok postępowania przy obliczeniach w funkcji czasu pozostaje bez zmian. Należy zauważyć, że nowy termin zakończenia prac wynikający z analizy czasu prawdopodobnie będzie się różnić od poprzedniego.

Analizę środków rozpoczyna się od modyfikacji danych, które są używane przy jej wykonywaniu. Należy zwrócić uwagę, że:

- jeśli czas trwania czynności został skrócony do zera, to zapotrzebowanie na środki dla tej czynności muszą zostać skasowane,

- jeśli czas trwania czynności uległ skróceniu, należy pozostawić tylko te środki, które są niezbędne do jej zakończenia z pominięciem zapotrzebowania na części już zrealizowanej,
- jeśli czas trwania czynności uległ wydłużeniu, należy rozważyć, czy zapotrzebowania wymagają modyfikacji; jeśli wszystkie środki pozostaną nie zmienione, to ich ostatni poziom zapotrzebowania będzie obowiązywał do końca czasu trwania czynności, przez co może zmienić się łączne zapotrzebowanie na dany środek na czynności,
- jeśli termin rozpoczęcia robót został zmieniony (a tak najczęściej będzie w trakcie kolejnych aktualizacji), należy pamiętać o zmianie poziomów dostępności,
- po wprowadzeniu nowych czynności należy przypisać im wymagane zapotrzebowanie; w przypadku, gdy ich wykonanie wymaga zaangażowania nowych zasobów, wcześniej należy rozszerzyć o nie listę analizowanych środków.

Tak zweryfikowany zestaw danych o realizowanym przedsięwzięciu należy poddać normalnej analizie środków.

Terminy aktualizacji harmonogramu są trudne do ustalenia z góry. Powinny one wynikać z konkretnych warunków, jakie występują przy realizacji danego obiektu, stopnia szczegółowości z jaką budowano sieć zależności, przyjętego sposobu zarządzania budową oraz intensywności pojawiania się zakłóceń sporządzonego planu. Najczęściej aktualizację powinno wykonywać się w okresach miesięcznych lub tygodniowych. Wskazane jest również, aby częstotliwość wprowadzanych zmian rzutowała na sposób dokumentowania wyników obliczeń.
monogramu

9 Literatura

BENJAMIN J.R., CORNELL C.A. 1977: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.

BIERNACKI J., CYUNEL B. 1989: Metody sieciowe w budownictwie. Arkady. Warszawa.

BLADOWSKI S. 1970: Metody sieciowe w planowaniu i organizacji pracy. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne Warszawa.

BŁAŻEWICZ J., CELLARY W., SŁOWIŃSKI R., WĘGLARZ J. 1983: Badania operacyjne dla informatyków. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.

BOCTOR F.F. 1990: Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling. European Journal of Operational Research. Vol 49.

CHRISTOFIDES N., ALVAREZ-VALDES R., TAMARIT J.M. 1987: Project scheduling with resource constraints: A branch and bound approach. European Journal of Operational Research. Vol 29.

ELMAGHRABY S.E. 1990: Project bidding under deterministic and probabilistic activity durations. European Journal of Operational Research. Vol 49.

ELWRO NR 13112 1972: Oprogramowanie maszyny cyfrowej Odra serii 1300. Pert - Pamięć taśmowa. Wrocławskie Zakłady Elektroniczne ELWRO. Wrocław.

IDŹKIEWICZ A. 1967: PERT - metody analizy sieciowej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa.

IGNASIAK E. 1975: Programowanie sieciowe. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa.

JAWORSKI K.M. 1978: Metoda rozdziału zapasu czasu czynności w stochastycznych programach sieciowych. Archiwum Inżynierii Lądowej 1/1978.

JAWORSKI K.M. 1999: Metodologia projektowania realizacji budowy. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.

KALABIŃSKI B., MICHNOWSKI Z. 1977: Optymalizacja pełnych cykli inwestycyjnych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

KAPLIŃSKI O., STEFAŃSKI A. 1973: Metody sieciowe w organizacji i planowaniu budowy. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Poznańskiej. Poznań.

KORZAN B. 1978: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.

MICHNOWSKI Z. PRACA ZBIOROWA. 1985: Podstawy organizacji zarządzania i technologii w budownictwie. Arkady. Warszawa.

MICROSOFT PROJECT 1994: Version 4.0 for Apple, Macintosh. Series or Windows'. User's Reference.

MICROSOFT PROJECT DLA WINDOWS KROK PO KROKU 1995: Oficyna Wydawnicza Read Me. Warszawa.

MITCHELL G.H. 1977: Badania operacyjne. Metody i przykłady. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa.

MOSIEJ K., POŁOŃSKI M., SOKOŁOWSKI J. 1982: Metody sieciowe w melioracjach. PWRiL Warszawa.

PAWLAK G. 1992: Komputerowy system PERTMASTER ADVANCE w planowaniu i kontroli realizacji obiektów budowlanych. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna w Brześciu nt. "Wykorzystanie komputerów personalnych w projektowaniu i zarządzaniu w budownictwie". Część II.

POŁOŃSKI M. 1979: Element ryzyka w harmonogramach sieciowych. Gospodarka wodna nr 2.

POŁOŃSKI M. 1984: Wybór długości cyklu realizacji inwestycji melioracyjnych na podstawie analizy sieci zależności. Rozprawa doktorska SGGW.

POŁOŃSKI M. 1987: Opracowanie wytycznych zastosowania metod sieciowych do planowania i organizacji robót melioracyjnych oraz zastosowania ich na wybranym obiekcie. PR 2. Temat nr 10.8.4.1.A.29. Maszynopis.

POŁOŃSKI M. 1991: Możliwości zastosowania mikrokomputerów w melioracji. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie nr 7/8.

POŁOŃSKI M. 1995: Planowanie realizacji inwestycji melioracyjnych w funkcji czasu i środków na podstawie harmonogramów sieciowych. Wydawnictwo SGGW Warszawa.

TIME LINE 5.0 1991: Materiały szkoleniowe. Symantec Corporation CA 95014, USA.

TIME LINE 5.0 VSER MANUAL. 1984-1991: Symantec Corporation CA 95014, USA.

WAGNER H.M. 1980. Badania operacyjne. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa.

WILLIS R.J. 1985: Critical path analysis and resource constrained project scheduling - Theory and practice. European Journal of Operational Research. Vol 21.

YAU CH., RITCHIE E. 1990: Project compression: A method for speeding up resource constrained projects which preserve the activity schedule. European Journal of Operational research. Vol 49.