

Zdzisław Hejducki

**Zarządzanie czasem
w procesach budowlanych
z zastosowaniem
modeli macierzowych**



Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej



Zdzisław Hejducki

**Zarządzanie czasem
w procesach budowlanych
z zastosowaniem
modeli macierzowych**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2004**

114052

Recenzenci
Kazimierz M. Jaworski
Zdzisław Kowalczyk

Redaktor
Alicja Kordas

Korekta
Maria Izbicka

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100022262



317811 L/1

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004

ISBN 83-7085-771-X

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 168/2004

h794

2004/0433/D

Spis rzeczy

Wstęp.....	5
Wprowadzenie.....	6
Wykaz oznaczeń.....	10
1. Metodologia Wrocławskiego Ośrodka Metod Organizacji Robót Budowlanych...	11
1.1. Sprzężenia czasowe jako podstawowe kryterium klasyfikacji metod.....	11
1.2. Struktura potoku jako kolejne kryterium klasyfikacji metod.....	14
Podsumowanie	17
2. Charakterystyka metod organizacji robót budowlanych uwzględniających sprzężenia czasowe	18
2.1. Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji	20
2.2. Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi	24
2.3. Metoda organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi	26
2.4. Metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi oraz sprzężeń diagonalnych lub odwrotnych diagonalnych	30
2.5. Metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych	30
2.5.1. Zastosowanie sprzężeń czasowych w harmonogramowaniu robót budowlanych – przykład z praktyki wykonawczej.....	31
2.5.2. Zastosowanie komputerowego systemu Organizator do harmonogramowania robót budowlanych	35
Podsumowanie	36

3. Macierzowe modele (MM) organizacji robót budowlanych	37
3.1. Technika wyznaczenia czasów realizacji	37
3.2. Zmodyfikowany zapis macierzowy	41
3.3. Skalowanie modeli macierzy (SMM) organizacji robót budowlanych.....	44
4. Zarządzanie czasem realizacji procesów budowlanych z uwzględnieniem następstw technologicznych.....	50
4.1. Charakterystyka metody.....	50
4.2. Warianty metody.....	54
4.3. Właściwości metody	57
5. Analiza wariantów oddziaływania sprzężeń czasowych.....	66
5.1. Analiza wariantów organizacji robót budowlanych.....	68
5.1.1. Analiza przypadku uwzględniającego sprzężenia łączące najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót.....	68
5.1.2. Analiza przypadku uwzględniającego sprzężenia łączące najpóźniejsze terminy zakończenia robót.....	74
5.2. Ilustracja praktyczna – przykład obliczeniowy	89
6. Zastosowanie systemów komputerowych w metodach organizacji uwzględniających sprzężenia czasowe.....	95
Zakończenie	106
Literatura	109
Wykaz podstawowej literatury Wrocławskiego Ośrodka Metod Organizacji Robót Budowlanych	116

Wstęp

Dynamika przemian gospodarczych, społecznych i politycznych w ostatnich latach bardzo ściśle wpływa na sytuację przedsiębiorstw budowlanych. Pojawiają się nowe zjawiska związane z permanentnymi zmianami w obrębie struktury i zakresu działań firm. Jednym z istotnych czynników konkurencyjności jest czas, w formie:

- skrócenia okresu realizacji procesów budowlanych,
- dotrzymania ustalonych terminów wykonania robót.

Czas jako czynnik konkurencyjności ma niezwykle właściwości: nie można go zaoszczędzić, zmagazynować, pomnożyć, stale i nieodwołalnie biegnie naprzód. Powoduje to konieczność szczególnego traktowania czasu w planowaniu i realizacji procesów budowlanych. Realizacja projektów inwestycyjnych wiąże się z poszukiwaniem takich metod organizacji, które – zapewniając uwzględnienie ograniczeń technologicznych i organizacyjnych – zminimalizują kolizje, przerwy w pracy firm i przestoje frontów roboczych. Umożliwiają to liczne systemy zarządzania przedsięwzięciami, m.in. system: Project Management, Construction Management, Design and Build. W każdym z nich ważnym elementem, oprócz fazy koncepcji, przygotowania, realizacji i zakończenia przedsięwzięcia, jest faza planowania.

Analiza szczegółowych zależności pomiędzy procesami technologicznymi, w kompleksie z wykorzystaniem sprzężeń czasowych, jako narzędzia bezkolizyjnego planowania robót budowlanych, umożliwia zidentyfikowanie i opracowanie metodyki optymalnego, z kryterium minimalizacji czasu, planowania przebiegu robót.

Wprowadzenie

Nauka organizacji pracy wywodzi się z prakseologii – nauki o sprawnym działaniu (w Polsce prekursorami jej byli K. Adamiecki, T. Kotarbiński, J. Zieleniewski i inni). Pierwsze próby naukowego ujęcia organizacji procesów budowlanych, podjęte w latach trzydziestych ubiegłego wieku, wynikały z ograniczeń występujących w ekstremalnych warunkach (np.: ograniczone place budów w miastach amerykańskich, co spowodowało „montaż z kół”, oraz organizację pracy taśmowej).

Rozwój cybernetyki, nauki o sterowaniu procesami, stanowił przełomowy krok w zakresie modelowania procesów z zastosowaniem narzędzi matematycznych. Badania operacyjne, stosowane powszechnie do rozwiązywania zagadnień organizacyjnych, począwszy od okresu drugiej wojny światowej do chwili obecnej, przyczyniły się do usprawnienia wielu działań. Doskonalone są narzędzia planowania w postaci: programowania liniowego i nieliniowego oraz dynamicznego, sieci zależności, teorii niezawodności, teorii gier, symulacji numerycznej i inne, w celu zastosowania ich do modelowania procesów budowlanych. Wiele ośrodków naukowych rozwija od lat metody sieciowe, jako podstawowe narzędzie planowania przebiegu procesów budowlanych.

Opracowane przed laty założenia pracy równomiernej nie znalazły możliwości powszechnego stosowania ze względu na charakter procesów budowlanych, które są niejednorodne i dyskretnie (nieciągłe).

Na podstawie wyników przeprowadzonej przez W.A. Afanasjewa analizy można określić uogólnienia oraz specyfikę każdego z badanych rodzajów ciągu organizacyjnego, przedstawić nowe warianty metod organizacji. Prezentowane przez niego podejście do metod organizacji było podstawą utworzenia Międzynarodowej Szkoły Potokowych Metod Organizacji oraz wytyczyło kierunki badań i rozwoju metodyki w innych ośrodkach naukowych. Specyfika przyjętej metodologii polega na:

- podziale ogólnego frontu robót na częściowe fronty; ogólnego kompleksu robót na częściowe potoki, łączące te operacje, które można wykonać jednocześnie;

➤ ustaleniu takiego składu grup roboczych, który zapewnia utworzenie harmonicznej struktury potoku, według K. Adamieckiego, o jednakowym czasie trwania rodzajów robót;

➤ tworzeniu potoków na realizowanych obiektach lub kompleksach, z nieprzerwanym korzystaniem ze środków realizacji, frontów, z robotami krytycznymi, z uwzględnieniem różnych kombinacji sprzężeń czasowych¹;

➤ tworzeniu potoków obejmujących kompleksy obiektów, w wyniku scalania pojedynczych harmonogramów realizacji obiektów, z zachowaniem parametrów potoków dotyczących obiektów oraz potoku zapewniającego minimalny czas realizacji drogą równoległości robót¹;

➤ optymalizacji z kryterium minimalizacji czasu dla potoków obejmujących kompleksy lub obiekty, z uwzględnieniem zagadnień szeregowania zadań;

➤ optymalizacji potoków dla obiektów lub ich kompleksów, z uwzględnieniem metod równoległo-potokowych, w których uwzględnia się równoległość częściowych potoków tego samego rodzaju¹;

➤ formułowaniu i optymalizacji wariantów organizacyjnych, polegających na uwzględnianiu zmieniających się zakresów robót, a zwłaszcza na wprowadzeniu dodatkowych kompleksów robót;

➤ zastosowaniu do oceny wariantów organizacyjnych wskaźników cząstkowych i syntetycznych, uwzględniających parametry czasowe i cenowe robót;

➤ tworzeniu harmonogramów powykonawczych, umożliwiających analizę przebiegu robót, z zaznaczeniem przestojów i badaniem przyczyn¹;

➤ opracowaniu algorytmów i programów komputerowych umożliwiających wyznaczenie parametrów czasowych robót¹;

➤ opracowaniu zbioru metod organizacji procesów budowlanych o złożonej strukturze wewnętrznej, obejmującego¹:

↳ identyfikację nowych wariantów sprzężeń czasowych,

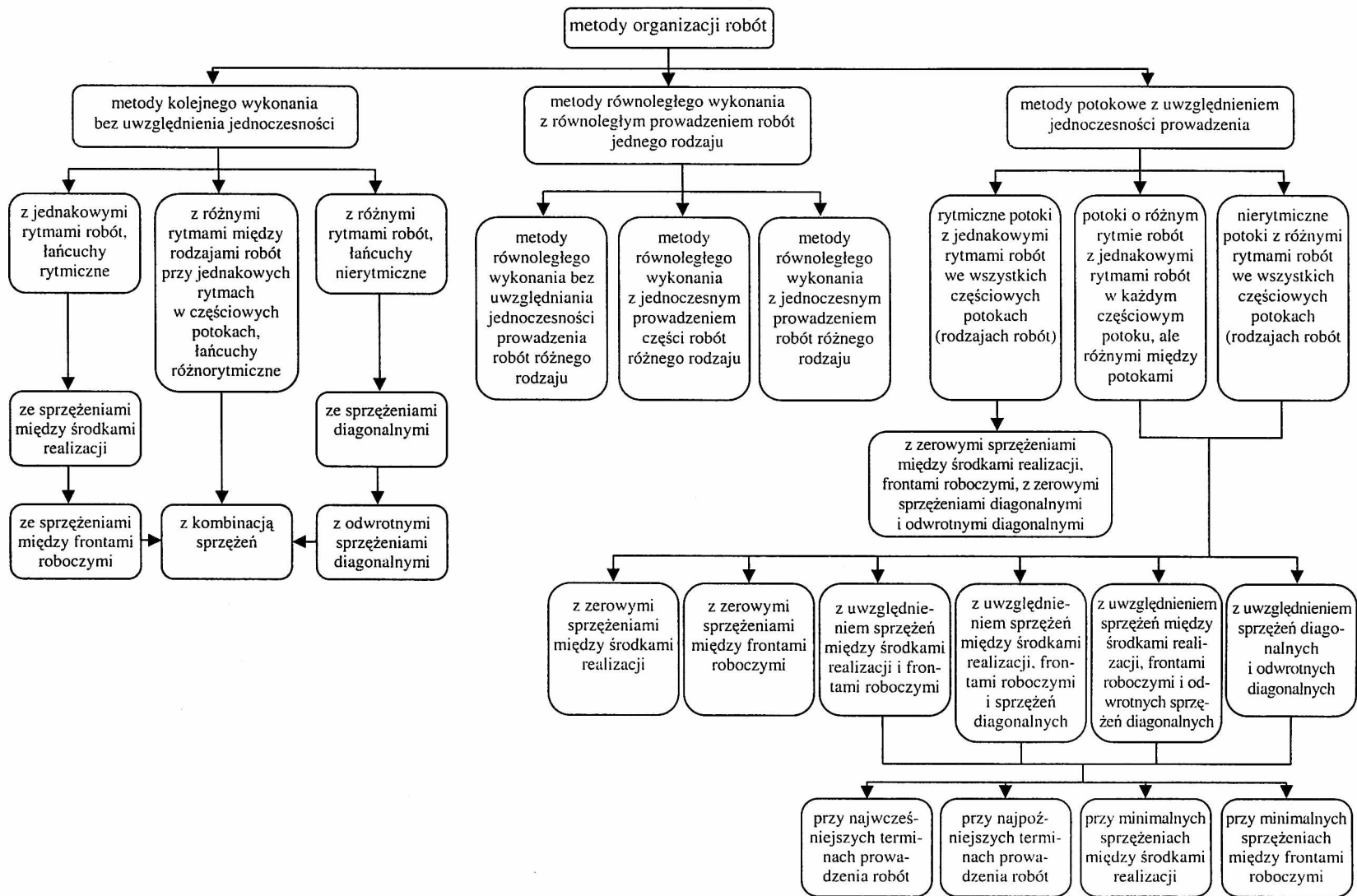
↳ opracowanie metod organizacji robót budowlanych o strukturze szeregowej,

↳ opracowanie wariantów metod szeregowo-potokowych organizacji robót budowlanych,

↳ opracowanie wariantów metod organizacji robót budowlanych o strukturze równoległej,

↳ opracowanie wariantów metod równoległo-potokowych organizacji robót budowlanych.

¹ Zagadnienia zostały opracowane z udziałem pracowników Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej (m.in. J. Mrozowicza, Z. Hejduckiego, B. Hoły, M. Sawickiego, K. Gawrona).



Rys. 1. Klasyfikacja metod organizacji robót budowlanych uwzględniających sprzężenia czasowe

W opracowaniu metod rozwiązań przedstawionych zagadnień brali udział specjaliści, pracujący według przyjętych założeń, między innymi S. Pereida, Ch. Ortega-Mendibura (Kuba), M. Szabon, M. Chaygur (Syria), A. Melski (USA), K. Fiedler, J. Pialek (Niemcy), J. Mrozowicz, Z. Hejducki (Polska).

Według opracowanych przez zespół profesora W.A. Afanasjewa założeń Międzynarodowej Szkoły Potokowych Metod Organizacji powstało wiele prac, prezentowanych na międzynarodowych kongresach, m.in. w Rosji, USA, Kanadzie, Kubie, Finlandii, Niemczech, Wielkiej Brytanii, Singapurze, Polsce.

Wykaz oznaczeń

A	– dwukolumnowa macierz
B	– dwukolumnowa macierz zmodyfikowana algorytmem Johnsona
GMM	– wskaźnik, granicznie możliwe minimum
h, k	– nakłady pracy
H	– podzbiór najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót
m	– liczba kolumn macierzy T
n	– liczba wierszy macierzy T
N	– częściowy potok
O_i	– obiekt i
P	– zbiór terminów rozpoczęcia robót
P_j	– proces roboczy j
R	– zbiór terminów rozpoczęcia robót w diagonale macierzy
S^{fw}	– sprzężenia między frontami roboczymi dla wczesnych terminów
S^{sp}	– sprzężenia między środkami realizacji dla późnych terminów
S^{sfp}	– sprzężenia między frontami roboczymi
T	– macierz czasu trwania robót
t^{wr}	– najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty
t^{wz}	– najwcześniejszy termin zakończenia roboty
t^{pr}	– najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty
t^{pz}	– najpóźniejszy termin zakończenia roboty
t_{ij}	– czas wykonania roboty j na froncie i
t_{ijq}	– czas trwania krytycznej roboty j na froncie i dla diagonału q
t_j^r	– czas rozwinięcia częściowego potoku j
tS^{sw}	– sprzężenia między środkami realizacji dla wczesnych terminów
T_j^z	– wektor zakończenia częściowego potoku
T_j^R	– wektor rozwinięcia częściowego potoku

Rozdział 1

Metodologia Wrocławskiego Ośrodka Metod Organizacji Robót Budowlanych

1.1. Sprzężenia czasowe jako podstawowe kryterium klasyfikacji metod

W pracach W.A. Afanasjewa, A.W. Afanasjewa oraz J. Mrozowicza i innych przedstawiono sześć metod potokowej organizacji robót, utworzonych przez usystematyzowanie występujących między robotami sprzężeń czasowych. Podczas tworzenia modelu graficznego potoku, np. sieci zależności, nietrudno zauważyć, że niekiedy najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia lub zakończenia robót mogą być jednakowe. Było to między innymi punktem wyjścia do opracowania założeń metody z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi. Uznano, że sprzężenia powinny powiązać jedynie termin zakończenia roboty t_{ij} z rozpoczęciem roboty następnej w ustalonym porządku technologicznym $t_{i,j+1}$ lub t_{ij} i $t_{i+1,j}$. Po oznaczeniu sprzężeń jako S można wyznaczyć

$$S = t_{i,j+1}^{wr} - t_{ij}^{wz} \quad (1.1)$$

oraz

$$S = t_{i+1,j}^{wr} - t_{ij}^{wz}, \quad (1.2)$$

gdzie:

t_{ij}^{wz} – najwcześniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i ,

$t_{i,j+1}^{wr}$ – najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty $j + 1$ na froncie i .

Po uwzględnieniu ograniczeń mogących wystąpić w praktyce budowlanej dostrzeżono, że prezentowana interpretacja pojęcia sprzężenia czasowego jest niepełna i ogranicza obszar zastosowania przedstawionych metod. Postuluje się

rozszerzenie tego pojęcia i przyjęcie do modelowania potoku sprzężeń czasowych, wyznaczonych z możliwych kombinacji najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. W metodzie potokowej organizacji robót, z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, podczas modelowania potoku możemy rozpatrzeć następujące przypadki:

- łączenie terminów rozpoczęcia robót w częściowym potoku

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{pr} \quad \text{ i } \quad t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{pz}, \quad (1.3)$$

więc

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j}^{wr}, \quad (1.4)$$

gdzie:

t_{ij}^{wr} – najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i ,

t_{ij}^{pr} – najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i ,

t_{ij}^{wz} – najwcześniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i ,

t_{ij}^{pz} – najpóźniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i ,

- łączenie terminów zakończenia robót w częściowym potoku

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wz}; \quad (1.5)$$

- łączenie terminów rozpoczęcia robót i ich zakończenia

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j}^{wz}; \quad (1.6)$$

- łączenie terminów zakończenia robót i ich rozpoczęcia

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wr}. \quad (1.7)$$

W grupie metod z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi można uwzględnić sprzężenia, łączące odpowiednie:

- terminy rozpoczęcia robót w częściowym kompleksie,
- terminy zakończenia robót,
- terminy rozpoczęcia i zakończenia robót,
- terminy ich zakończenia i rozpoczęcia.

W przypadku metody z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi, rośnie liczba możliwych wariantów oddziaływania sprzężeń. Wynika to z potrzeby ujęcia występujących w modelu najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Po utworzeniu zbioru metod możemy łączyć odpowiednio terminy rozpo-

częcia robót, terminy zakończenia i kombinacji terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Uzyskamy wówczas następujące przypadki:

- łączenie terminów rozpoczęcia robót:

↳ dla wczesnych terminów

$$t_{ij}^{wr} = \max \{t_{i-1,j}^{wr}, t_{i,j-1}^{wr}\}; \quad (1.8)$$

↳ dla późnych terminów

$$t_{ij}^{pr} = \min \{t_{i+1,j}^{pr}, t_{i,j+1}^{pr}\}; \quad (1.9)$$

- łączenie terminów zakończenia robót:

↳ dla wczesnych terminów

$$t_{ij}^{wz} = \max \{t_{i-1,j}^{wz}, t_{i,j-1}^{wz}\}; \quad (1.10)$$

↳ dla późnych terminów

$$t_{ij}^{pz} = \min \{t_{i+1,j}^{pz}, t_{i,j+1}^{pz}\}; \quad (1.11)$$

- łączenie terminów rozpoczęcia i zakończenia robót:

↳ dla wczesnych terminów

$$t_{ij}^{wr} = \max \{t_{i-1,j}^{wz}, t_{i,j-1}^{wz}\}; \quad (1.12)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{t_{i-1,j}^{wz}, t_{i,j-1}^{wr}\}; \quad (1.13)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{t_{i-1,j}^{wr}, t_{i,j-1}^{wz}\}; \quad (1.14)$$

↳ dla późnych terminów

$$t_{ij}^{pz} = \min \{t_{i+1,j}^{pr}, t_{i,j+1}^{pr}\}; \quad (1.15)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \{t_{i+1,j}^{pr}, t_{i,j+1}^{pz}\}; \quad (1.16)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \{t_{i+1,j}^{pz}, t_{i,j+1}^{pr}\}. \quad (1.17)$$

Uwzględnienie w pozostałych metodach sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych wpływa na pojawienie się dodatkowych kombinacji. Przeglądając możliwe sprzężenia, z udziałem czterech ich rodzajów (między środkami realizacji, frontami roboczymi, stopniowych i odwrotnych stopniowych),

dla najpóźniejszych i najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, możemy stwierdzić, że wystąpi po kilkanaście wariantów powiązań.

W wyniku utworzenia zbioru kombinacji powiązań między robotami, z uwzględnieniem wymienionych sprzężeń czasowych, możemy otrzymać kilkadziesiąt wariantów potokowych metod. Daje to organizatorom produkcji budowlanej nowe narzędzie modelowania kompleksu robót zgodnie z pojawiającymi się w procesie realizacji ograniczeniami.

Przedstawiony zbiór możliwych wariantów organizacyjnych zawiera zarówno sposoby realizacji zalecane i przynoszące efekty, jak i niezalecane. Badania nad oceną uzyskanych wariantów nie zostały dotychczas zakończone. Pierwsze wyniki uzyskano podczas analizy harmonogramów powykonawczych z realizacji osiedla mieszkaniowego. Zbadano stopień ciągłości pracy brygad roboczych zatrudnionych podczas wznoszenia budynków osiedla i zaproponowano metodę organizacji zapewniającą ciągłość ich pracy.

1.2. Struktura potoku jako kolejne kryterium klasyfikacji metod

Za kryterium klasyfikacji metod potokowych przyjmuje się między innymi stopień równoległości wykonania robót jednego rodzaju i jednoczesności wykonania różnych rodzajów robót. Stanowią one podstawę tworzenia szczególnych wariantów metod organizacji robót. Można je stosować w przypadku planowania realizacji kompleksu obiektów.

Modelując potok z zastosowaniem opracowanych algorytmów, zapewniamy odpowiednie powiązanie potoków, tworząc strukturę równoległą, szeregową lub ich kombinacje (metoda: równoległo-potokowa, równoległo-szeregową, równoległo-szeregowo-potokowa).

W praktyce zdarzają się sytuacje, kiedy w procesie realizacji niezbędne staje się wykorzystanie w sposób ciągły maszyn lub ich zestawów (maszyny do robót ziemnych, żurawie wieżowe) w potokach obejmujących kompleksy obiektów. Należy wówczas tak pogrupować ze sobą potoki, aby zapewnić np. ciągłość pracy w wiodących częściowych potokach¹

$$O = \{O_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.18)$$

gdzie n – liczba obiektów (frontów roboczych).

¹ Wiodący jest częściowy potok, którego czas trwania ma decydujący wpływ na termin realizacji kompleksu.

Planowane do wykonania roboty budowlane grupuje się w częściowe potoki

$$N = \{N_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (1.19)$$

gdzie m – liczba częściowych potoków (rodzajów robót).

Czasy wykonania poszczególnych robót na obiektach są zapisane w macierzy T

$$T = [t_{ij}], \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (1.20)$$

gdzie t_{ij} – czas wykonania j -tej roboty na i -tym obiekcie.

Zgodnie z przyjętym ograniczeniem wykonania wszystkich robót w potokach obejmujących kompleksy obiektów, przy założeniu ich równoległego wykonania, otrzymamy zależność

$$\sum_{j=2}^m t_j^R + \sum_{i=1}^n t_{im} + \Delta = T, \quad (1.21)$$

w której:

t_j^R – czas rozwinięcia kolejnych częściowych potoków,

Δ – różnica pomiędzy terminem zakończenia robót w pierwszym potoku i terminem rozpoczęcia robót w ostatnim częściowym potoku drugiej grupy obiektów,

T – czas realizacji kompleksu obiektów.

Przy założeniu bezkolizyjnej pracy brygad roboczych, przechodzących z obiektu na obiekt i z kompleksu na kompleks, wzajemne położenie potoków ulegnie zmianie.

Zachodzi warunek

$$t_{ij}^{wz} < t_{i+1,j}^{wr}. \quad (1.22)$$

W celu zapewnienia wzajemnego powiązania potoków obejmujących kompleks obiektów, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami, należy zapewnić

$$T \rightarrow \min. \quad (1.23)$$

W przypadku metod organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji oraz z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi zachodzi zależność

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{pz} \text{ oraz } t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{wr}. \quad (1.24)$$

Rozwiązanie zagadnienia powiązania potoków zgodnie z przyjętymi ograniczeniami przeprowadza się dla każdej ich pary.

Sporządzono macierz czasów realizacji T oraz dokonano podziału jej na podmacierze

$$T_k = [t_{ij}], \quad T_{k+1} = [t_{lp}]. \quad (1.25)$$

W podmacierzach T_k i T_{k+1} należy ustalić nową kolejność wierszy. Nowe podmacierze, będące podstawą do określenia czasów rozpoczęcia robót w sąsiednich potokach, oznaczono T'_k i T'_{k+1} . Następnie wyznacza się ich charakterystyki czasowe (terminy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych robót). Służą one do wyznaczania wektorów zanikania² T_k^z częściowych potoków w kompleksie k oraz wektorów rozwinięcia³ T_{k+1}^R częściowych potoków w kompleksie $k + 1$.

Po przyjęciu warunków

$$T_k^z = T_j^z \text{ i } T_{k+1}^R = T_j^R \quad (1.26)$$

wyznaczamy wektor rozwinięcia T^R dwóch częściowych potoków uformowanych z elementów wektorów T_k^z i T_{k+1}^R , zapewniając bezkolizyjne ich powiązanie

$$T_j^R = (\max) \left\{ \sum_{i=1}^n T_{i,j-1}^z - \sum_{i=1}^{n-1} T_{i,j}^R \right\}. \quad (1.27)$$

Zależność ta zapewnia minimalizację czasu realizacji zbioru kompleksów na drodze maksymalnego zbliżenia uformowanych pomocniczych częściowych potoków.

² Wektorem zanikania częściowych potoków T_j^z nazywamy czas, jaki upływa pomiędzy zakończeniem procesu j oraz procesu $j + 1$: $T_j^z = t_{i,j+1}^{pz} - t_{i,j}^{pz}$.

³ Wektorem rozwinięcia częściowych potoków T_j^R nazywamy czas, jaki upływa pomiędzy rozpoczęciem procesu j oraz $j + 1$: $T_j^R = t_{i,j+1}^{wr} - t_{ij}^{wr}$.

Podsumowanie

Przedstawione założenia metodologiczne rozszerzają problematykę planowania realizacji kompleksu robót budowlanych z zastosowaniem metod potokowej organizacji robót uwzględniających sprzężenia czasowe.

Nowe możliwości wariantów metod zapewniają znaczne rozszerzenie obszaru praktycznego ich stosowania. Uwzględniają one pojawiające się w praktyce budowlanej ograniczenia organizacyjne i technologiczne. Utworzenie zbioru wariantów organizacyjnych przez rozszerzenie pojęcia sprzężeń czasowych oraz tworzenie kombinacji metod (równoległo-szeregową, równoległo-potokową, równoległo-szeregowo-potokową) umożliwia planowanie realizacji z uwzględnieniem szczególnych ograniczeń.

Rozdział 2

Charakterystyka metod organizacji robót budowlanych uwzględniających sprzężenia czasowe

Jednym z czynników decydujących o efektywności prowadzenia robót budowlanych jest ich właściwa kolejność, uwzględniająca technologiczne i organizacyjne ograniczenia. Jest to problem zaliczany do deterministycznej teorii szeregowania zadań, o charakterze permutacyjnym, o $n!$ możliwych wariantach. W związku z tym traktowany jest jako zagadnienie o dużej złożoności obliczeniowej, z uwagi na wielką liczbę dopuszczalnych rozwiązań. W praktyce ustalenie racjonalnej kolejności prowadzenia robót jest możliwe na drodze zmiany kolejności robót na poszczególnych frontach roboczych. Sprawdzenie jednak wszystkich możliwych wariantów realizacyjnych, ze względu na złożoność obliczeniową problemów kombinatorycznych, byłoby trudne, a nawet niemożliwe. Stosuje się więc algorytmy podziału i ograniczeń (B&B) (np. [1, 18, 36, 80]), umożliwiające ukierunkowany przegląd obszaru rozwiązań. Są one bardziej efektywne od pełnego przeglądu wariantów realizacyjnych, z uwagi na stosunkowo dużą szybkość obliczeń, ale są jednak od nich mniej dokładne, umożliwiają bowiem znalezienie rozwiązania suboptymalnego.

W metodach organizacji robót budowlanych można stosować metody podziału i ograniczeń, umożliwiające ustalenie racjonalnej kolejności prowadzenia robót. Uwzględniają one specyfikę procesów budowlanych, ujętą przez wprowadzony wskaźnik, tzw. *granicznie możliwe minimum* – GMM, charakteryzujący węzły w budowanym – zgodnie z regułami metody podziału i ograniczeń – drzewie przeszukiwań.

Reguły eliminacji i wyboru

Zbiór algorytmów podziału i ograniczeń stosowanych do rozwiązywania problemu permutacyjnego można scharakteryzować za pomocą zestawu reguł.

Wśród nich na uwagę zasługują: reguła wyboru, pozwalająca ustalić następny wierzchołek drzewa przeszukiwań, w którym ma nastąpić proces podziału, oraz reguły eliminacji, umożliwiające aktywowanie wygenerowanych węzłów drzewa.

W metodach organizacji robót budowlanych przyjęto macierzowy zapis danych wejściowych

$$T = [t_{i,j}], \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m,$$

gdzie $t_{i,j}$ – czas wykonania roboty j na froncie i .

Zapis taki ułatwia podział na podzbiory, obejmujące wiersze macierzy, i tworzenie poziomów drzewa z ubywającą liczbą węzłów. Pierwszy poziom będzie liczyć n węzłów, ostatni natomiast – dwa.

Reguły eliminacji i wyboru stosują procedury obliczeniowe umożliwiające przejście z kolejnych poziomów drzewa i odrzucenie niektórych wygenerowanych wierzchołków. Służy temu algorytm określania charakterystyk liczbowych węzłów, za pomocą wskaźnika GMM (graniczne możliwe minimum). Ze względu na to, że metody organizacji robót budowlanych (np. [2, 4, 7, 33, 42, 52, 91, 93]) charakteryzują się różnymi właściwościami, węzły drzewa są opisywane w odmienny sposób, uwzględniający specyfikę metod. Poniżej przedstawiono algorytmy wyznaczania GMM dla metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i ich kombinacjami. W procesie badania różnych możliwych kolejności frontów roboczych korzysta się z tzw. drzewa wariantów.

W pierwszym etapie musimy rozważyć n wariantów ($i = 1, \dots, n$). Wariant ten polega na tym, że front roboczy i jest realizowany jako pierwszy, a kolejność pozostałych frontów nie jest ustalona. Dla każdego z tych wariantów liczymy tzw. granicznie możliwe minimum (GMM) czasu T , które ma tę właściwość, że jest mniejsze od czasu T_1 , obliczonego dla dowolnej kolejności frontów nieustalonych. Na zakończenie pierwszego etapu sprawdzamy, dla którego wariantu obliczone GMM_1 jest najmniejsze.

W drugim etapie rozwijamy kolejno zawsze ten wariant, dla którego GMM_1 jest aktualnie najmniejsze. Rozwijanie wariantu o pewnej liczbie s wierszy ustalonych polega na utworzeniu nowych wariantów o jeszcze jednym ustalonym wierszu spośród wierszy nieustalonych. Całą procedurę szukania kolejności frontów kończymy wtedy, gdy najmniejsze z dotychczas obliczanych GMM_1 jest realizowane tylko przez warianty o ustalonych wszystkich frontach, czyli na samym dole drzewa wariantów. Dzięki temu, że GMM_1 – obliczone dla wyżej wymienionych końcowych wariantów – jest równe T_1 , oraz dzięki temu, że GMM_1 nie może być mniejsze po rozwinięciu danego wariantu, podana procedura znajduje wszystkie możliwe kolejności frontów o najkrótszym czasie T realizacji całego kompleksu robót.

2.1. Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji

Metoda ta zapewnia ciągłość pracy grup roboczych, maszyn i urządzeń. Specjalizowane brygady przechodzą bez przerw, z działki na działkę, zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach. Jest to często spotykane ograniczenie organizacyjne.

Modelowanie potoku tą metodą przeprowadza się w dwu etapach. Wyznacza się racjonalną kolejność wykonywania robót na działkach (obiektach), z uwzględnieniem kryterium minimalizacji czasu, a następnie oblicza się czasowe charakterystyki niezbędne do sporządzania modelu graficznego (wykresów Gantta, cyklogramów, sieci zależności).

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego można znaleźć za pomocą zmodyfikowanego algorytmu S.M. Johnsona. Zapewnia on, wraz z metodą podziału i ograniczeń, racjonalną kolejność prowadzenia robót na działkach (obiektach), zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach oraz minimalizację czasu realizacji.

Metoda ta, umożliwiając planowanie ciągłej pracy grup roboczych, powoduje najczęściej przestoje frontów roboczych. Można je wyeliminować jedynie w przypadku modelowania potoków rytmicznych. W potoku formowanym tym sposobem, wraz ze wzrostem liczby działek roboczych, zwiększa się okres rozwinięcia częściowych potoków, tj. czas, jaki upływa pomiędzy wejściem na plac budowy kolejnych grup roboczych. Może to powodować, jak wykazały przeprowadzone przez autorów badania [1, 2, 3, 8], znaczne wydłużenie czasu realizacji zadania. Jest on z reguły dłuższy od czasu realizacji kompleksu obiektów, planowanych z zastosowaniem metody uwzględniającej równocześnie sprzężenia między środkami realizacji i frontami roboczymi.

W metodzie organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji stosujemy wzór na całkowity czas trwania realizacji całego kompleksu robót budowlanych z ciągłym wykorzystaniem środków realizacji

$$T = \sum_{j=2}^m t_j^r + \sum_{i=1}^n t_{im},$$

gdzie t_j^r jest czasem trwania rozwinięcia kolejnego częściowego potoku j , czyli różnicą czasów rozpoczęcia j oraz $(j - 1)$ -częściowego potoku.

Drugi składnik tej sumy, czyli

$$\sum_{i=1}^n t_{im},$$

nie zależy od kolejności wykonywania prac na poszczególnych frontach. W związku z tym poszukiwanie najkrótszego czasu T trwania realizacji całego kompleksu robót możemy ograniczyć do zminimalizowania pierwszego składnika, czyli

$$T_1 = \sum_{j=2}^m t_j^r.$$

Czas rozwinięcia t_j^r zależy od wzajemnej synchronizacji dwóch sąsiednich częściowych potoków i w związku z tym zależy od kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach roboczych. Można go wyrazić następująco

$$t_j^r = \max_{1 \leq k \leq n} \left[\sum_{i=1}^k t_{i,j-1} - \sum_{i=1}^{k-1} t_{i,j} \right], \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Jeżeli zależy nam tylko na jednym rozwiązaniu optymalnym, to wystarczy badać drzewo wariantów dopóty, dopóki dla jakiegoś w całości rozwiniętego wariantu (na samym dole drzewa) GMM_1 będzie aktualnie minimalne. Do pełnego przedstawienia procesu ustalania właściwej kolejności realizacji robót niezbędne jest określenie sposobu obliczania GMM_1 . Należy w tym celu korzystać z tzw. zmodyfikowanego algorytmu Johnsona, który umożliwia ustalenie właściwej kolejności frontów roboczych przy dwóch częściowych potokach (np. [1, 2, 3, 6, 62]).

Zmodyfikowany algorytm Johnsona (z uwzględnieniem zależności technologicznych i organizacyjnych robót budowlanych)

Dane wejściowe stanowi macierz 2-kolumnowa

$$A = [a_{i,k}], \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, 2,$$

która odpowiada dwóm sąsiednim częściowym potokom. W wyniku otrzymujemy macierz 3-kolumnową

$$B = [b_{i,k}], \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, 2, 3.$$

Dwie pierwsze kolumny macierzy **B** składają się z tych samych wierszy co macierz **A**, ale w kolejności wyznaczonej przez algorytm Johnsona. W trzeciej kolumnie znajdują się numery wyjściowe przemieszczanych wierszy z informacją, z którego frontu robót pochodzą.

Poniżej przedstawiono zmodyfikowany algorytm Johnsona, uwzględniający zależności specyficzne dla robót budowlanych.

Instrukcja	Komentarz
a) Wykonaj podstawienia $sg := 1$ $sd := n$	sg (ds) – numer aktualnie najwyższego (najniższego) wolnego wiersza
b) Znajdź indeksy i_0, k_0 takie, że $a_{i_0, k_0} = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ k=1,2}} a_{i,k}$	szukanie najmniejszej wartości w tablicy A (macierzy)
c) Jeżeli $k_0 = 1$, to wykonaj podstawienia $b_{sg,1} := a_{i_0,1}$ $b_{sg,2} := a_{i_0,2}$ $b_{sg,3} := i_0$ $sg := sg + 1$ Jeżeli natomiast $k_0 = 2$, to wykonaj następujące podstawienia: $b_{sd,1} := a_{i_0,1}$ $b_{sd,2} := a_{i_0,2}$ $b_{sd,3} := i_0$ $sd := sd - 1$	przemieszczenie w górę wiersza z elementem minimalnym z lewej strony przemieszczenie w dół wiersza z elementem minimalnym z prawej strony
d) Niech M będzie dużą liczbą, większą od wszystkich elementów macierzy A , np. $M = 30^{30}$ Wykonaj podstawienia: $a_{i_0,1} := M$ $a_{i_0,2} := M$	
e) Jeżeli $sg < sd$, to wracaj do punktu b), a jeśli $sg = ds$, to kończymy algorytm	badanie, czy zostały już wyczerpane wszystkie wiersze macierzy A

Przed przystąpieniem do badania drzewa wariantów należy obliczyć kolejno macierze pomocnicze $B^j, j = 1, \dots, (m - 1)$.

Macierz B^j powstaje dzięki zastosowaniu wcześniej opisanego algorytmu Johnsona dla macierzy danych A , złożonej z kolumn o numerach $j, (j + 1)$, czyli

$$A = [t_{ij}], \quad i = 1, \dots, n, \quad k = j, j + 1.$$

Obliczenie GMM_1 w przypadku, gdy są ustalone kolejno fronty (wiersze) o numerach $(u_1, \dots, u_s), s \leq n$. Oznaczmy przez D zbiór $(u_1, \dots, u_s)$, złożony z numerów ustalonych już wierszy.

Instrukcja	Komentarz
a) Dla każdego $j = 1, \dots, (m - 1)$ tworzymy macierz $C^j = [C_{i,k}^j], \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, 2$ następująco: i) dla wszystkich indeksów $i = 1, \dots, s;$ $k = 1, 2$ podstaw $C_{i,k}^j := t_{ui,j+1-1}$ ii) podstaw: $p := s + 1$ iii) dla kolejno wszystkich $i = 1, \dots, n$ wykonaj: jeśli $b_{i,3}^j \in D$, to podstaw: $p := p + 1;$ $C_{p,l}^j := b_{i,k}^j$ dla $k = 1, 2$	macierz C^j pokazuje relację pomiędzy sąsiednimi kolumnami pierwszych s wierszy zawiera już ustalone macierze wprowadzenie pozostałych wierszy według kolejności ustalonej przez macierz pomocniczą B^j
b) Dla wszystkich $j = 1, \dots, (m - 1)$ oblicz t_j^r $\max_{1 \leq k \leq n} \left[\sum_{i=1}^k c_{i,1} - \sum_{i=1}^{k-1} c_{i,2} \right]$	liczymy okres rozwijania drugiej kolumny macierzy C^j względem pierwszej
c) $GMM_1 = \sum_{j=1}^{M-1} t_j^r$	

2.2. Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

Podstawową właściwością metody jest możliwość planowania ciągłej pracy na frontach roboczych. Minimalny czas trwania realizacji kompleksu robót można otrzymać po ustaleniu takiej kolejności prowadzenia robót, przy której suma czasów realizacji pierwszego procesu budowlanego i zakończenia pozostałych jest najmniejsza. Analizując schematy graficzne potoku (cyklogramy) możemy zauważyć, że na czas realizacji kompleksu robót wpływa środkowy blok procesów budowlanych. Wykorzystano to w opracowanym algorytmie ustalania kolejności realizowanych obiektów, zapewniającej najkrótszy czas realizacji. Im większa część robót zostaje „ukryta” jako równoległa, tym mniejsza będzie wartość sumy czasów zakończenia. Przegląd możliwych kombinacji z wykorzystaniem drzewa wariantów i zastosowaniem pomocniczego wskaźnika GMM zapewni wybór racjonalnej kolejności prowadzenia robót na frontach. Po znalezieniu właściwej kolejności, wyznacza się podstawowe charakterystyki czasowe modelowanego tą metodą potoku.

Ciągłe prowadzenie robót na działkach jest możliwe wówczas, gdy dopuścimy przerwy w pracy grup roboczych. Mogą one przechodzić z działki na działkę natychmiast po zejściu z niej poprzedzającej brygady. Warunek ten jest możliwy do wypełnienia, gdy dana grupa robocza wykonała robotę na poprzedniej, w ustalonej kolejności, działce i oczekuje na zatrudnienie. Ograniczenie to ma wpływ na czas realizacji kompleksu obiektów, który jest z reguły dłuższy od czasu wyznaczonego z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi [1, 2, 3, 8].

Całkowity czas realizacji kompleksu robót w przypadku organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na poszczególnych frontach można przedstawić następująco:

$$T = \sum_{j=1}^{m-1} t_{1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,m} + \sum_{r=1}^{m-1} \Delta_r,$$

gdzie Δ_r jest dodatnią różnicą między częścią „ukrywaną” frontu $(r + 1)$ a „ukrywającą” frontu r , określoną wzorem

$$\Delta_r = \max \left\{ \bar{\Delta}_r, 0 \right\},$$

$$\bar{\Delta}_r = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left\{ \sum_{n=k}^{m-1} t_{r+1,j} - \sum_{j=k+1}^m t_{r,j} \right\}.$$

Liczby Δ_r są przerwami (przestojami), spowodowanymi niemożnością podjęcia pracy przez każdą z poprzednich brygad jednocześnie na dwóch frontach r i $(r + 1)$.

Podobnie jak w metodzie poprzedniej (p. 2.1), do zbadania różnych możliwych kolejności frontów roboczych stosuje się drzewo wariantów.

Należy określić wartość liczbową GMM (przy wierszach ustalonych), które jest mniejsze od czasu realizacji T przy dowolnej kolejności wierszy nieustalonych. W tym celu zdefiniujemy dwie macierze P, R .

Macierz

$$P = [P_i]_{J_k}, \quad k = 1, \dots, n,$$

zawiera w porządku malejącym liczby

$$\sum_{j=2}^m t_{ij}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Są to sumy wszystkich, oprócz pierwszego, elementów w danym wierszu.

Podobnie macierz

$$R = [q_{i,j}], \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, 2,$$

zawiera w pierwszej kolumnie w porządku malejącym liczby

$$\sum_{j=1}^{m-1} t_{ij}, \quad i = 1, \dots, n,$$

które są sumami wszystkich, oprócz ostatniego, elementów w danym wierszu. Druga kolumna zawiera natomiast numery wierszy (frontów) przed uporządkowaniem.

Ustala się kolejno wiersze o numerach $(u_1, \dots, u_s)$. Niech n_k oznacza numer wiersza k macierzy R , zawierającego na drugim miejscu liczbę nie należącą do zbioru $(u_1, \dots, u_s)$, czyli wiersza nieustalonego ($q_{n_k,2} \notin (u_1, \dots, u_s)$). Zdefiniujmy

$$d_k = p_k - q_{n_k,1}, \quad \text{dla } k = 1, \dots, (n - s).$$

Liczby d_k są hipotetycznymi wielkościami Δ_r dla wierszy nieustalonych. Po ustaleniu wszystkich wierszy możliwe przerwy (przestoje), czyli Δ_k będą większe.

Jeżeli podczas obliczania GMM we wzorze na czas T realizacji kompleksu robót zastąpimy Δ_r przez odpowiednie d_k , to otrzymamy graniczne możliwe minimum nie większe od czasu T . W razie dowolnej kolejności nieustalonych

jeszcze wierszy d_k wskaźnik ten zapewnia znalezienie optymalnego rozwiązania zagadnienia dzięki zastosowaniu drzewa wariantów

$$\text{GMM} = \sum_{j=1}^{m-1} t_{u1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,m} + \sum_{r=1}^{s-1} \Delta_r + \sum_{k=1}^{n-s} d_d,$$

gdzie:

$$\Delta_r = \max(\bar{\Delta}_r, 0),$$

$$\bar{\Delta}_r = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left[\sum_{j=k}^{m-1} t_{ur+1,j} - \sum_{j=k+1}^m t_{ur,j} \right].$$

Podobnie jak w poprzedniej metodzie, przeszukujemy drzewo wariantów, rozwijając zawsze wariant o aktualnie najmniejszym GMM, a kończymy postępowanie wtedy, gdy minimum jest realizowane tylko przez warianty o ustalonych wszystkich wierszach.

2.3. Metoda organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi

Najkrótszy czas realizacji kompleksu robót zapewnia **metoda organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi**.

Równoczesne uwzględnienie obu sprzężeń czasowych wywołuje w modelu potoku drogę krytyczną. Po zsumowaniu czasów wykonania robót pojawiających się na ścieżce krytycznej możemy wyznaczyć czas trwania robót T . Zmieniając kolejność prowadzenia robót na frontach (obiektach), dokonujemy przestawień robót na drodze krytycznej, a tym samym ulega zmianie czas trwania realizacji. Minimalny czas trwania realizacji kompleksu obiektów można uzyskać po ustaleniu takiej ich kolejności, że suma czasów trwania robót poprzedzających i zamykających wiodący częściowy potok lub kompleks będzie najmniejsza. Zakłada się przy tym, że droga krytyczna będzie prowadziła przez wiodący częściowy potok lub kompleks.

Zagadnienia kolejnościowe rozwiązuje się z wykorzystaniem metody podziału i ograniczeń, która umożliwia ukierunkowane przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań.

Po ustaleniu racjonalnej kolejności prowadzenia robót na działkach (obiektach) wyznacza się charakterystyki czasowe potoku, uwzględniając równocześnie dwa rodzaje sprzężeń: między środkami realizacji i frontami roboczymi. W metodzie tej dopuszcza się przerwy w pracy grup roboczych, a także przestoje frontów roboczych. Umożliwia to utworzenie takiej drogi krytycznej, która zapewnia najkrótszy czas realizacji zadania inwestycyjnego. Możliwość niezwłocznego wykorzystania brygad roboczych na zwalnianych działkach, bez ograniczeń dotyczących ciągłości ich pracy, znacznie skraca okres przestoju frontu lub oczekiwanie brygady na zatrudnienie. Osiągnięcie najkrótszego czasu realizacji kompleksu obiektów prezentowaną metodą powoduje jednak trudności w planowaniu równomiernego i ciągłego wykorzystania środków realizacji [1, 2, 3, 8]. Metoda ta różni się zasadniczo od dwóch pozostałych. Zakładamy w niej, że czas realizacji jest równy sumie czasów trwania robót na drodze krytycznej. Jest to ciąg robót, które muszą być wykonane sekwencyjnie, tj. jedna po drugiej, co wyklucza znalezienie czasu realizacji całego kompleksu robót krótszego od drogi krytycznej, wybranej w ściśle określony sposób.

W pierwszym etapie obliczamy sumy elementów w poszczególnych wierszach i kolumnach macierzy T , czyli

$$W_i = \sum_{j=1}^m t_{i,j}, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$K_j = \sum_{i=1}^n t_{i,j}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Następnie wyznaczamy największą z tych wielkości, czyli

$$M = \max \{ W_1, \dots, W_n, K_1, \dots, K_m \},$$

która jest realizowana dla wiersza lub kolumny macierzy. Zakładamy, że droga krytyczna przechodzi przez tak wyznaczony wiersz lub kolumnę.

Wartość GMM odpowiada minimalnej długości drogi krytycznej przechodzącej przez wybrany wiersz lub kolumnę przy wierszach ustalonych.

Jeśli ustalone będą kolejno wiersze o numerach $u_1, \dots, u_s$, $s < n$, to w przypadku drogi krytycznej przechodzącej przez wiersz i_0 wartość GMM określamy następująco

$$\text{GMM}_{i_0} = \sum_{k=1}^s t_{u_k,1} + \sum_{j=1}^m t_{i_0,j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \in \{u_1, \dots, u_s\}}}^n t_{i,m}.$$

Jeśli natomiast droga krytyczna przechodzi przez kolumnę j_0 , to GMM jest określone wzorem

$$\text{GMM} = \sum_{j=1}^{j_0-1} t_{u1,j} + \sum_{i=1}^n t_{i,j_0} + \min_{i \in \{u_1, \dots, u_s\}} \left\{ \sum_{j=j_0+1}^m t_{i,j} \right\}.$$

Gdy M jest realizowane dla kolumny, drzewo wariantów będzie bardzo rozbudowane i na ogół zostanie rozwinięte prawie całe poddrzewo (gałąź) odpowiadające wariantowi z jednym ustalonym wierszem. Graniczne możliwe minimum ma tę właściwość, że w miarę rozwijania drzewa jego wartość nie maleje; poszukiwany wariant będzie się znajdował na dole drzewa.

Jeśli maksimum M jest realizowane dla wiersza, to w miarę rozwijania gałęzi drzewa wariantów granicznego możliwe minimum może zarówno rosnać, jak i maleć, co uniemożliwia znalezienie minimalnego GMM bez przeszukiwania węzłów i gałęzi całego drzewa.

Algorytm ustalania minimalnego GMM

Jeśli $M = W_{i_0}$, to realizuj punkt a).

Jeśli $M = K_{j_0}$, to realizuj punkt b).

Jeżeli $M = W_{i_0} = K_{j_0}$, to należy realizować oba punkty a) i b).

a)	Instrukcja	Komentarz
i)	Dla wszystkich $i = 1, \dots, n$, ale oprócz $i = i_0$, podstaw $b_i = t_{i,1} - t_{i,m}$	obliczenie w każdym wierszu, oprócz wiersza o numerze i_0 , różnic między elementami pierwszej i ostatniej kolumny
ii)	Podstaw $b_{i_0} := 0$	
iii)	Wektor b_i , $i = 1, \dots, n$, należy wstawić w ciąg rosnący i do pierwszej kolumny macierzy [$C_{i,k}$], $i = 1, \dots, n$, $k = 1, 2$. W drugiej kolumnie umieścić listę numerów wyjściowych przed sor- towaniem, czyli $c_{1,2}$ jest numerem kolejnym liczby $c_{i,1}$ w ciągu b_i , $i = 1, \dots, n$	ponad wierszem i_0 znajdują się wiersze, w których element pierwszy jest mniejszy od ostatniego, a pozostałe pod tym wierszem

Ciąg $\{C_{1,2}\}$ $i = 1, \dots, n$ jest szukaną kolejnością frontów.

a) Należy zaznaczyć, że taką samą wartość GMM można też otrzymać dla innych kolejności. Możemy dowolnie przestawić między sobą wiersze umieszczone ponad wierszem krytycznym, a także osobno przestawić wiersze umieszczone pod wierszem krytycznym. Jeśli $i_1, c_{i_1,2} = i_0$ (czyli wiersz krytyczny został umieszczony jako i_1), to możemy dowolnie przestawiać pierwsze $(i_1 - 1)$ elementów w ciągu $(c_{1,2}) i = 1, \dots, n$, jak i również $(n - i_1)$, co nie wpłynie na wartość GMM.

b) Gdy droga krytyczna przechodzi przez określoną kolumnę o numerze j_0 , to jej długość zależy tylko od ustalenia pierwszego i ostatniego wiersza. Uzasadnione jest następujące oznaczenie: niech $\text{OPT}(i, j)$ oznacza, że zbiorem GMM kolejności frontów jest zbiór wszystkich ciągów (kolejności) o pierwszym elemencie i oraz ostatnim j .

b) Instrukcja	Komentarz
i) Dla wszystkich $i = 1, \dots, n$ wykonać podstawienia: $a_i := \sum_{j=1}^{j-1} t_{i,j}$ $b_i := \sum_{j=j_0+1}^m t_{i,j}$	a_i jest czasem potrzebnym na wykonanie wszystkich robót poprzedzających o numerze j_0 na i -tym froncie roboczym, natomiast b_i – analogicznie – dla robót następujących o numerze j_0
ii) Znajdź indeks r taki, że $a_r = \min_{1 \leq i \leq n} a_i$ oraz indeks s taki, że: $b_s = \min_{1 \leq i \leq n} b_i$	szukanie elementów najmniejszych
iii) Jeśli $r \neq s$, to $\text{OPT}(r, s)$ Jeśli $r = s$, to wykonujemy ciąg instrukcji: α) znajdź indeks r_1 taki, że $a_{r,1} = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ i \neq r}} a_i$ oraz indeks s_1 taki, że $b_{s,1} = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ i \neq s}} b_i$	szukanie elementów drugich z kolei
β) jeśli $a_r + b_{s,1} \geq a_{r,1} + b_s$, to gdy $a_r + b_{s,1} \leq a_{r,1} + b_s$, wówczas $\text{OPT}(r, s_1)$	badanie, która para (element minimalny, element drugi z kolei) daje minimalną wartość GMM

Omówione procedury służą do ustalania kolejności prowadzonych robót budowlanych na obiektach lub ich częściach (frontach, działkach roboczych). Podstawowym problemem w procesie obliczeniowym według schematu drzewa wariantów jest ustalenie wartości węzłów drzewa – granicznego możliwego minimum – GMM. Wskaźnik ten charakteryzuje ograniczenie technologiczne i organizacyjne, wyrażone za pomocą sprzężeń czasowych. Porównanie tych wartości umożliwia eliminowanie wariantów, nierokujących nadziei na lepszy wynik. Pozwala to określić kierunki przeszukiwania obszaru rozwiązań.

Przedstawione procedury umożliwiają ustalenie kolejności realizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji (p. 2.1) oraz sprzężeń między frontami roboczymi (p. 2.2). Uwzględnienie kolejności robót w metodach organizacji z drogą krytyczną przedstawiono w p. 2.3. Ze względu na tworzenie się drogi krytycznej w szerokim zbiorze metod organizacji robót budowlanych, przedstawiona procedura może być także stosowana w procesie budowy modeli organizacyjnych.

2.4. Metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi oraz sprzężeń diagonalnych lub odwrotnych diagonalnych

Algorytm poszukiwania kolejności realizowanych obiektów dla tych metod jest podobny do przedstawionego wcześniej. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na sposobie modelowania potoku. Wyznacza się dla każdej z nich charakterystyki czasowe potoku, z uwzględnieniem odpowiednio występujących sprzężeń.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że czasy realizacji kompleksu robót są z reguły dłuższe lub równe czasom uzyskiwanym metodą przedstawioną w p. 2.3.

2.5. Metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych

W tej metodzie roboty o jednakowej sumie indeksów w zapisie macierzowym tworzą diagonalny, których czas trwania jest równy czasom trwania

robót krytycznych. Zmiana kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach wpływa na zmianę zestawu robót krytycznych, co prowadzi do zmiany czasu trwania realizacji kompleksu robót. Minimalny czas wykonania robót można osiągnąć po ustaleniu takiej ich kolejności, że roboty o najdłuższym czasie trwania będą znajdowały się w jednym lub minimalnej liczbie diagonalów.

Podstawowe charakterystyki czasowe wyznacza się z uwzględnieniem odpowiednich sprzężeń diagonalnych i odwrotnie diagonalnych.

2.5.1. Zastosowanie sprzężeń czasowych w harmonogramowaniu robót budowlanych – przykład z praktyki wykonawczej

Zarządzanie procesem inwestycyjno-budowlanym odbywa się głównie na podstawie harmonogramów realizacyjnych. Od ich jakości (uwzględnienie specyfiki technologicznej, materiałowej dokładności i inne) zależy efektywność działań wykonawczych na placu budowy oraz właściwa koordynacja uczestników procesu budowlanego. Specjalizacja wykonawców robót powoduje, że niezbędne jest właściwe koordynowanie przebiegu poszczególnych procesów technologicznych. Firmy realizujące roboty budowlane i montażowe są związane z inwestorem lub generalnym wykonawcą umowami, określającymi wzajemne relacje prawne. W razie złej synchronizacji robót pojawiają się wzajemne roszczenia finansowe, w wyniku oczekiwania firm na wejście na fronty robót lub z uwagi na nieterminową realizacją procesów technologicznych. Zastosowanie sprzężeń czasowych ułatwia uzyskanie informacji o założeniach technologicznych, organizacyjnych, wielkościach przerw organizacyjnych, możliwych wariantach wykonawczych, rozszerzając zbiór informacji niezbędnych do podejmowania decyzji w procesie realizacyjnym.

W przedstawionym przykładzie podczas realizacji elementu budynku przemysłowego – konstrukcji dachu – uczestniczyło wiele firm. Wykonywały one swoje zadania we wzajemnej zależności technologicznej. Z procesem tym wiązała się także koordynacja dostaw materiałów, elementów budowlanych, pracy sprzętu (żurawi samochodowych, rusztowań, samochodów dostawczych) oraz grup roboczych.

Autor niniejszego opracowania był koordynatorem kontraktu obejmującego realizację elementu hali przemysłowej – dachu, uczestniczył w negocjacjach ofertowych, przygotowaniu zakresu i warunków umów inwestorskich i podwykonawczych, nadzorował proces realizacji robót.

Charakterystyka obiektu

Na terenie istniejącego zakładu przemysłowego, w związku z jego modernizacją, zaprojektowano i zrealizowano halę produkcyjną o powierzchni około 3500 m². Obiekt ten składał się z czterech części: adaptowanej nawy hali żelbetowej o nazwie roboczej „spawalnia”, części nowo projektowanej, hali transformatorów i przylegającego budynku administracyjno-socjalnego. Trzy pierwsze nawy są jednokondygnacyjne, budynek socjalny jest obiektem trzykondygnacyjnym. Konstrukcję nośną zaprojektowano jako stalowy układ słupowo-ryglowy, z suwnicą. Obiekt obudowany jest płytami warstwowymi systemu PANEL-TECH, mocowanymi do rygli.

Konstrukcja dachu została zaprojektowana z dwuprzęsłowych blach fałdowych typu TR 136/362, grubości 1,25 mm. Posadzki wykonano jako rozwiązanie systemowe na bazie żywic epoksydowych, zapewniając ochronę podłoża przed oddziaływaniem mechanicznym i chemicznym, gwarantując wysoki stopień czystości. Bramy wjazdowe zamontowano w systemie Hormann z automatycznym sterowaniem. Obiekt jest wyposażony w instalację elektryczną, wentylację, system ogrzewania gorącego powietrza z komorą kurzową, odwodnienie dachu i instalację p.poż. i inne.

Charakterystyka rozwiązań technologicznych

Konstrukcja nośna dachu

Konstrukcja nośna dachu została wykonana z blach trapezowych firmy Hoesch Siegerladuerke GmbH typu E 135,136/362, grubości 1,25 mm, powlekanych w kolorze Ral 9010. Blachy montowane były mechanicznie łącznikami systemowymi EJOT, na podporach oraz wzdłuż arkuszy.

Termoizolacja i paraizolacja

Na konstrukcji nośnej dachu ułożono paraizolację z folii PE oraz płyty Megatem do izolacji termicznej. Warstwy te zostały przykryte papą podkładową typu E shapers EW, przeznaczoną do mocowania mechanicznego. Cały wielowariantowy układ termoizolacji mocowany jest łącznikami systemu EJOT.

Hydroizolacja

Szczelność dachu zapewniono przez zastosowanie papy termozgrzewalnej nawierzchniowej Dakflex (SBS/SBS) zbrojonej włókniną poliestrową. Wszystkie obróbki elementów pionowych dachu, tj. kominów wentylacyjnych, podstaw pod wentylatory oraz podstawy pod pasmami świetlnymi, wykonane zostały jako systemowe.

Pasma świetlne

Hala produkcyjna jest oświetlana również światłem naturalnym przy zastosowaniu pasm świetlnych SDP BIK Isolight, wytwarzanych w systemie aluminiowych profili zaciskowych z płytami żebrowymi z poliwęglanu grubości 16 mm.

Odwodnienie dachu

Odwodnienie dachu zrealizowano w systemie podciśnieniowym GEBERIT PLUVIA. Zamontowano w konstrukcji dachu osiem wpustów odwadniających, zbierających wodę opadającą ze zlewni o powierzchni około 250 m², do pojedynczego odbiornika wody.

Charakterystyka rozwiązań organizacyjnych

Roboty budowlane zaczęto realizować po przedstawieniu generalnemu wykonawcy (GW) oferty technologiczno-cenowej oraz negocjacjach warunków realizacyjnych na podstawie umowy inwestorskiej. Firma wykonująca uzgodniony zakres robót zawarła umowy podwykonawcze z wyspecjalizowanymi firmami realizującymi wydzielone procesy technologiczne. Z uwagi na udział w procesie wykonawczym wielu firm, realizujących swoje zadania w powiązaniu z innymi, należało ściśle zsynchronizować tok prowadzenia robót, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości natychmiastowego udostępniania frontu robót. Sytuacja ta określiła warunek ograniczający wzajemne zależności technologiczne i organizacyjne, który został w sposób analityczny określony za pomocą zerowych sprzężeń między frontami roboczymi.

Podział obiektu na działki robocze

Uwzględniając naturalny podział obiektu, wynikający z różnic konstrukcyjnych, dokonano następującego podziału:

- ↳ działka nr 1 – „bazar” – 421,00 m²,
- ↳ działka nr 2 – „spawalnia” – 521,00 m²,
- ↳ działka nr 3 – „hala produkcyjna” – 1694,00 m²,
- ↳ działka nr 4 – „budynek socjalny” – 402,00 m².

Podział na procesy technologiczne (rodzaje robót)

Na podstawie określonej specyfikacji materiałowej oraz technologii wykonania robót dokonano podziału zadania inwestycyjnego na procesy technologiczne, realizowane przez wyspecjalizowane firmy – grupy robocze, zgodnie z zawartymi z nimi kontraktami, a mianowicie:

- ↳ ułożenie i montaż blachy trapezowej na konstrukcji nośnej obiektu,
- ↳ wykonanie paraizolacji, termoizolacji i hydroizolacji,
- ↳ wykonanie odwodnienia systemowego Geberit Pluvia,
- ↳ wykonanie doświetlenia obiektu w systemie SDP BIK Isolight.

W procesie realizacji uczestniczyły ponadto firmy przygotowujące fronty robót (poprzedzające sekwencyjnie):

↳ montaż konstrukcji stalowej hali,

↳ montaż obudowy obiektu w systemie Paneltech (wiązący uszczelnienie pokrycia dachowego z attyką budynku).

W procesie wykonawczym brały udział także firmy dostarczające elementy i materiały, między innymi:

↳ blachy konstrukcyjne trapezowe HOESCH Siegerlanduerte z Siegen, Niemcy,

↳ materiały hydroizolacyjne – Eshadak Verkoopmaatschappij BV,

↳ łączniki mechaniczne – EJOT Baubefestigungen GmbH (poprzez swoje przedstawicielstwa).

Przygotowanie danych wejściowych

Zastosowanie komputerowego systemu Organizator, podobnie jak opracowanie projektu organizacji robót budowlanych, wymagało wykonania następujących prac przygotowawczych. Na podstawie projektu budowlanego oraz wykonawczego opracowano przedmiar robót, z uwzględnieniem podziału obiektu na działki robocze oraz na specjalistyczne procesy technologiczne przedstawione wcześniej. Dla poszczególnych części zadania przygotowano tabelę wartości elementów skalonych, zawierającą dane o wartościach robocizny R , materiałów M i sprzętu S . Sporządzono też zestawienie podstawowych materiałów. Z uwzględnieniem danych zawartych w kosztorysie ofertowym, dotyczących nakładów jednostkowych, na podstawie KNR opracowano przewidywane czasy trwania robót na poszczególnych częściach obiektu (frontach roboczych). Następnie opracowano macierz czasów trwania robót z uwzględnieniem liczby pracowników w grupach roboczych realizujących wyodrębnione zadania.

Tabela 2.1

Macierz czasów trwania robót

Lp.	Rodzaje robót	Fronty robocze (dni)			
		bazar	spawalnia	hala transformatorów	budynek socjalny
1	2	3	4	5	6
1	Montaż blach trapezowych	4	0	13	4
2	Ułożenie izolacji (termo- i hydroizolacji)	3	1	10	3
3	Montaż odwodnienia GEBERIT PLUVIA	1	1	4	0

1	2	3	4	5	6
4	Montaż podstaw	2	2	10	0
5	Montaż pasm świetlnych	1	1	5	0
6	Obróbki kominów podstaw wentylatorów	3	3	11	2
7	Obróbki attyk, dylatacji	2	2	4	3

2.5.2. Zastosowanie komputerowego systemu Organizator do harmonogramowania robót budowlanych

Komputerowy system Organizator służy do wyznaczania optymalnej kolejności prowadzenia robót oraz do określania ich charakterystyk czasowych. Bazą są metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe. Zapewniają one możliwość wielowariantowej analizy sposobów wykonania zadania na podstawie charakterystyk czasowych:

- ↳ najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót,
- ↳ najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów zakończenia robót.

Program ten zapewnia ponadto wyznaczenie wartości sprzężeń czasowych w modelach organizacyjnych:

- ↳ między środkami realizacji,
- ↳ między frontami roboczymi,
- ↳ sprzężeń diagonalnych,
- ↳ sprzężeń odwrotnych diagonalnych,
- ↳ ogólnych rezerw czasu.

Jest to najnowsza wersja systemu OPTY i Potoki¹, umożliwiająca opracowywanie dokumentacji graficznej w postaci cyklogramów i sieci zależności.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano dane liczbowe – charakterystyki czasowe umożliwiające ścisłe określenie terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Ponadto zostały określone wartości liczbowe sprzężeń czasowych między frontami roboczymi, środkami realizacji oraz ogólne rezerwy czasu. Dane te zostały przedstawione w tabelach. Sprawdzone także wyniki dla kolejności robót sugerowanej przez inwestora. W wyniku optymalizacji otrzymano nowe kolejności realizacji robót.

¹ Programy te są w bibliotece programów komputerowych Zakładu Metod Projektowania i Realizacji Budowli Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej; w ich opracowaniu uczestniczył autor niniejszej pracy.

Podsumowanie

Zastosowanie sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi, sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych stworzyło podstawy organizacji robót budowlanych. W wyniku obliczeń komputerowych uzyskano zbiór danych liczbowych, umożliwiających podejmowanie decyzji w toku realizacji kontraktu. Stanowiły one ponadto uzasadnienie działań technicznych związanych z pojawiającymi się w procesie realizacji zakłóceniami (np. uwzględnienie zmian projektowych, błędy w wykonawstwie robót i inne). W tabeli 2.2 przedstawiono wyniki obliczeń komputerowych.

Tabela 2.2

Czas realizacji robót metodami organizacji (dla wczesnych terminów)

Wariant kolejności realizacji	Metoda I	Metoda II	Metoda III	Metoda IV	Metoda V
Kolejność sugerowana	67	68	65	65	65
Kolejność ustalona	63	62	62	62	62

Najkrótszy czas realizacji, po uwzględnieniu warunku natychmiastowego wejścia na udostępnione fronty robocze, zapewnia metoda II (czas realizacji 62 dni robocze), umożliwiając skrócenie czasu trwania robót o około 10%. Zerowe sprzężenia między frontami roboczymi, choć powodowały przerwy w pracy poszczególnych firm (co się zdarzało w praktyce) zapewniały warunek minimalnie możliwego czasu realizacji zadania kontraktowego. Znajomość skutków występowania sprzężeń czasowych i ich wpływ na czas realizacji pozwoliła uzasadnić podejmowane decyzje wykonawcze.

Rozdział 3

Macierzowe modele (MM) organizacji robót budowlanych

Racjonalne planowanie procesu realizacji kompleksu obiektów budowlanych wymaga wykorzystania odpowiednich modeli. W praktyce najczęściej są stosowane modele graficzne (wykresy liniowe, linie cykliczne, sieci zależności), umożliwiające odwzorowanie przebiegu robót w czasie.

Jedną z form modelu potoku mogą być macierze, przy czym rozróżniać będziemy macierz wejściową i pośrednie, przeznaczone do prowadzenia procesu poszukiwania kolejności realizowanych obiektów, oraz macierz końcową, zawierającą charakterystyki robót.

Wynik procesu ustalania kolejności robót na obiektach z uwzględnieniem kryterium minimalnego czasu zależy od prawidłowego zbudowania macierzy wyjściowej. Macierz czasów realizacji robót na frontach przez brygady robocze $T = [t_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, ma wymiar $n \times m$. Elementami macierzy mogą być czasy wykonania robót na frontach, wyznaczone na podstawie danych normatywnych lub po opracowaniu wyników badań statystycznych

$$t_{ij} = f(P_{ij}, B_{ij}),$$

gdzie:

t_{ij} – element macierzy,

P_{ij} – pracochłonność robót j na obiekcie i ,

B_{ij} – liczbowy skład brygady roboczej wykonującej j -ty proces na i -tym obiekcie.

3.1. Technika wyznaczenia czasów realizacji

Na przebieg procesów budowlanych mają wpływ pojawiające się podczas realizacji czynniki destabilizujące. Czasy wykonania robót na poszczególnych

frontach mogą ulegać odchyleniom od wartości określonych na podstawie danych normowych. Ważnym więc zadaniem jest możliwie rzetelne wyznaczenie czasów realizacji robót na frontach (t_{ij}) z uwzględnieniem losowego charakteru procesu realizacji.

Badania czasów wykonania robót na frontach wymagają zastosowania odpowiedniej skali dokładności oraz spełnienia warunku reprezentatywności. W budownictwie, ze względu na małą powtarzalność realizowanych obiektów, warunek reprezentatywności próby jest trudny do spełnienia. Istnieje także niebezpieczeństwo, że gromadząc statystyczne informacje o danym procesie, będziemy uwzględniać błędy organizacyjne czy technologiczne.

Na przykład w metodzie PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) założono, że czas trwania czynności jest zmienną losową o rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa według funkcji beta. Przyjęto, że czas oczekiwany (t_e) wykonania zadania wyraża się zależnością

$$t_e = \frac{t_a + 4 t_m + t_b}{6},$$

w której:

t_a – optymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania zadania,

t_m – najbardziej prawdopodobny czas trwania roboty,

t_b – pesymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania roboty.

Niedokładność tej metody polega na intuicyjnym określaniu optymistycznej, pesymistycznej i najbardziej prawdopodobnej wartości czasów trwania robót. Ma to bezpośredni wpływ na rzetelność wyników prowadzonych obliczeń. Przyjęcie założenia, że zmienne losowe są od siebie niezależne, jest zbytnim uproszczeniem wpływającym ujemnie na niezawodność opracowywanego harmonogramu.

Na podstawie teorii zbiorów rozmytych opracowano sposób wyznaczania terminu końcowego w sieci zależności, w której czasy wykonania robót są zbiorami rozmytymi.

Zbiór rozmyty D w przestrzeni X określa funkcja udziału

$$U_D : X \rightarrow [0,1].$$

Charakterystyczną cechą prezentowanego sposobu jest wyznaczenie zbioru możliwych terminów wykonania robót. Określenie terminu realizacji kompleksu robót polega na wyznaczeniu przedziału czasowego, którego rozpiętość zależy od pewności oszacowania czasów ich wykonania.

W metodach analizy sieciowej, np. GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*), CYKLON (*Cyclic Operations Network*), do określenia

czasów trwania robót można stosować kilkanaście rodzajów rozkładów prawdopodobieństw. W praktyce najczęściej korzysta się tylko z kilku z nich.

Badania nad wykorzystaniem czasu pracy grupy pracowników pozwalają oceniać zmienność wydajności brygad i straty wynikające z tej przyczyny. Prezentowana metodyka może służyć do wyznaczania czasów trwania robót na obiektach metodą Monte Carlo.

Interesujące wyniki z badań nad ustalaniem czasów wykonania robót przez brygady przedstawione zostały w pracach [123, 124]. Autor przedstawia sposób wyznaczania czasów realizacji zadań na obiektach z zastosowaniem wskaźnika wykonania normy czasu (φ), z uwzględnieniem korelacji między zdarzeniami, dla zadanej wielkości frontu roboczego. Sposób ten zaleca się stosować w przypadku planowania realizacji kompleksu obiektów.

Według doświadczeń zespołu W.I. Woropajewa statystyczną informację zaleca się opracowywać na podstawie codziennych (zmianowych) danych o ilościowym wykonaniu produkcji budowlanej w jednostkach rzeczowych, składzie brygad roboczych, zmienowości i o przyczynach przestojów pracy.

W przypadku zmiennych warunków wykonania określonych robót uzyskane dane zawierałyby skażoną informację, dlatego też sprowadza się ją do wyznaczenia wskaźnika wykonania normy czasu przyjętymi środkami

$$\psi = \frac{V_1 H_1 + V_2 H_2 + \dots + V_m H_m}{t^{\text{zm}} \sum_{j=1}^K B_j ZM},$$

gdzie:

$V_1, V_2, \dots, V_m$ – ilość wykonanych robót w jednostkach rzeczowych,

$H_1, H_2, \dots, H_m$ – normatywna pracochłonność robót,

t^{zm} – czas trwania zmiany roboczej,

B_j – liczba robotników w brygadzie,

ZM – liczba zmian roboczych,

$k = 1, 2, \dots$ – liczba brygad roboczych.

Wskaźniki wykonane normy czasu (ψ) mają rozkład prawdopodobieństwa odpowiadający funkcji beta, której parametry zależą od charakteru roboty

$$p(\psi) = \frac{G(\alpha + \beta + 2)}{G(\alpha + 1)(\beta + 1)(\beta - a)\alpha + \beta} (\psi - a)^\alpha (b - \psi)^\beta,$$

gdzie:

$$G(\psi) = \int_0^\infty t^{\psi-1} e^{-t} dt \text{ – funkcja gamma,}$$

α, β – parametry nieznane,

a, b – minimalna i maksymalna wartość ψ .

Traktując wskaźnik ψ jako zmieniającą się wartość w czasie, charakterystyki statystyczne: wartość oczekiwaną $E_\psi(t)$, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa $P(\psi, t)$, dyspersję $\delta^2(t)$, korelację $K_\psi(t_1, t_2)$ należy uznać za funkcję

$$E_\psi(t) = \frac{\sum_{j=1}^m \psi_j(t)}{m},$$

$\psi_j(t)$ – wskaźnik wykonania norm j -tej roboty w chwili t ,

m – liczba prób,

$$\delta^2(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [\psi_j(t) - \bar{M}_\psi(t)]^2}{m-1},$$

$$K_\psi(t_1, t_2) = \frac{\sum_{j=1}^m [\psi_j(t_1) - \bar{M}_\psi(t_1)][\psi_j(t_2) - \bar{M}_\psi(t_2)]}{m-1}.$$

Wyznaczone statystyczne charakterystyki służą do określenia czasu wykonania zadanych wielkości robót, czyli procesu wykonania robót na froncie. Po wygenerowaniu wartości losowych z zadaniem rozkładem prawdopodobieństw (np. metodą Neymana) i uwzględnieniu korelacji dziennych wydajności można wyznaczyć

$$\psi_m^x(t),$$

$$V_j = \psi_j^x \frac{t^{zm} B_j}{H_j},$$

gdzie:

ψ_j^x – zmodyfikowany wskaźnik wykonania norm czasu j -tego dnia,

V_j – ilość robót wykonana j -tego dnia,

t^{zm} – czas trwania zmiany,

B_j – liczba robotników w brygadzie,

H_j – norma czasu zgodnie z KNP.

Przyjmując kolejno ze zbioru zmodyfikowanych wskaźników ψ_j^x ($j = 1, 2, \dots$), otrzymujemy ciąg $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots$. Po zsumowaniu uzyskujemy ciąg monotoniczny

$$V'_1 = V_1,$$

$$V'_2 = V_1 + V_2,$$

.....

$$V'_j = V_1 + V_2 + \dots + V_j,$$

w którym znajdziemy taką wartość V'_j , że w dniu $t = j$ będzie równa w przybliżeniu zadanej objętości robót V_o

$$V_o = \sum_{j=1}^t V_j.$$

Modelowanie statystyczne procesu realizacji kompleksu obiektów umożliwia określenie sumy czynników losowych destabilizujących proces wznoszenia i prawdopodobieństwa ich występowania, co ma istotne znaczenie na etapie harmonogramowania, podczas określenia niezawodności procesu realizacji lub projektowania realizacji z zadaniem poziomem niezawodności. Warunkiem wyznaczania faktycznych czasów realizacji robót na obiektach jest przeprowadzenie obserwacji i zebranie danych statystycznych na obiektach reprezentatywnych i realizowanych poprawnie, zgodnie z zasadami sztuki budowlanej, bez przerw w pracy, spowodowanych brakiem materiałów itp. Podstawowym więc problemem, który należy rozwiązać, aby prawidłowo planować realizację kompleksu obiektów, jest wyznaczenie elementów macierzy wejściowej. Brak aktualnej bazy normatywnej oraz norm pracy technicznie uzasadnionych uniemożliwia opracowywanie realnych harmonogramów realizacyjnych.

3.2. Zmodyfikowany zapis macierzowy

Przed przystąpieniem do formowania macierzy czasów wykonania robót na frontach należy utworzyć: zbiór działek roboczych $d_i = \{d_i\} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ oraz zbiór częściowych potoków $p_j = \{p_j\} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$. Liczba działek roboczych oraz ich wielkość zależy od konstrukcji obiektów, przyjętej technologii robót, maszyn i urządzeń stosowanych podczas realizacji, składu osobowego i liczby brygad oraz wielkości zadania inwestycyjnego. Na podstawie

zaleceń publikowanych w wielu pracach związanych z omawianą tematyką oraz doświadczenia z praktyki przedsiębiorstw budowlanych, przyjęto przy podziale obiektów na fronty robocze zasadę bezkolizyjnej pracy brygady na działce. Ma ona bezpośredni wpływ na liczbę i wielkość frontów roboczych wyznaczonych na danym obiekcie.

Częściowe potoki p_j powstają w wyniku scalenia robót, przewidywanych do wykonania przez specjalizowane brygady, zgodnie z zasadami technologii i organizacji robót. Zbiór działek roboczych $\{d_i\}$ oraz częściowych potoków $\{p_j\}$ można traktować jako zbiór argumentów i wartości funkcji, przyporządkowując elementom ze zbioru działek kolejno przewidywane do wykonania roboty ze zbioru częściowych potoków. Wynikiem przyporządkowania jest macierz czasów wykonania robót na frontach roboczych $T = [t_{ij}]$. Elementy macierzy można wyznaczyć, posługując się aktualną bazą normatywną lub traktując czasy wykonania robót jako zmienne losowe, sposobami przedstawionymi w punkcie 3.1.

Przystępując do budowy macierzy, najdogodniej jest podzielić tę czynność na etapy. W etapie pierwszym określamy zbiór wektorów kolumnowych, odpowiadających poszczególnym rodzajom robót, wykonywanym przez specjalizowane brygady. Współrzędnymi tych wektorów są czasy wykonania danej roboty na działkach roboczych.

$$P_1 = \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ \dots \\ t_{i1} \\ \dots \\ t_{n1} \end{bmatrix} ; \dots, P_j = \begin{bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \\ \dots \\ t_{ij} \\ \dots \\ t_{nj} \end{bmatrix} ; \dots, P_m = \begin{bmatrix} t_{1m} \\ t_{2m} \\ \dots \\ t_{im} \\ \dots \\ t_{nm} \end{bmatrix} .$$

Jak wykazały obserwacje procesu realizacji, dokonane na licznych budowach, liczby elementów w wektorach mogą być różne, na skutek niejednakowej wielkości działek roboczych oraz ich liczby w kompleksie. Na przykład roboty ziemne prowadzone są najczęściej na działce obejmującej rzut całego obiektu lub części oddzielonej przerwą dylatacyjną, natomiast na przykład roboty wykończeniowe wykonywane są zwykle na działce obejmującej w rzucie poziomym segment budynku i kondygnacji w rzucie pionowym. Wynika stąd konieczność uporządkowania macierzy czasów wykonania robót, przez wprowadzenie tzw. „robót zerowych” (zerowych elementów w macierzy).

W etapie drugim budujemy macierz czasów wykonania robót przez specjalizowane brygady (T), grupując wektory kolumnowe w ustalonym porządku, wynikającym z technologii prowadzonych robót. Podczas budowy macierzy wejściowej w szczególnych przypadkach, uwzględniających zerowe elementy lub jednakowe liczby elementów w kolumnach, mogą pojawiać się trudności w obliczaniu charakterystyk czasowych modelowanego potoku. Rozwiązanie tego problemu, w przypadku niejednakowej liczby elementów w podmacierzach kolumnowych jest możliwe:

↳ przez zwiększenie wielkości działek, sumowanie czasów wykonania robót do wielkości dla działki największej w obiekcie lub kompleksie,

↳ przez podział macierzy czasów wykonania robót na podmacierze o jednakowej liczbie wierszy.

W praktyce modelowania kompleksu robót budowlanych przy zastosowaniu macierzy występują dwa przypadki:

↳ z niezerowymi elementami w macierzy,

↳ z zerowymi elementami w macierzy.

W budownictwie kubaturowym np. macierz czasów wykonania robót przez grupy robocze na danym obiekcie ma najczęściej postać:

↳ macierz wejściowa

$$t = [t_{ij}] = \begin{bmatrix} t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, \dots, t_{1h}, \dots, t_{1m} \\ 0 & 0 & 0 & t_{24}, \dots, t_{2j}, \dots, t_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & t_{i4}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & t_{n4}, \dots, t_{nj}, \dots, t_{nm} \end{bmatrix}.$$

W przedstawionej macierzy trzy pierwsze kolumny oznaczają, że roboty są wykonywane na działkach obejmujących cały obiekt. Pozostałe roboty, tj. nr 4, 5, ..., m są wykonywane na działkach (wiersze w macierzy) stanowiących część obiektu. Stosowana dotychczas forma zapisu danych wejściowych, polegająca na wprowadzeniu elementów zerowych do macierzy w przedstawiony sposób, może prowadzić do błędnych wyników. Model ten może jedynie służyć do wyznaczania charakterystyk czasowych potoku ustalonego z wykorzystaniem potokowych metod organizacji robót. Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego dla kompleksu obiektów (niezależnych segmentów) jest możliwe na drodze

↳ podziału macierzy na podmacierze

lub

↳ skalania czasów wykonania robót, do wielkości działki największej (sumowania elementów w kolumnach macierzy do odpowiednio najmniejszej liczby elementów).

Schemat podziału macierzy wejściowej na podmacierze:

$$T = [A; B],$$

$$A = [t_{11}, t_{12}, t_{13}],$$

$$B = \begin{bmatrix} t_{14}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{1m} \\ t_{24}, \dots, t_{2j}, \dots, t_{2m} \\ \dots \dots \dots \\ t_{i4}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{im} \\ \dots \dots \dots \\ t_{n4}, \dots, t_{nj}, \dots, t_{nm} \end{bmatrix}.$$

Schemat skalania czasów wykonania robót w kolumnach macierzy

$$T = [t_{11}, t_{12}, t_{13}, (t_{14} + t_{24} + \dots + t_{i4} + \dots + t_{n4}); \dots$$

$$(t_{1j} + t_{2j} + \dots + t_{ij} + \dots + t_{nj}), \dots$$

$$(t_{1m} + t_{2m} + \dots + t_{im} + \dots + t_{nm})],$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m.$$

3.3. Skalowanie modeli macierzy (SMM) organizacji robót budowlanych

Jednym z istotnych problemów związanych z organizacją robót jest dobór właściwego modelu przebiegu robót, umożliwiający optymalizację z kryterium minimum czasu. Z uwagi na powtarzające się cykle robocze, charakteryzujące się stałą powtarzalnością operacji roboczych, można zastosować modele macierzowe (MM) organizacji robót budowlanych. Zastosowanie modeli macierzowych umożliwia transponowanie potoków nierytmicznych wielorytmicznie i odwrotnie. Zagadnienie to może pojawić się w procesie planowania realizacji robót na wielu obiektach.

Sformułowanie problemu

Dany jest zbiór rodzajów robót do wykonania w ustalonym porządku technologicznym (według relacji poprzedzania)

$$R_1 \{ R_2 \{ R_j,$$

gdzie $j = 1, 2, \dots, m$.

Określony jest zakres robót na działkach

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_i\},$$

gdzie $i = 1, 2, \dots, n$

Ustalono zostały czasy trwania robót przedstawione w postaci macierzy T

$$T = [t_{ij}],$$

$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m$.

Należy tak ustalić wartość elementów macierzy, aby

$$t_{1j} = t_{2j} = \dots t_{nj}$$

oraz

$$t_{1j} \neq t_{1j-1} \neq t_{1j+1}.$$

Tworzenie nowej macierzy czasów trwania robót, uwzględniającej wielorytmiczny charakter potoku, wymaga spełnienia następujących podstawowych warunków:

↪ zapewnienie realizacji robót następujących na danym froncie roboczym

$$t_{ij} \{ t_{ij+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ zapewnienie realizacji robót poprzedzających na danym froncie roboczym

$$t_{ij-1} \{ t_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ możliwość przegrupowania robót na frontach, tj. odpowiedniego sumowania czasów ich trwania.

Algorytm harmonogramowania robót obejmuje następujące kroki:

Krok 1

Obliczenie charakterystyk czasowych robót zapisanych w macierzy T . Wyznaczenie charakterystyk czasowych robót obejmuje:

↪ określenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót

$$w_r = \{t_{ij}^{wr}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ określenie najwcześniejszych terminów zakończenia robót

$$w_z = \{t_{ij}^{wz}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ określenie najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót

$$p_r = \{t_{ij}^{pr}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ określenie najpóźniejszych terminów zakończenia robót

$$p_z = \{t_{ij}^{pz}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ sumy czasów trwania robót jednego rodzaju na wszystkich frontach

$$T_j = \sum_i^n t_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

↪ sumy czasów trwania robót wszystkich rodzajów na jednym froncie

$$T_i = \sum_j^m t_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Krok 2

Skalowanie modelu macierzowego (SMM), na podstawie uzyskanych wyników.

Faza 1

Określenie sumarycznych czasów trwania kolejnych rodzajów robót na podstawie macierzy kolumnowych

$$T_1 = [t_{i1}], \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$T_2 = [t_{i2}],$$

$$T_m = [t_{im}].$$

Faza 2

Ustalenie jednakowych czasów trwania robót dla poszczególnych macierzy jednokolumnowych przez rozdział sumy czasów trwania robót T_j na poszczególne fronty robocze i

$$T_j = \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ \dots \\ t_{nm} \end{bmatrix}.$$

Krok 3

Zestawienie macierzy końcowej z zeskalowanych macierzy jednokolumnowych.

Komputerowy system formowania macierzy wyjściowych

Na podstawie oryginalnych algorytmów, uwzględniających ograniczenia technologiczne i organizacyjne zbioru, opracowano program komputerowy. Rozwiązanie w przypadku modeli nierytmicznych potoków z dodatkowymi brygadami jednej specjalności przeprowadza się w dwu kolejnych krokach. Określa się racjonalną kolejność prowadzenia robót na poszczególnych frontach roboczych, następnie wyznacza się charakterystyki potoku dla metod organizacji robót ze sprzężeniami czasowymi.

Wiąże się z tym konieczność oprogramowania następujących algorytmów:

- ↳ wyznaczanie macierzy pracochłonności,
- ↳ wyznaczanie macierzy wyjściowej,
- ↳ wyznaczanie charakterystyk czasowych dla zbioru metod organizacji robót ze sprzężeniami czasowymi.

Wyznaczanie macierzy pracochłonności

Do wyznaczania macierzy pracochłonności zastosowano standardowy program. Komputerowy system kosztorysowania zapewnia opracowanie kompletnego kosztorysu, zawierającego kalkulacje katalogowe i indywidualne oraz:

- ↳ szczegółowe kalkulacje wszystkich pozycji katalogowych, wraz z ich pogrupowaniem na elementy scalone,
- ↳ szczegółowe rozliczenie kosztów jednorazowych transportu i sprzętu,
- ↳ podsumowanie kosztów bezpośrednich (R , M , S) w tabeli elementów scalonych oraz całego kosztorysu,
- ↳ wartości robót (wraz z dowolnymi narzutami, w ramach pozycji kosztorysowych, elementów scalonych i całego kosztorysu),
- ↳ zestawienie ujętych w kosztorysie środków (limity R , M , S) w odniesieniu do całego kosztorysu i poszczególnych elementów scalonych, z możliwością określenia przy każdym asortymencie zastosowanej ceny jednostkowej.

Po wprowadzeniu do komputera przedmiaru robót można uzyskać czas realizacji robót danego rodzaju. W zależności od potrzeb należy do pamięci komputera wprowadzić odpowiedni program. W skład niezbędnych programów i zbiorów wchodzi:

- ↳ program EBK – dotyczący zakładania i aktualizacji bazy katalogowej i cenowej,
- ↳ program OBM – służący do zakładania zbiorów transakcyjnych i przetwarzania kosztorysu,
- ↳ zbiór KONFIG DBF zawierający konfigurację zbiorów bazowych,
- ↳ zbiór TYTUL DBF.

Przed przystąpieniem do opracowania kosztorysu następuje kontrola, czy wszystkie niezbędne poprzednie funkcje zostały zrealizowane (tzn. korekta, uzupełnienie norm, wykonanie danych uzupełniających, weryfikacja po korektach). W wyniku uruchomienia programu otrzymuje się zbiór limitów określający nakłady robocizny dla poszczególnych robót na działkach roboczych.

Wyznaczenie macierzy wyjściowej

Dobór składu brygad

Ustalenie macierzy wyjściowej wymaga podania przez użytkownika systemu liczby pracowników w brygadzie. Wprowadzono również, na podstawie KNR, średnie składy brygad, dobrane do różnych rodzajów robót. Program zapewnia obliczenia czasów trwania robót prowadzonych przez brygadę.

Na podstawie opracowanej wcześniej macierzy pracochłonności można dokonywać, w określonych granicach, korekt składu liczbowego brygad, uzyskując nowe czasy realizacji robót. Taka struktura programu pozwala na wielowariantową ocenę możliwości zaangażowania różnych zespołów roboczych.

Program ZESPOŁY ExE został napisany w języku CLIPPE. Budowa macierzy wyjściowej dla metod równoległo-potokowych wymaga stosowania następujących zasad:

- ↳ wprowadzenia dla każdego częściowego potoku danych brygad; pozostałe wprowadza się jako równoległe do odpowiednich częściowych potoków,

- ↳ ustalenia składu i liczby dodatkowych brygad jednej specjalności, na podstawie warunku zbliżonego czasu wykonania poszczególnych rodzajów robót,

- ↳ wprowadzenia w pierwszej kolejności dodatkowych brygad jednej specjalności do wykonania robót krytycznych o najdłuższym czasie trwania,

- ↳ wprowadzenia w pierwszej kolejności dodatkowych brygad jednej specjalności do wykonania najbardziej długotrwałych robót krytycznych,

- ↳ wprowadzenia dodatkowych brygad do tych rodzajów robót, które potrzebują minimalnych dodatkowych środków realizacji w celu wykonania robót w planowanym terminie.

Przydział frontów roboczych dla brygad

Każda brygada porusza się po swoich frontach roboczych według własnego schematu. Marszruty brygad mogą być spowodowane względami technicznymi, technologicznymi lub organizacyjnymi. Gdy nie ma takiego ograniczenia, schemat przejścia brygad z działki na działkę można wyznaczać teoretycznie na początku budowy macierzy wyjściowej.

Po wprowadzeniu podziału częściowych potoków na potoki szczegółowe występują „zerowe roboty” na tych samych frontach. Wynika to z faktu, że

brygady o tej samej specjalności nie mogą jednocześnie prowadzić robót na jednym froncie. Zostało to uwzględnione w odpowiednim zapisie macierzowym dla każdej z metod organizacji robót uwzględniających sprzężenia czasowe, podczas obliczania charakterystyk robót. Przypisując brygadę do frontu roboczego, poszukuje się tej, która zakończyła pracę na poprzednim froncie. Gdy takich brygad jest kilka, wówczas program wybiera brygadę o najniższym numerze.

Wyznaczanie charakterystyk czasowych

Macierz wejściowa do obliczania charakterystyk czasowych potoku jest trójwymiarowa. Oprócz dwóch podstawowych wymiarów, tj. frontu i potoku, dochodzi trzeci wymiar – brygada. Macierz wejściowa jest wprowadzana jako dwuwymiarowa, a następnie zostaje przetworzona w macierz trójwymiarową.

Rozdział 4

Zarządzanie czasem realizacji procesów budowlanych z uwzględnieniem następstw technologicznych

4.1. Charakterystyka metody

W przypadku kompleksu robót powiązanych zależnościami technologicznymi możemy je synchronizować, zapewniając równoległe ich wykonanie oraz uwzględniając oddziaływanie sprzężeń diagonalnych i odwrotnych do nich. Dotyczy to zależności pomiędzy najwcześniejszymi i najpóźniejszymi terminami rozpoczęcia i zakończenia robót.

W metodzie organizacji robót z uwzględnieniem oddziaływania sprzężeń diagonalnych i odwrotnych do nich [8] roboty jednego stopnia tworzą diagonalę, których czas trwania jest równy czasom trwania robót krytycznych. Choć w diagonalu może występować kilka robót krytycznych (z jednakowym czasem trwania), to do określenia czasu trwania kompleksu robót bierze się pod uwagę tylko jedną robotę krytyczną.

Czas wykonania kompleksu robót można przedstawić w postaci

$$T = \sum_{q=1}^{n+m-1} t_{ijq},$$

gdzie:

- T – czas trwania realizacji kompleksu z krytycznymi robotami z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych,
- t_{ijq} – czas trwania krytycznej roboty j -tego rodzaju na i -tym froncie roboczym, wyznaczającej czas trwania q -tego diagonalu,
- $n + m - 1$ – liczba diagonalów.

Przechodząc od zagadnień związanych z równoległością kompleksów robót budowlanych do problemów o mniejszej skali wzajemnej zależności, można je harmonizować z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Sprzężenia te pozwalają na nakładanie warunku równoległości, dotyczącego poszczególnych robót budowlanych. Uwzględniając wzajemne zależności pomiędzy momentami rozpoczęcia i zakończenia, możemy zastosować metodę organizacji robót budowlanych, wraz z jej wariantami, charakteryzującą się jednoczesnym oddziaływaniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. W zagadnieniu można wyodrębnić trzy zasadnicze etapy. W etapie pierwszym (tab. 4.1) buduje się pierwszą serię pośrednich macierzy, w których ustala się kolejno wszystkie wiersze wyjściowej macierzy. Następnie określa się perspektywiczne macierze, wskazując gałęzie, które należy rozwijać w budowanym jednocześnie dendrycie. Są to macierze, w których granicznie możliwe minimum (GMM) czasu trwania realizacji kompleksu robót osiągnęło wartość najmniejszą.

Tabela 4.1

Etap I – macierz z ustalonymi kolejno wierszami w miejsce pierwszego wiersza

Fronty robocze		Rodzaje robót							
		1	2	...	j	...	...	$m-1$	m
U	t_{k1}	t_{k2}	ETAP I	wiersz	ustalony	(U)		$t_{k,m-1}$	t_{km}
	2	t_{21}	t_{22}					$t_{2,m-1}$	$t_{2,m}$
	j								
	...								
	n	$t_{n,1}$	$t_{n,2}$					$t_{n,m-1}$	$t_{n,m}$

W drugim etapie rozwiązania (tab. 4.2) buduje się serie macierzy, ustalając – w zależności od liczby wierszy wyjściowej macierzy – dwa, trzy ... lub $n - 2$ wierszy (frontów roboczych). Etap drugi należy więc podzielić na fazy, w których kolejno ustalone pierwsze wiersze otrzymuje się z macierzy wskazanych jako perspektywiczne w poprzednich etapach i fazach. Następny wiersz otrzymuje się z kolejnych wierszy wyjściowych macierzy. Analiza kolejności postępowania jest taka jak w pierwszym etapie. Należy przy tym pamiętać, że jeżeli granicznie możliwe minima określone w drugim etapie będą większe lub równe GMM otrzymanym w poprzednim etapie, to od tej chwili musi się również i te gałęzie z poprzedniego etapu uważać za perspektywiczne. Dopiero wtedy, gdy rozpatrzymy wszystkie konkurencyjne macierze, wskazując, które gałęzie drzewa wariantów należy rozwijać, możemy przejść do ostatniego etapu rozwiązania.

Tabela 4.2

Etap II – macierz budowana w fazach pośrednich

Fronty robocze		Rodzaje robót							
		1	2	...	j	...	...	$m-1$	m
	i_{F1}^p								
	k_{F2}^p								
	U			ETAP II – wiersz ustalony w fazie k					
	...								
	$n-1$								
	n	$t_{n,1}$	$t_{n,2}$					$t_{n,m-1}$	$t_{n,m}$

i_{Fk}^p – wiersze perspektywiczne wyznaczone w fazach pośrednich.

W trzecim etapie rozwiązania nie wprowadza się macierzy pośrednich, a formowane macierze są wariantami końcowymi, które jednoznacznie określają położenie wszystkich wierszy, czyli ustalają wszystkie częściowe kompleksy (częściowe fronty). Równocześnie warunkowy wskaźnik GMM przechodzi w realny czas realizacji kompleksu robót T .

Końcowe macierze mają $n-2$ wiersze, ustalone w poprzednich etapach rozwiązania jako perspektywiczne. W jednej gałęzi dendrytu rozwiniętej do końca mamy tylko dwie możliwe kombinacje. Liczba macierzy finalnych, które należy rozwiązać, jest więc podwójną wielokrotnością (wykazanych na poprzednich etapach) gałęzi perspektywicznych.

Obliczanie charakterystyk czasowych

Rozwiązanie polega na wyznaczeniu najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, drogi krytycznej, wartości liczbowych sprzężeń w najwcześniejszych i najpóźniejszych terminach, rezerw czasu oraz minimalnego czasu realizacji całego kompleksu. Po przyjęciu oznaczeń podanych w macierzy (tab. 4.1 i 4.2), wielkości możemy wyznaczyć z następujących zależności:

↪ Najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót wyznacza się ze wzorów:

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i+1,j-1}^{wr}; t_{i-1,j+1}^{wr} \},$$

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{wr} + t_{ij}.$$

Oznacza to, że podczas wyznaczania najwcześniejszych terminów rozpoczęcia roboty j na froncie i należy uwzględnić sprzężenie diagonalne od robót w bezpośrednio poprzedzającym częściowym potoku i równocześnie w bezpośrednio następującym częściowym kompleksie frontu $i + 1$, robót $j - 1$ oraz odwrotne sprzężenie diagonalne od robót w następnym częściowym potoku i równocześnie w bezpośrednio poprzedzającym częściowym froncie $i - 1$ robót $j + 1$. Najwcześniejsze terminy zakończenia robót j na froncie i wyznacza się przez sumowanie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia tych robót oraz czasów trwania ich realizacji.

✦ Najpóźniejsze terminy zakończenia robót j na froncie i wyznacza się z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych od robót w bezpośrednio poprzedzającym częściowym froncie i równocześnie w bezpośrednio następującym częściowym potoku $j + 1$ oraz odwrotnego sprzężenia diagonalnego od robót w bezpośrednio następujących na częściowym froncie $i + 1$ i równocześnie w bezpośrednio poprzedzającym częściowym potoku $j - 1$.

$$t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i-1,j+1}^{pz}; t_{i+1,j-1}^{pz} \},$$

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}.$$

Sprzężenia między środkami realizacji dla najwcześniejszych terminów wyznacza się jako różnicę pomiędzy najwcześniejszymi terminami zakończenia danej roboty j na froncie $i - 1$ i najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia tej roboty na froncie i

$$S_{ij}^{sw} = t_{i-1,j}^{wz} - t_{i,j}^{wr}.$$

Podobnie sprzężenia między frontami dla najwcześniejszych terminów wyznacza się jako różnicę między najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia danych robót j frontu i oraz najwcześniejszymi terminami zakończenia robót je poprzedzających $j - 1$ na częściowym froncie i

$$S_{ij}^{fw} = t_{ij}^{wr} - t_{i,j-1}^{wz}.$$

Dla najpóźniejszych terminów sprzężenia między środkami realizacji wyznacza się z zależności

$$S_{ij}^{sp} = t_{i+1,j}^{pr} - t_{i,j}^{pz}.$$

Podobnie sprzężenia między frontami roboczymi dla najpóźniejszych terminów wykonania robót wyznacza się ze wzoru

$$S_{ij}^{fp} = t_{i,j+1}^{pr} - t_{i,j}^{pz}.$$

Rezerwy czasu stanowią różnicę pomiędzy najpóźniejszymi i najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia robót, a także pomiędzy najpóźniejszymi i najwcześniejszymi terminami zakończenia robót

$$R_{ij} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}^{wr} - t_{ij} = t_{ij}^{pr} - t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}^{wz}.$$

4.2. Warianty metody

Analizując wzajemne oddziaływanie wymienionych powyżej sprzężeń czasowych, możemy zauważyć, że nakładają one na roboty zależności wywołujące ich równoległe położenie na osi czasu. Dotyczy to czterech możliwych sytuacji, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Kombinacje tych charakterystyk są połączeniem metod kolejnego i równoległego wykonania.

Wariant 1 – łączący terminy rozpoczęcia robót dla najwcześniejszych terminów

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} \quad (4.1)$$

$j-1$	j	$j+1$	
		$\boxed{wr}$ $t_{i-1,j+1}$	$i-1$
	$\boxed{wr}$ t_{ij}		i
$\boxed{wr}$ $t_{i+1,j-1}$			$i+1$

Definicja

$$\bigwedge_{i \in W} \bigvee_{N \subset W} f(x_1) = a \wedge f(x_2) = b \wedge f(x_3) = c \Rightarrow a = b = c,$$

gdzie $N = \{x_1, x_2, x_3\}$.

Wzór (4.1) nakłada praktyczny warunek wykonawczy, polegający na konieczności jednoczesnego rozpoczęcia, kolejnych w porządku technologicznym robót $j-1$, j oraz $j+1$ na sąsiednich frontach roboczych $i-1$ i oraz $i+1$. Roboty te, pomimo różnych czasów ich trwania, rozpoczynają się jednocześnie i są prowadzone równoległe. Na skutek oddziaływania zerowych sprzężeń są nimi ze sobą związane, tworząc grupę równoległe wykonywanych robót.

Wariant 2

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad (4.2)$$

$j-1$	j	$j+1$	
		$t_{i-1,j+1}$ $\boxed{pr}$	$i-1$
	$\boxed{pr}$ t_{ij}		i
$\boxed{pr}$ $t_{i+1,j-1}$			$i+1$

Definicja

$$\bigwedge_{y \in PY \subset P} \bigvee f(y_1) = a \wedge f(y_2) = b \wedge f(y_3) = c \Rightarrow a = b = c,$$

gdzie $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$.

Wzór (4.2) zapewnia równoczesność „późnego rozpoczęcia” robót $j-1$, j oraz robót $j+1$. Są one realizowane sekwencyjnie i uzależnione od siebie порядkiem technologicznym. Roboty te, różniące się technologią wykonania, są realizowane równolegle na niezależnych frontach roboczych. Jest to często występująca sytuacja z praktyki wykonawczej.

Wariant 3 – łączący najwcześniejsze terminy zakończenia robót

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j-1}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (4.3)$$

$j-1$	j	$j+1$	
		$\boxed{wz}$ $t_{i-1,j+1}$	$i-1$
	$\boxed{wz}$ t_{ij}		i
$\boxed{wz}$ $t_{i+1,j-1}$			$i+1$

Definicja

$$\bigwedge_{u \in PV \subset P} \bigvee f(u_1) = a \wedge f(u_2) = b \wedge f(u_3) = c \Rightarrow a = b = c,$$

gdzie $V = \{u_1, u_2, u_3\}$.

Wzór (4.3) nakłada na roboty budowlane warunek ich jednoczesnego zakończenia. Choć ich czasy trwania mogą być różne, to przy jednoczesnym ich zakończeniu będą prowadzone w końcowej fazie równolegle. Rozpoczęcie ich może być zróżnicowane. Roboty te występują na różnych frontach roboczych, które są niezależne organizacyjnie. Procesy technologiczne są uporządkowane sekwencyjnie, tj. $t_{j-1} < t_j < t_{j+1}$. Jest to przypadek praktyczny, występujący podczas realizacji różnych technologicznie robót na różnych obiektach lub ich częściach.

Wariant 4 – łączący terminy zakończenia robót dla późnych terminów

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} \quad (4.4)$$

$j-1$	j	$j+1$	
		$t_{i-1,j+1}$ pz	$i-1$
	t_{ij} pz		i
$t_{i+1,j-1}$ pz			$i+1$

Definicja

$$\bigwedge_{x \in W} \bigvee_{x \in W} f(x_1) = a \wedge f(x_2) = b \wedge f(x_3) = c \Rightarrow a = b = c,$$

gdzie $X = \{x_1, x_2, x_3\}$.

Wzór (4.4) określa warunek jednoczesnego zakończenia robót różnych rodzajów, $j-1, j, j+1$, na różnych obiektach lub ich częściach. Dotyczy on najpóźniejszych terminów zakończenia robót. Skutkiem tego jest sytuacja z praktyki wykonawczej, gdy roboty te są prowadzone w ostatniej swojej fazie równolegle. Terminy ich rozpoczęcia mogą być różne, z uwagi na niejednakową ich pracochłonność, lecz zakończenie ich wykonywania musi nastąpić jednocześnie.

Przedstawione warianty organizacji robót budowlanych zapewniają równoległe prowadzenie robót różnymi technologiami, na różnych obiektach lub ich częściach (frontach roboczych). Zapewniają ten warunek zerowe sprzężenia diagonalne i odwrotne diagonalne, występujące jednocześnie w modelach organizacyjnych. Są one czynnikiem umożliwiającym synchronizację robót w kompleksie (grupie), porządkując je zgodnie z przyjętą ich technologiczną sekwencją.

4.3. Właściwości metody

W zbiorze wariantów organizacyjnych, uwzględniając szczególny sposób oddziaływania sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych dla wczesnych i późnych terminów robót, można wyróżnić metodę z organizacją robót w diagonalach. W zapisie macierzowym roboty o jednakowej sumie indeksów elementów tworzą diagonalę związane zależnościami technologicznymi i organizacyjnymi. Dotyczy to robót kolejnych w porządku technologicznym na kolejnych frontach roboczych. Zerowe sprzężenia diagonalne i odwrotne diagonalne wyznaczają przedział czasowy, w którym powinny być one zrealizowane. W diagonalu pojawia się jedna lub kilka robót o najdłuższym czasie trwania – jest to robota krytyczna wyznaczająca wymiar diagonalu, tj. dla głównego diagonalu

$$\{t_{1,n}, t_{2,n-1}, \dots, t_{m,1}\} \xrightarrow{\max} t_q,$$

gdzie:

n – liczba wierszy macierzy (frontów robót),

m – liczba kolumn macierzy (rodzajów robót),

q – robota krytyczna w głównym diagonalu macierzy.

Wybierając ze zbioru robót w diagonalu robotę krytyczną, należy stwierdzić, że część robót może być wykonana w dowolnym czasie w przedziale

$$t_{i,j}^{wr} \text{ i } t_{i,j}^{pz},$$

będą więc one miały rezerwy czasu.

Należy zauważyć, że roboty te będą charakteryzowały się równoległością ich przebiegu w przedziale czasowym. Stanowiąc będą grupę robót o równoległo-potokowej strukturze i powszechnie pojawiają się w procesie realizacji. Skutki intuicyjnego zarządzania procesem budowy mogą powodować zakłócenia przebiegu, kolizje, nieoczekiwane przestoje i inne zjawiska.

Niezbędne staje się określenie podstawowych parametrów robót, tj. terminów rozpoczęcia i zakończenia oraz wartości sprzężeń czasowych, a także wyznaczenie kolejności robót na frontach, aby dokonać ich racjonalnej synchronizacji z uwzględnieniem kryterium optymalizacji w postaci funkcji czasu.

Na podstawie analizy macierzy czasów trwania robót można wskazać sytuacje zaobserwowane w praktyce wykonawczej, że czasy trwania robót diagonalnych mogą być jednakowe. Wzrasta więc liczba robót krytycznych w zbiorze, a w diagonalach krytyczne stają się wszystkie prace. W szczególnym przypadku jednakowe czasy trwania wszystkich robót, tj. jednakowe elementy macierzy, wskazują na rytmiczny charakter potoku.

Właściwości wariantów organizacyjnych

W przypadku zerowych sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych dla późnych i wczesnych terminów

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr}$$

oraz

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1, j+1}^{pz} = t_{i+1, j-1}^{pz}.$$

Definicja

$$\bigwedge_{x \in W} V f(x_1) = a \wedge f(x_2) = b \wedge f(x_3) = c \Leftrightarrow a = b = c$$

oraz

$$\bigwedge_{y \in N} V f(y_1) = d \wedge f(y_2) = e \wedge f(y_3) = f \Rightarrow d = e = f,$$

gdzie:

$$W = \{x_1, x_2, x_3\},$$

$$N = \{y_1, y_2, y_3\}.$$

Zależność ta nakłada na przebieg robót budowlanych warunek polegający na wyznaczeniu granicznych wartości czasowych, tj. terminów rozpoczęcia i zakończenia, dla robót związanych z relacjami na sąsiednich frontach roboczych oraz dla kolejnych technologicznie procesów budowlanych. Z uwagi na różne czasy trwania robót (na skutek zróżnicowanej wielkości frontów robót oraz pracochłonność) niektóre z nich będą krytyczne, a niektóre będą mieć zapasy czasu. Znajomość tych wielkości pozwoli na podjęcie właściwych decyzji przez zarządzającego procesem realizacji.

Analiza relacji występujących pomiędzy robotami, wobec przyjętych ograniczeń technologicznych (np. rozpoczęcie robót różnego rodzaju na wielu frontach roboczych limitowane dostawami materiałów lub ich transportem pionowym) lub organizacyjnych (w postaci np. dostępności grup roboczych itp.), pozwala na sformułowanie kilku właściwości.

Twierdzenie 1

Dana jest macierz czasów trwania robót T z zerowymi sprzężeniami diagonalnymi i odwrotnymi diagonalnymi. Jeżeli ustalona została minimalna liczba robót krytycznych, to jest ona równa sumie rodzajów robót (liczbie kolumn w macierzy – m) i częściowych frontów (liczbie wierszy w macierzy – n), bez jednego, a maksymalna ich liczba jest równa ich iloczynowi.

D o w ó d

Oznaczmy: q – liczba robót krytycznych, m – liczba rodzajów robót, n – liczba frontów roboczych.

W macierzy T można wyznaczyć $m + n - 1$ diagonalów q (tj. elementów mających jednakową sumę indeksów w macierzy).

Dla najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów

$$\bigwedge_{x \in W} V f(x_1) = a \wedge f(x_2) = b \wedge f(x_3) = c \Leftrightarrow a = b = c,$$

gdzie $W = \{x_1, x_2, x_3\}$.

W każdym diagonalu macierzy może więc być wyznaczona nie mniej niż jedna robota krytyczna, dla T

$$\{t_{ij}, t_{i-1, j+1}; t_{i+1, j-1}\} \rightarrow \max t_q,$$

więc

$$\min \sum_{q=1}^{n=m-1} t_{ij1} = T.$$

Liczba elementów w macierzy: $I \times n = L$

$$\bigwedge_{y \in P} V f(y_1) = a \wedge f(y_2) = b \dots f(y_m) = C \wedge f(y_n) = d \Rightarrow a = b = c = d,$$

gdzie $P = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,

tj. wartości elementów macierzy są jednakowe, wszystkie elementy są więc krytyczne

$$m \times n = L.$$

W n i o s e k

W procesie realizacji robót budowlanych bezpieczeństwo wykonania kontraktu zależy od liczby robót krytycznych w kompleksie. Minimalna liczba robót krytycznych zmniejsza ryzyko niedotrzymania terminu określonego w umowie. Zakłócenia pojawiające się w procesie realizacji mają wpływ na czas wykonania robót, a zwłaszcza na roboty krytyczne, mające bezpośredni wpływ na termin wykonania robót budowlanych.

Twierdzenie 2

Dana jest macierz czasów trwania robót z wyznaczonymi diagonalami. Jeżeli ustalona została minimalna liczba robót krytycznych, to czas trwania kompleksu robót jest równy sumie czasów robót krytycznych w diagonalach macierzy.

D o w ó d

Na podstawie przyjętej do rozważań ustalonej liczby diagonalów q w macierzy T , równej $m + n - 1$, można wyznaczyć w każdym diagonalu q wartość największą (tj. krytyczną) a

$$\bigwedge_{j \in N} V f(y_1) = a \Rightarrow a = \max \{t_{i-1, j+1}, t_{ij}, t_{i+1, j-1}\}.$$

Czas trwania kompleksu robót

$$T = \sum_{q=1}^{n+m-1} a_q,$$

gdzie: a – czas trwania roboty krytycznej w diagonalu q , równy sumie największych wartości elementów w diagonalach macierzy (robót krytycznych).

Wniosek

Podczas planowania przebiegu robót budowlanych ustala się najczęściej proces wiodący, tzn. ciąg robót o najdłuższych czasach trwania. Są to najczęściej roboty krytyczne, decydujące o powodzeniu realizacji – wykonaniu zadania w umownym terminie. Sumując czasy trwania robót krytycznych, kontrolując ich przebieg, zapewniamy realizację kompleksu budowlanego zgodnie z przyjętym harmonogramem prac.

Twierdzenie 3

Jeżeli dana jest macierz czasów trwania robót z wyznaczonymi diagonalami, to roboty niekrytyczne mają rezerwy czasu, które można traktować jako planowane przestoje. Rezerwy te dla wczesnych i późnych terminów są jednakowe.

D o w ó d

W macierzy o rozmiarach $m \times n$ ustalono liczbę diagonalów q , równą $m + n - 1$. W każdym diagonalu można wyznaczyć wartość największą odpowiadającą krytycznej robocie a .

Dla tej roboty S^{sW} i S^{sP} oraz S^{tW} i S^{tP} są równe zeru

$$\bigwedge_{z \in M} V f(z_1) = a \wedge f(z_2) = a \dots \wedge f(z_n) = a,$$

gdzie $M = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$.

W zbiorze y znajduje się robota krytyczna a oraz roboty niekrytyczne o wartościach mniejszych od a .

Możliwości:

$$z_1 = a \Rightarrow S^{sw} = S^{sp} = S^{fw} = S^{fp} = 0,$$

$$z_1 < a \Rightarrow S_{sw} = S_{fp} > 0$$

oraz

$$S_{sp} = S_{fw} > 0.$$

Dla robót niekrytycznych sprzężenia czasowe mają wartości większe od zera. W sytuacjach skrajnych, gdy roboty niekrytyczne rozpoczynają się w momencie t_{ij}^{wr} lub następuje ich zakończenie t_{ij}^{pz} , wartości rezerw czasu są jednokowe, gdyż:

$$t_{ij}^{wr} + t_{ij} + \Delta = t_{ij}^{pz}$$

oraz

$$t_{ij}^{pz} - t_{ij}^{wr} - \Delta = t_{ij},$$

gdzie: Δ – wartość rezerwy czasu dla roboty t_{ij} .

Wniosek

Dla robót niekrytycznych pojawiające się nieuniknione przestoje mogą stanowić zagrożenie niedotrzymania terminu. Wywołują kolizje z innymi robotami, powodują zamrożenie środków. Dlatego świadomość pojawiających się zapasów czasu i możliwość określenia ich wartości pozwala na podjęcie w procesie realizacji decyzji i przygotowanie rozwiązań technicznych umożliwiających zaplanowanie robót pomocniczych, zorganizowanie dodatkowych zadań, przygotowanie dodatkowych materiałów i konstrukcji na alternatywnych frontach roboczych.

Twierdzenie 4

Jeżeli w macierzy czasów trwania robót zostały wyznaczone diagonały w układzie RF (rzędne – fronty robocze), to po przetransponowaniu w układ RP (rzędne – rodzaje robót), charakterystyki czasowe robót nie ulegają zmianie.

D o w ó d

W macierzy T na wyznaczenie parametrów czasowych w diagonalach mają wpływ sprzężenia diagonalne i odwrotnie diagonalne

$$\bigwedge_{z \in B} V f(z_1) = c \wedge f(z_2) = c \dots \wedge f(z_n) = c,$$

gdzie $B = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$,

dla sprzężeń odwrotnych diagonalnych

$$\bigwedge_{y \in D} V f(y_1) = c \wedge f(y_2) = c \dots \wedge f(y_n) = c,$$

gdzie $D = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$.

Wniosek

Po przetransponowaniu macierzy np. z układu RF (rzędne – fronty robocze) w układ RP (rzędne – rodzaje robót) lub odwrotnie, wartości funkcji $f(z)$ i $f(y)$ nie ulegają zmianie – charakterystyki czasowe robót t_{ij}^{wr} i t_{ij}^{pz} będą miały te same wartości w diagonalach q macierzy T . W praktyce realizacji robót budowlanych nie ma to wpływu na czytelność uzyskania wyników obliczeń, stanowić one będą podstawę do graficznego przedstawienia planu przebiegu robót.

Twierdzenie 5

Jeżeli w macierzy czasów trwania robót zostały ustalone diagonalny z wyznaczonymi robotami krytycznymi, to wykonanie robót poprzedzających w późnych terminach, a następujących we wczesnych, zapewnia minimalizację sprzężeń między środkami realizacji.

Dowód

W kompleksie robót budowlanych są ustalone roboty krytyczne q w każdym z diagonalów, które nie mają rezerw czasu. Pozostałe roboty niekrytyczne mają rezerwy czasu i ich realizacja może nastąpić w przedziale czasu pomiędzy najwcześniejszym terminem rozpoczęcia t_{ij}^{wr} i najpóźniejszym terminem jej zakończenia t_{ij}^{pz}

$$\bigwedge_{n \in Z} V f(n_1) = a \wedge f(n_2) = b \dots \wedge f(n_n) = g,$$

gdzie $Z = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$.

W zbiorze Z można znaleźć wartości, dla których

$$n_1 = a \Rightarrow S^{sw} = S^{sp} = 0.$$

Wniosek

Sprzężenia między środkami realizacji S^{sw} dla wczesnych terminów oraz S^{sp} dla późnych będą minimalne lub równe zero. Zapewniony zostanie waru-

nek ciągłości robót danego rodzaju (np. ziemnych, fundamentowych, montażowych i innych).

Twierdzenie 6

Jeżeli w macierzy czasów trwania robót zostały ustalone diagonały z wyznaczonymi robotami krytycznymi, to wykonanie robót poprzedzających we wczesnych terminach, a następujących w późnych terminach, zapewnia minimalizację sprzężeń między frontami roboczymi.

Dowód

W kompleksie robót budowlanych, zgodnie z przyjętymi założeniami, można wyznaczyć w każdym diagonale roboty krytyczne. Pozostałe roboty niekrytyczne mają rezerwy czasu i ich realizacja może przebiegać dowolnie na odcinku czasu pomiędzy t_{ij}^{wr} i t_{ij}^{pz} , tj. najwcześniejszym terminem rozpoczęcia i najpóźniejszym terminem zakończenia

$$\bigwedge_{w \in Y} V f(w_1) = x$$

oraz

$$\bigwedge_{x \in W} V f(x_1) = y,$$

tzn. że można znaleźć wartości x i y , dla których

$$S^{fw} = S^{fp} = 0.$$

Wniosek

Sprzężenia między frontami roboczymi, w przypadku realizacji robót poprzedzających dla wczesnych terminów oraz robót następujących dla późnych terminów, są minimalne z możliwych. W praktyce budowlanej oznacza to spełnienie powyższych warunków, tj. zapewnienie minimalizacji przestojów na frontach roboczych podczas wykonywania robót różnych rodzajów (np. ziemnych, fundamentowych, konstrukcyjnych i innych).

Twierdzenie 7

Jeżeli w macierzy czasów trwania robót zostały ustalone diagonały z robotami krytycznymi, to zwiększenie intensywności robót danego rodzaju (w częściowym potoku) powoduje skrócenie czasu realizacji kompleksu robót tylko wtedy, gdy w skład częściowego potoku będzie wchodzić robota krytyczna.

D o w ó d

W zapisie macierzowym możliwy jest podział na wiersze, kolumny i diagonalę. Układ RP – rzedne fronty robocze powoduje, że kolumny macierzy odpowiadają rodzajom robót – częściowym potokom. Zmiana intensywności robót na podstawie decyzji zarządzającego procesem realizacji może wpływać na zmianę czasu realizacji kompleksu robót. Skrócenie czasu realizacji nastąpi w przypadku, gdy robota krytyczna będzie elementem częściowego potoku

$$\bigwedge_{z \in Z} V f(z_1) = x \wedge f(z_2) = q \Rightarrow q \in Z \vee q \in Z.$$

Jeżeli:

$\zeta q \in Z$, to robota krytyczna należy do diagonalu q oraz do zbioru elementów kolumny macierzy,

$\zeta q \in Z$, to robota krytyczna należy do diagonalu q , nie jest natomiast elementem zbioru elementów kolumny macierzy.

W n i o s e k

W praktyce realizacji obiektów budowlanych spotyka się przypadki, kiedy zwiększanie intensywności robót danego rodzaju, np. niektórych robót wykończeniowych, nie wpływa na skrócenie terminu realizacji obiektu budowlanego. Dotyczy to robót, w kompleksie w których nie ma roboty krytycznej. Jest to powszechny błąd organizacyjny. Należy w procesie realizacji intensyfikować tylko te rodzaje robót, w których zestaw wchodzi robota krytyczna – tylko ona bowiem decyduje o czasie realizacji robót. Skracanie pozostałych robót może wywoływać przestoje na frontach roboczych oraz powodować przerwy w pracy grup roboczych, sprzętu, zwiększanie zapasów materiałów itp.

Twierdzenie 8

Jeżeli w macierzy czasów trwania robót zostały ustalone diagonalę q , z wyznaczonymi w nich robotami krytycznymi, to zmiana kolejności realizacji robót na frontach roboczych powoduje zmianę czasu trwania realizacji kompleksu robót.

D o w ó d

W wyniku zmiany kolejności realizacji robót na frontach roboczych ulega zmianie układ diagonalów w macierzy czasów trwania robót i zestaw robót krytycznych

$$\bigwedge_{x \in W} V f(x_1) = T_1 \wedge f(x_2) = T_2 \vee, \dots, \vee f(x_n) = T_n,$$

gdzie $W = \{x_1, x_1, \dots, x_n\}$.

Za pomocą funkcji $f(x_n)$ można wyznaczyć całość T_n , odpowiadającą terminowi realizacji kompleksu robót. Dla każdej wartości argumentu ze zbioru można uzyskać różne czasy trwania robót T , w przypadku różnej kolejności realizacji robót na frontach.

Wniosek

W wyniku zastosowania procedury poszukiwania racjonalnej kolejności realizacji robót na frontach można znaleźć taką kolejność, która zapewni najkrótszy czas realizacji kompleksu robót budowlanych.

Rozdział 5

Analiza wariantów oddziaływania sprzężeń czasowych

W rozdziale tym przedstawiono analizę możliwych relacji sprzężeń czasowych z uwzględnieniem zależności technologicznych, odwzorowanych w macierzy czasów trwania robót. Dotyczy to przypadku elementów macierzy o jednakowej sumie indeksów. Analizę prowadzi się w celu zbadania realności wielu możliwych wariantów organizacyjnych wynikających z uwzględnienia parametrów czasowych, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót w diagonalach. Ze względu na dodatkowe zależności między robotami w kompleksie, np. sekwencyjność procesów budowlanych, równoległość frontów roboczych, opracowano algorytmy obliczeniowe umożliwiające wyznaczenie parametrów czasowych robót. Procedury obliczeniowe opracowano dla możliwych przypadków z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń.

W analizie ograniczono się do prezentacji podstawowych wariantów dotyczących zależności pomiędzy najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia i najpóźniejszymi ich zakończenia. Dotyczą one robót związanych następstwami technologicznymi.

Pełna analiza wariantów i przypadków wzajemnych zależności z oceną praktycznej przydatności została przedstawiona w pracy doktorskiej K. Gawrona [37].

• **Wariant 1** – uwzględniający sprzężenia łączące najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót

Założenie

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5.1)$$

wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i-1,j-1}$		$t_{i-1,j}$		$t_{i-1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i,j-1}$		$t_{i,j}$		$t_{i,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i+1,j-1}$		$t_{i+1,j}$		$t_{i+1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz

- **Wariant 2** – uwzględniający sprzężenia łączące najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót
Założenie

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.2)$$

wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i-1,j-1}$		$t_{i-1,j}$		$t_{i-1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i,j-1}$		$t_{i,j}$		$t_{i,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i+1,j-1}$		$t_{i+1,j}$		$t_{i+1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz

- **Wariant 3** – uwzględniający sprzężenia łączące najwcześniejsze terminy zakończenia robót
Założenie

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j-1}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.3)$$

wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i-1,j-1}$		$t_{i-1,j}$		$t_{i-1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i,j-1}$		$t_{i,j}$		$t_{i,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i+1,j-1}$		$t_{i+1,j}$		$t_{i+1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz

• **Wariant 4** – uwzględniający sprzężenia łączące najpóźniejsze terminy zakończenia robót

Założenie

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.4)$$

<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i-1,j-1}</i>		<i>t_{i-1,j}</i>		<i>t_{i-1,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>
<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i,j-1}</i>		<i>t_{i,j}</i>		<i>t_{i,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>
<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i+1,j-1}</i>		<i>t_{i+1,j}</i>		<i>t_{i+1,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>

5.1. Analiza wariantów organizacji robót budowlanych

Do analizy przyjęto warianty 1. oraz 4. ze względu na szczególne znaczenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót i najpóźniejszych terminów ich zakończenia. Charakterystyki te decydują o szczególnym charakterze robót w zapisie macierzowym.

5.1.1. Analiza przypadku uwzględniającego sprzężenia łączące najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót

Założenie

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} \quad (5.1.1)$$

<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i-1,j-1}</i>		<i>t_{i-1,j}</i>		<i>t_{i-1,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>
<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i,j-1}</i>		<i>t_{i,j}</i>		<i>t_{i,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>
<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>	<i>wr</i>	<i>wz</i>
<i>t_{i+1,j-1}</i>		<i>t_{i+1,j}</i>		<i>t_{i+1,j+1}</i>	
<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>	<i>pr</i>	<i>pz</i>

Wzór (5.1.1) określa zasadę wzajemnej zależności dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót. Oznacza on, że rozpoczęcie robót na wszystkich sąsiednich działkach dla uporządkowanych technologicznie robót musi nastąpić jednocześnie.

Na podstawie wyników analizy tego przypadku można zauważyć, że zachodzi tu sytuacja równoległości prowadzonych robót j frontu i , robót $j + 1$ frontu $i - 1$ oraz robót $j - 1$ frontu $i + 1$, z warunkiem jednoczesnego ich rozpoczęcia.

Definicja

$$\bigwedge_{x_1, x_2, x_3 \in p} \bigvee_{H \subset P} f(h_1) = x_1 \wedge f(h_2) = x_2 \wedge f(h_3) = x_3 \Rightarrow x_1 = x_2 = x_3,$$

gdzie:

$$H = \{x_1, x_2, x_3\},$$

H – podzbiór najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót, dla których $t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr}$,

p – zbiór terminów rozpoczęcia robót na sąsiednich frontach roboczych,

P – zbiór terminów rozpoczęcia robót,

h_1, h_2, h_3 – nakłady pracy w roboczo- lub maszynogodzinach, wyznaczone na podstawie bazy normatywnej,

$f(h_1)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu i ,

$f(h_2)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu $i - 1$,

$f(h_3)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu $i + 1$.

W rozpatrywanym wariancie określono możliwość wystąpienia następujących przypadków:

$$1) x_1 > x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_1,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = x \Rightarrow t_{i+1, j-1}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$2) x_1 > x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_1,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = x \Rightarrow t_{i+1, j-1}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$3) x_1 > x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_1,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = x \Rightarrow t_{i+1, j-1}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$4) x_1 = x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_1 = x_2,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x \Rightarrow t_{i+1, j-1}^{wr} = x;$$

$$5) x_1 = x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$6) x_1 = x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$7) x_1 < x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 > x_3 = x_2,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1, j+1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr} = x;$$

$$8) x_1 < x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$9) x_1 < x_2 \wedge x_1 > x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$10) x_1 > x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$11) x_1 > x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$12) x_1 > x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} \Rightarrow x_1 = x_2 = x_3,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr} = x \Rightarrow t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$13) x_1 > x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$14) x_1 > x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$15) x_1 > x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_3,$$

$$\text{czyli: } t_{i+1, j-1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$16) x_1 = x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$17) x_1 = x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_1 = x_2 = x_3,$$

$$\text{czyli: } t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr} = x;$$

$$18) x_1 = x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$19) x_1 = x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$20) x_1 = x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$21) x_1 = x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_3,$$

$$\text{czyli: } t_{i+1, j-1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} = x;$$

$$22) x_1 < x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_2,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1, j+1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr} = x;$$

$$23) x_1 < x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$24) x_1 < x_2 \wedge x_1 = x_3 \wedge x_2 < x_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$25) x_1 < x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 > x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_2,$$

czyli: $t_{i-1,j+1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} = x$;

$$26) x_1 < x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 = x_3 \Rightarrow x = \max\{x_1, x_2, x_3\} = x_2 = x_3,$$

czyli: $t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} = x$;

$$27) x_1 < x_2 \wedge x_1 < x_3 \wedge x_2 < x_3 = x_3,$$

czyli: $t_{i+1,j-1}^{wr} = x \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} = x$.

Algorytm wyznaczania charakterystyk czasowych robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych

Założenia podstawowe

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci zbioru obiektów

$$O = \{O_i\}, \quad i = 1, \dots, n,$$

na których będą prowadzone roboty przez wyspecjalizowane firmy

$$F = \{F_i\}, \quad i = 1, \dots, p,$$

Na każdym obiekcie O należy wykonać określone w kosztorysie roboty

$$P_j = \{P_j\}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Założenia dodatkowe

a) procesy robocze mają być wykonywane na działkach roboczych w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu $P_{i,k-1}$, a przed rozpoczęciem procesu $P_{i,k+1}$,

b) grupy robocze przechodzą z działki roboczej na działkę roboczą w sposób ciągły,

c) procesy budowlane powinny być wykonywane kolejno na działkach O_i , tj. sprzężenia diagonalne łączą terminy najwcześniejszego rozpoczęcia danego procesu P_j na działce O_i z terminem rozpoczęcia następnego w kolejności procesu P_{j+1} na działce O_{i-1} , a sprzężenia odwrotne diagonalne łączą terminy rozpoczęcia procesu P_j na O_i z terminem rozpoczęcia poprzedzającego procesu P_{j-1} na obiekcie O_{i+1} .

Schemat algorytmu wyznaczania terminów robót

Dana jest macierz czasów wykonania procesów roboczych na działkach w ustalonej uprzednio kolejności ich realizacji $T = [t_{ij}]$.

Faza 1 – wyznaczamy termin rozpoczęcia i zakończenia roboty w pierwszym diagonale macierzy T .

Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na pierwszym obiekcie przyjmujemy równy zeru. Termin zakończenia procesu wyznaczamy ze wzoru

$$t_{11}^{wz} = t_{11}^{wr} + t_{ij} = 0 + t_{ij}.$$

Faza 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w drugim diagonale.

Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na drugim obiekcie przyjmujemy równy zeru, czyli

$$t_{21}^{wr} = 0.$$

Pozostałe terminy wyznaczamy z warunku

$$t_{12}^{wr} = t_{11}^{wz}.$$

Tworzymy zbiór terminów rozpoczęcia kolejnych robót na sąsiednich obiektach (drugi diagonal)

$$R_1 = \{t_{21}^{wr}, t_{12}^{wr}\}.$$

Wybieramy najwcześniejszy termin rozpoczęcia robót w drugim diagonale $\{t^{wr}\}_2$ z warunku

$$\{t^{wr}\}_2 = \max R_1 = \max \{t_{21}^{wr}, t_{12}^{wr}\}.$$

Wartość ta stanowi podstawę do wyznaczania pozostałych charakterystyk robót w diagonale

$$t_{12}^{wz} = \{t^{wr}\}_2 + t_{12},$$

$$t_{21}^{wz} = \{t^{wr}\}_2 + t_{21}.$$

Faza 3 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w trzecim diagonale.

Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na trzecim obiekcie przyjmujemy równy zeru, czyli

$$t_{31}^{wr} = 0.$$

Pozostałe terminy wyznaczamy z warunków

$$t_{13}^{wr} = t_{12}^{wz},$$

$$t_{22}^{wr} = t_{21}^{wz}.$$

Tworzymy zbiór terminów rozpoczęcia kolejnych robót leżących w 3. diagonalu

$$R_3 = \{t_{31}^{wr}, t_{13}^{wr}, t_{22}^{wr}\}.$$

Wybieramy najwcześniejszy termin rozpoczęcia robót w 3. diagonalu $\{t^{wr}\}_3$ z warunku

$$\{t^{wr}\}_3 = \max R_3 = \max \{t_{31}^{wr}, t_{13}^{wr}, t_{22}^{wr}\}.$$

Wartość ta umożliwia wyznaczenia pozostałych najwcześniejszych terminów zakończenia robót w 3. diagonalu

$$t_{13}^{wz} = \{t^{wr}\}_3 + t_{13},$$

$$t_{22}^{wz} = \{t^{wr}\}_3 + t_{22},$$

$$t_{31}^{wz} = \{t^{wr}\}_3 + t_{31}.$$

Faza q – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w diagonalu q , gdzie $q > n$, n – liczba frontów roboczych.

Wszystkie terminy rozpoczęcia wyznaczamy z warunków

$$t_{n2}^{wr} = t_{n1}^{wz},$$

$$t_{n+1,3}^{wr} = t_{n+1,2}^{wz},$$

$$t_{2,k-1}^{wr} = t_{2,k-2}^{wz},$$

$$t_{1k}^{wr} = t_{1,k-1}^{wz}.$$

Tworzymy zbiór terminów rozpoczęcia kolejnych robót leżących w diagonalu q

$$R_q = \{t_{1k}^{wr}, t_{2,k-1}^{wr}, \dots, t_{n-1,3}^{wr}, t_{n2}^{wr}\}.$$

Wybieramy najwcześniejszy termin rozpoczęcia robót w diagonalu q , czyli $\{t^{wr}\}_q$ z warunku

$$\{t^{wr}\}_q = \max R_q = \max \{t_{1k}^{wr}, t_{2,k-1}^{wr}, \dots, t_{i,k-n}^{wr}\}.$$

Wartość ta stanowi podstawę do wyznaczenia pozostałych charakterystyk robót w diagonalu q

$$\begin{aligned} t_{1k}^{wz} &= \left\{ t^{wr} \right\}_q + t_{1k}, \\ t_{2,k-1}^{wz} &= \left\{ t^{wr} \right\}_q + t_{2,k-1}, \\ &\vdots \\ t_{n2}^{wz} &= \left\{ t^{wr} \right\}_q + t_{n1}. \end{aligned}$$

Procedurę tę powtarzamy zgodnie z podanym schematem do chwili wyzerpania zbioru diagonalów, wyznaczając charakterystyki czasowe robót.

5.1.2. Analiza przypadku uwzględniającego sprzężenia łączące najpóźniejsze terminy zakończenia robót

Założenie

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad (5.1.2)$$

wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i-1,j-1}$		$t_{i-1,j}$		$t_{i-1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i,j-1}$		$t_{i,j}$		$t_{i,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz
wr	wz	wr	wz	wr	wz
$t_{i+1,j-1}$		$t_{i+1,j}$		$t_{i+1,j+1}$	
pr	pz	pr	pz	pr	pz

Założenie określa warunek jednoczesnego zakończenia robót różnych rodzajów ($j-1, j, j+1$) na różnych obiektach lub ich częściach. Dotyczy on najpóźniejszych terminów zakończenia robót. Skutkiem tego jest sytuacja z praktyki wykonawczej, gdy roboty te są prowadzone w ostatniej fazie równolegle. Terminy ich rozpoczęcia mogą być różne, ze względu na jednakową pracochłonność, lecz zakończenie ich wykonania musi nastąpić jednocześnie.

Definicja

$$\bigwedge_{w_1, w_2, w_3 \in P} \bigvee_{K \subset P} f(k_1) = w_1 \wedge f(k_2) = w_2 \wedge f(k_3) = w_3 \Rightarrow w_1 = w_2 = w_3,$$

gdzie:

$K = \{w_1, w_2, w_3\}$,

K – podzbiór najpóźniejszych terminów zakończenia robót, w przypadku których $t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr}$,

p – zbiór terminów zakończenia robót na sąsiednich frontach roboczych,

P – zbiór terminów zakończenia robót,

k_1, k_2, k_3 – nakłady pracy w roboczo- lub maszynogodzinach wyznaczone na podstawie bazy normatywnej,

$f(k_1)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu i ,

$f(k_2)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu $i - 1$,

$f(k_3)$ – funkcja nakładów i środków realizacji dla frontu $i + 1$.

Dla rozpatrywanego wariantu określono możliwość wystąpienia następujących przypadków:

$$1) w_1 > w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_3,$$

$$\text{czyli: } t_{i+1,j-1}^{pz} = w \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{ij}^{pz} = w;$$

$$2) w_1 > w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_2 = w_3,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = w \Rightarrow t_{ij}^{pz} = w;$$

$$3) w_1 > w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_2,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1,j+1}^{pz} = y \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = y;$$

$$4) w_1 > w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_2,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1,j+1}^{pz} = w \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = w;$$

$$5) w_1 = w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$6) w_1 = w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$7) w_1 > w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_2,$$

$$\text{czyli: } t_{i-1,j+1}^{pr} = w \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} = w;$$

$$8) w_1 < w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

$$9) w_1 < w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow p = 0 \text{ (zdanie jest nieprawdziwe);}$$

10) $w_1 > w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

11) $w_1 > w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

12) $w_1 = w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_3$,

czyli: $t_{i+1,j-1}^{pr} = w \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} = w$;

13) $w_1 > w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

14) $w_1 > w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

15) $w_1 = w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_1 = w_2 = w_3$,

czyli: $t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} = w$;

16) $w_1 = w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

17) $w_1 = w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_1 = w_2$,

czyli: $t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} = w \Rightarrow t_{i+1,j-1}^{pz} = w$;

18) $w_1 = w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

19) $w_1 = w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

20) $w_1 = w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

21) $w_1 < w_2 \wedge w_1 > w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_3$,

czyli: $t_{i+1,j-1}^{pz} = w \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} = w$;

22) $w_1 < w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_1 = w_3$,

czyli: $t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = w \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} = w$;

23) $w_1 < w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

24) $w_1 < w_2 \wedge w_1 = w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow p = 0$ (zdanie jest nieprawdziwe);

25) $w_1 < w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 > w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_1$,

czyli: $t_{ij}^{pr} = w \Rightarrow t_{i+1,j-1}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} = w$;

26) $w_1 < w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 = w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = y_1$,

czyli: $t_{ij}^{pz} = w \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = w$;

27) $w_1 < w_2 \wedge w_1 < w_3 \wedge w_2 < w_3 \Rightarrow w = \min\{w_1, w_2, w_3\} = w_1$,

czyli: $t_{ij}^{pz} = w \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = w$.

Algorytm wyznaczania charakterystyk czasowych robót budowlanych przy uwzględnieniu sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych

Założenia podstawowe

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci zbioru obiektów

$$O = \{O_i\}, \quad i = 1, n,$$

na których prowadzone będą roboty przez wyspecjalizowane firmy.

$$F = \{F_i\}, \quad i = 1, p.$$

Na każdym obiekcie O należy wykonać określone w kosztorysie roboty

$$P_i = \{P_i\}, \quad i = 1, m.$$

Założenia dodatkowe

a) procesy robocze mają być wykonywane na działkach roboczych w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu $P_{i,k-1}$, a przed rozpoczęciem procesu $P_{i,k+1}$,

b) brygady robocze przechodzą z działki roboczej na działkę roboczą w sposób ciągły,

c) procesy budowlane powinny być wykonywane kolejno na obiektach O_i , tj. sprzężenia diagonalne łączą terminy najpóźniejszego zakończenia procesu P_j na obiekcie O_i z terminem najpóźniejszego zakończenia następnego procesu P_{j+1} na obiekcie O_{i+1} , a sprzężenia odwrotne diagonalne łączą najpóźniejsze terminy zakończenia P_j na O_i z najpóźniejszym terminem zakończenia procesu poprzedzającego P_{j-1} na obiekcie O_{i-1} .

Schemat algorytmu wyznaczania terminów robót

Dana jest macierz czasów wykonania procesów roboczych na obiektach w ustalonej uprzednio kolejności ich realizacji $T = [t_{ij}]$. Przed przystąpieniem do wyznaczenia charakterystyk czasowych należy wyznaczyć najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót.

Faza 1 – wyznaczamy termin najpóźniejszego zakończenia i rozpoczęcia roboty w ostatnim diagonalu p macierzy T .

Termin zakończenia ostatniego procesu na ostatnim obiekcie przyjmujemy równy

$$t_{nm}^{pz} = t_{nm}^{wz},$$

najpóźniejszy zaś termin rozpoczęcia tej roboty określamy ze wzoru

$$t_{nm}^{pr} = t_{nm}^{pz} - t_{nm}.$$

Faza 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w przedostatnim diagonalu (diagonal $p - 1$).

Terminy zakończenia procesów leżących w diagonalu $p - 1$ wyznaczamy z zależności

$$t_{n,m-1}^{pz} = t_{n-1,m}^{pz} = t_{nm}^{pr},$$

a następnie wyznaczamy terminy rozpoczęcia tych robót na podstawie wzorów

$$t_{n,m-1}^{pr} = t_{n,m-1}^{pz} - t_{n,m-1},$$

$$t_{n-1,m}^{pr} = t_{n-1,m}^{pz} - t_{n-1,m}.$$

Faza 3 – wyznaczamy terminy zakończenia i rozpoczęcia robót w diagonalu $p - 2$.

Termin zakończenia ostatniego m -tego procesu na obiekcie $n - 2$ przyjmujemy równy

$$t_{n-2,m}^{pz} = t_{n-1,m}^{pr}.$$

Pozostałe terminy najpóźniejszego zakończenia wyznaczamy z warunków

$$t_{n-1,m-1}^{pz} = t_{n-1,m}^{pr},$$

$$t_{n,m-2}^{pz} = t_{n,m-1}^{pr}.$$

Tworzymy zbiór terminów zakończenia kolejnych robót leżących w diagonalu $p - 2$

$$Z_{p-2} = \{t_{n-2,m}^{pz}, t_{n-1,m-1}^{pz}, t_{n,m-2}^{pz}\}.$$

Wybieramy najpóźniejszy termin zakończenia robót w $p - 2$ diagonalu $\{t^{pz}\}_{p-2}$ z warunku

$$\{t^{pz}\}_{p-2} \min Z_{p-2} = \min \{t_{n-2,m}^{pz}, t_{n-1,m-1}^{pz}, t_{n,m-2}^{pz}\}.$$

Wartość ta stanowi podstawę do wyznaczania pozostałych charakterystyk robót w diagonalu $p - 2$

$$\begin{aligned}
 t_{n-2,m}^{pr} &= \{t^{pz}\}_{p-2} - t_{n-2,m}, \\
 t_{n-1,m-1}^{pr} &= \{t^{pz}\}_{p-2} - t_{n-1,m-1}, \\
 t_{n,m-1}^{pr} &= \{t^{pz}\}_{p-2} - t_{n,m-2}.
 \end{aligned}$$

Faza q – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w diagonalne q (gdzie $q = n - 1$).

Wszystkie terminy zakończenia wyznaczamy z warunków

$$\begin{aligned}
 t_{1,m-1}^{pz} &= t_{1m}^{pr}, \\
 t_{2,m-2}^{pz} &= t_{2,m-1}^{pr}, \\
 &\vdots \\
 t_{n,m-k}^{pz} &= t_{m,m-k+1}^{pr}.
 \end{aligned}$$

Tworzymy zbiór najpóźniejszych terminów zakończenia kolejnych robót leżących w q -tym diagonalne

$$Z_q = \{t_{1,m-1}^{pz}, \dots, t_{n,m-k}^{pz}\}.$$

Wyznaczamy termin zakończenia roboty w q -tym diagonalne $\{t^{pz}\}_q$ z warunku

$$\{t^{pz}\}_q = \min Z_q = \min \{t_{1,m-1}^{pz}, t_{2,m-2}^{pz}, \dots, t_{n,m-k}^{pz}\}.$$

Wartość ta stanowi podstawę do wyznaczenia pozostałych charakterystyk czasowych robót w q -tym diagonalne

$$\begin{aligned}
 t_{1,m-1}^{pz} &= \{t^{pz}\}_q - t_{1,m-1}, \\
 t_{2,m-2}^{pz} &= \{t^{pz}\}_q - t_{2,m-2}, \\
 &\vdots \\
 t_{n,m-k}^{pz} &= \{t^{pz}\}_q - t_{n,m-k}.
 \end{aligned}$$

Procedurę powtarzamy zgodnie z podanym algorytmem do chwili wyczerpania zbioru diagonalów.

Schemat algorytmu obliczania terminów rozpoczęcia i zakończenia robót

Dana jest macierz czasów wykonania procesów roboczych na obiektach w ustalonej uprzednio kolejności ich realizacji $T = [t_{ij}]$.

Faza 1 – wyznaczamy termin rozpoczęcia i zakończenia roboty w pierwszym diagonale macierzy T .

Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na pierwszym obiekcie przyjmujemy równy zeru. Termin zakończenia procesu wyznaczamy ze wzoru

$$t_{11}^{wz} = t_{11}^{wr} + t_{11} = 0 + t_{11} = t_{11}.$$

Faza 2 – określenie charakterystyk czasowych umożliwiających wyznaczenie wartości czasów.

W fazie tej możliwe są trzy sposoby postępowania:

1. Wyznaczenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla pierwszego procesu w macierzy na kolejnych frontach, przy założeniu zerowych sprzężeń między środkami realizacji.

2. Wyznaczenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót dla pierwszego obiektu w macierzy przy założeniu zerowych sprzężeń między frontami roboczymi.

3. Wyznaczenie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla pierwszego procesu i obiektu w macierzy przy założeniu zerowych sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Faza 3 – w przypadku realizacji:

• **Fazy 2–1:** wyznaczamy najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_2 i P_3 .

Wyznaczamy możliwe do obliczenia charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony t_{21}^{wr} , stąd $t_{21}^{wr} = t_{12}^{wr}$,

↪ jest wyznaczony t_{31}^{wr} , stąd $t_{31}^{wr} = t_{22}^{wr} = t_{13}^{wz}$,

↪ jest wyznaczony $t_{i+1,1}^{wr}$, stąd $t_{i+1,1}^{wr} = t_{i2}^{wr} = t_{i-1,3}^{wz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych w fazie 2–1 wartości t^{wr} dla pierwszej roboty w macierzy.

Po wyznaczeniu wszystkich możliwych charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia wartości t^{wr} i t^{wz} dla 2. i 3. roboty w macierzy na podstawie wzorów

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{wz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{wr} + t_{ij}.$$

Wartość t_{n2}^{wr} określamy ze wzoru

$$t_{n2}^{wr} = \max \{t_{n1}^{wz}, t_{n-1,2}^{wz}\}, \text{ a stąd } t_{n2}^{wz} = t_{n2}^{wr} + t_{n2}.$$

Takie postępowanie umożliwiło wyznaczenie wszystkich wartości najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla 2. roboty w macierzy i części wartości dla 3. roboty w macierzy.

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych kolumn macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–2:** wyznaczamy najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektów O_2 i O_3 według wzoru wariantu.

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony t_{12}^{wz} , stąd $t_{12}^{wz} = t_{21}^{wr}$,

↪ jest wyznaczony t_{13}^{wz} , stąd $t_{13}^{wz} = t_{22}^{wr} = t_{31}^{wr}$,

↪ jest wyznaczony t_{1j}^{wz} , stąd $t_{1j}^{wz} = t_{2,j-1}^{wr} = t_{3,j-2}^{wr}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych wartości t^{wz} w fazie 2–2 dla pierwszego wiersza w macierzy. Po wyznaczeniu wszystkich możliwych charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia wartości t^{wr} i t^{wz} dla 2. i 3. wiersza macierzy T

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{wz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{wr} + t_{ij}.$$

Wartość t_{2m}^{wr} określamy ze wzoru

$$t_{2m}^{wr} = \max \{t_{1m}^{wz}, t_{2,m-1}^{wz}\}, \text{ a } t_{2m}^{wz} = t_{2m}^{wr} + t_{2m}.$$

Takie postępowanie umożliwiło wyznaczenie wszystkich wartości najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektu O_2 oraz dla 3. wiersza w macierzy. Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–3:** wyznaczamy najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_2 i P_3 i obiektów O_2 i O_3 .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe według założeń określonych dla fazy 2–1 i 2–2. W przypadku występowania jednocześnie określonej wartości

$$t_{i-1,j+1}^{wz} \text{ i } t_{i+1,j-1}^{wr}$$

wartość t_{ij}^{wr} obliczamy ze wzoru

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j+1}^{wz}, t_{i+1,j-1}^{wr} \}.$$

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

Założenia dodatkowe do algorytmu obliczania charakterystyk czasowych robót

a) procesy robocze mają być wykonywane na działkach roboczych w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu $P_{i,k-1}$ i po zakończeniu procesu $P_{i,k+1}$,

b) grupy robocze przechodzą z działki roboczej na działkę roboczą w sposób ciągły,

c) sprzężenia diagonalne i odwrotne diagonalne połączą odpowiednio terminy najpóźniejszego rozpoczęcia danego procesu P_j na obiekcie O_i z terminami najpóźniejszego zakończenia następnego procesu P_{j+1} na obiekcie O_{i-1} oraz procesu P_{j-1} na obiekcie O_{i+1} .

Schemat algorytmu obliczania charakterystyk czasowych robót

Dana jest macierz czasów wykonania procesów roboczych na obiektach w ustalonej uprzednio kolejności ich realizacji $T = [t_{ij}]$.

Przed przystąpieniem do wyznaczenia charakterystyk czasowych należy wyznaczyć najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót.

Faza 1 – wyznaczamy termin najpóźniejszego zakończenia i rozpoczęcia roboty w ostatnim diagonalu p macierzy T .

Termin zakończenia ostatniego procesu na ostatnim obiekcie przyjmujemy równy

$$t_{n,m}^{pz} = t_{n,m}^{wz},$$

najpóźniejszy zaś termin rozpoczęcia tej roboty określamy ze wzoru

$$t_{n,m}^{pr} = t_{n,m}^{pz} - t_{n,m}.$$

Faza 2 – wyznaczenie charakterystyk czasowych umożliwiających wyznaczenie wartości terminów.

W fazie tej możliwe są trzy sposoby postępowania:

1. Wyznaczenie najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla ostatniego procesu w macierzy przy założeniu zerowych sprzężeń między środkami realizacji.

2. Wyznaczenie najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót dla ostatniego obiektu w macierzy przy założeniu zerowych sprzężeń między frontami roboczymi.

3. Wyznaczenie najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla ostatniego procesu i obiektu w macierzy przy założeniu zerowych sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Faza 3 – w przypadku realizacji:

• **Fazy 2–1:** wyznaczamy najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_{m-1} i P_{m-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

- jest wyznaczony $t_{n-1,m}^{pz}$, stąd $t_{n-1,m}^{pz} = t_{n,m-1}^{pr}$,
- jest wyznaczony $t_{n-2,m}^{pz}$, stąd $t_{n-2,m}^{pz} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n,m-2}^{pz}$,
- jest wyznaczony t_{im}^{pz} , stąd $t_{im}^{pz} = t_{i+1,m-1}^{pr} = t_{i+2,m-2}^{pz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych t^{pz} dla m -tej (ostatniej) roboty w macierzy.

Po wyznaczeniu wszystkich możliwych na podstawie wzoru wariantu charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia, wartości t^{pr} i t^{pz} dla $m-1$ i $m-2$ roboty macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min \{ t_{1m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr} \},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie pozwoli na wyznaczenie wszystkich wartości najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla procesów $m - 1$ w macierzy i części wartości dla roboty $m - 2$. Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych kolumn macierzy (od m do 1) w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–2:** wyznaczamy możliwe do wyznaczenia najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony $t_{n,m-1}^{pz}$, stąd $t_{n,m-1}^{pz} = t_{n-1,m}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony $t_{n,m-2}^{pz}$, stąd $t_{n,m-2}^{pz} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n-2,m}^{pz}$,

↪ jest wyznaczony t_{nj}^{pz} , stąd $t_{nj}^{pz} = t_{n-1,j+1}^{pr} = t_{n-2,j+2}^{pz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych wartości t^{pz} w fazie 2–2 dla n -tego obiektu w macierzy.

Po wyznaczeniu wszystkich możliwych charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące a możliwe do obliczenia wartości t^{pr} i t^{pz} dla $n - 1$ i $n - 2$ obiektu macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min\{t_{1m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr}\},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie wszystkich wartości najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektu O_{n-1} oraz części wartości dla obiektu O_{n-2} w macierzy. Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–3:** wyznaczamy najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_{m-1} i P_{m-2} oraz obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia wg wzoru wariantu charakterystyki czasowe wg założeń określonych dla fazy 2–1 i 2–2.

W przypadku występowania jednocześnie określonej wartości

$$t_{i+1,j-1}^{pz} \text{ i } t_{i-1,j+1}^{pz}$$

wartość t_{ij}^{pr} określamy ze wzoru

$$t_{ij}^{pr} = \min\{t_{i+1,j-1}^{pz}, t_{i-1,j+1}^{pz}\}.$$

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

Faza 3 – w przypadku realizacji:

• **Fazy 2–1:** wyznaczamy najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_{m-1} i P_{m-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony $t_{n-1,m}^{pr}$, stąd $t_{n-1,m}^{pr} = t_{n,m-1}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony $t_{n-2,m}^{pr}$, stąd $t_{n-2,m}^{pr} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n,m-2}^{pz}$,

↪ jest wyznaczony t_{im}^{pr} , stąd $t_{im}^{pr} = t_{i+1,m-1}^{pr} = t_{i+2,m-2}^{pz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych t^{pr} dla m -tej (ostatniej) roboty w macierzy.

Po wyznaczeniu wszystkich możliwych na podstawie wzoru wariantu charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia, wartości t^{pr} i t^{pz} dla $m-1$ i $m-2$ roboty macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min\{t_{1m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr}\},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie wszystkich wartości najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla procesów $m - 1$ w macierzy i części wartości dla procesu $m - 2$. Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych kolumn macierzy (od m do 1) w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–2:** wyznaczamy możliwe do wyznaczenia najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia według wzoru wariantu charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony $t_{n,m-1}^{pz}$, stąd $t_{n,m-1}^{pz} = t_{n-1,m}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony $t_{n,m-2}^{pz}$, stąd $t_{n,m-2}^{pz} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n-2,m-2}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony t_{nj}^{pz} , stąd $t_{nj}^{pz} = t_{n-1,j+1}^{pr} = t_{n-2,j+2}^{pr}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych wartości t^{pz} w fazie 2–2 dla obiektu n w macierzy. Po wyznaczeniu wszystkich możliwych charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia, wartości t^{pr} i t^{pz} dla $n - 1$ i $n - 2$ obiektu macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min \{ t_{1,m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr} \},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie wszystkich wartości późnych czasów rozpoczęcia i zakończenia dla obiektu O_{n-1} oraz części wartości dla obiektu O_{n-2} w macierzy.

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

• **Fazy 2–3:** wyznaczamy najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_{m-1} i P_{m-2} oraz obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe według założeń określonych dla fazy 2-1 i 2-2.

W przypadku występowania jednocześnie określonej wartości

$$t_{i+1,j-1}^{pz} \text{ i } t_{i-1,j+1}^{pr}$$

wartość t_{ij}^{pr} określamy ze wzoru

$$t_{ij}^{pr} = \min \{ t_{i+1,j-1}^{pz}, t_{i-1,j+1}^{pr} \}.$$

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości dla wszystkich robót.

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

- jest wyznaczony $t_{n-1,m}^{pz}$, stąd $t_{n-1,m}^{pz} = t_{n,m-1}^{pr}$,
- jest wyznaczony $t_{n-2,m}^{pz}$, stąd $t_{n-2,m}^{pz} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n,m-2}^{pz}$,
- jest wyznaczony t_{im}^{pz} , stąd $t_{im}^{pz} = t_{i+1,m-1}^{pr} = t_{i+2,m-2}^{pz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych t^{pz} dla m -tej (ostatniej) roboty w macierzy. Po wyznaczeniu wszystkich możliwych na podstawie wzoru wariantu charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące, a możliwe do obliczenia, wartości t^{pr} i t^{pz} dla $m-1$ i $m-2$ roboty macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min \{ t_{1m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr} \},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie wszystkich wartości najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia dla procesów $m-1$ w macierzy i części wartości terminów dla roboty $m-2$.

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych kolumn macierzy (od m do 1) w celu wyznaczenia wszystkich terminów dla wszystkich robót.

• **Fazy 2'–2'**: wyznaczamy możliwe do wyznaczenia najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót dla obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do określenia charakterystyki czasowe:

↪ jest wyznaczony $t_{n,m-1}^{pr}$, stąd $t_{n-1,m}^{pr} = t_{n,m-1}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony $t_{n-2,m}^{pr}$, stąd $t_{n,m-2}^{pz} = t_{n-1,m-1}^{pr} = t_{n-2,m}^{pr}$,

↪ jest wyznaczony t_{nj}^{pr} , stąd $t_{nj}^{pr} = t_{n-1,j+1}^{pr} = t_{n-2,j+2}^{pz}$

i tak aż do wyczerpania wyznaczonych wartości t^{pz} w fazie 2–2 dla obiektu n w macierzy.

Po wyznaczeniu wszystkich możliwych charakterystyk czasowych wyznaczamy brakujące a możliwe do obliczenia wartości t^{pr} i t^{pz} dla $n-1$ i $n-2$ obiektu macierzy ze wzorów

$$t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz} - t_{ij}$$

lub

$$t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}.$$

Wartość $t_{1,m-1}^{pz}$ określamy ze wzoru

$$t_{1,m-1}^{pz} = \min \left\{ t_{1,m}^{pr}, t_{2,m-1}^{pr} \right\},$$

a stąd

$$t_{1,m-1}^{pr} = t_{1,m-1}^{pz} - t_{1,m-1}.$$

Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie wszystkich wartości późnych czasów rozpoczęcia i zakończenia dla obiektu O_{n-1} oraz części wartości dla obiektu O_{n-2} w macierzy.

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości terminów robót.

• **Fazy 2'–3'**: wyznaczamy najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia dla procesów P_{m-1} i P_{m-2} oraz obiektów O_{n-1} i O_{n-2} .

Wyznaczamy możliwe do obliczenia charakterystyki czasowe według założeń określonych dla fazy 2–1 i 2–2.

W przypadku występowania jednocześnie wartości terminów

$$t_{i+1,j-1}^{pr} \text{ i } t_{i-1,j+1}^{pz}$$

wartość t_{ij}^{pr} określamy ze wzoru

$$t_{ij}^{pr} = \min \{t_{i+1, j-1}^{pr}, t_{i-1, j+1}^{pz}\}$$

Procedurę tę powtarzamy dla kolejnych wierszy macierzy w celu wyznaczenia wszystkich wartości terminów dla wszystkich robót.

5.2. Ilustracja praktyczna – przykład obliczeniowy

Wszystkie metody obliczeniowe można podzielić na trzy grupy: metody dokładne, heurystyczne i o zagwarantowanej dokładności. Metody dokładne, o charakterze permutacyjnym dla przypadków praktycznych występujących w działalności budowlanej, są mało przydatne, ze względu na dużą złożoność obliczeniową. Liczne ograniczenia praktyczne, wyrażone za pomocą sprzężeń czasowych oraz znaczna liczba zadań do ich szeregowania stanowią czynnik eliminujący te metody z praktycznego stosowania. Na przykład dla 10 frontów roboczych, co nie jest znaczną wielkością, liczba możliwych wariantów realizacyjnych, dla pełnego przeglądu przestrzeni rozwiązań, wynosi $10!$, tj. 3 628 800. Stanowi to poważny problem obliczeniowy, dlatego w praktyce budowlanej jest on na etapie procesów decyzyjnych odrzucany, z uwagi na małą przydatność praktyczną.

Najbardziej skuteczne, choć nie zawsze zapewniające dokładne rozwiązanie, są algorytmy heurystyczne, wykorzystujące znane ograniczenia technologiczne i organizacyjne występujące pomiędzy robotami budowlanymi. Znajomość tych relacji z doświadczeń z praktyki inżynierskiej umożliwia skuteczne znalezienie racjonalnych rozwiązań zapewniających właściwą synchronizację robót budowlanych z uwzględnieniem kryterium minimum czasu realizacji $L \rightarrow \min$.

Reguły przyjętego postępowania w metodzie podziału i ograniczeń, adaptowanej do poszukiwania racjonalnego harmonogramu realizacyjnego kompleksu robót budowlanych, są następujące:

1. Reguła podziału definiuje proces podziału przestrzeni rozwiązań na podzbiory rozłączne – kolejno analizowane i eliminowane. Naturalnym odpowiednikiem procesu podziału jest drzewo przeszukiwania przestrzeni rozwiązań.

2. Reguła wyboru pozwala ustalić następujący wierzchołek drzewa przeszukiwań, w którym ma nastąpić proces podziału.

3. Funkcja charakterystyczna służy do eliminacji tych poddrzew z kompletnego drzewa poszukiwań, które nie zawierają żadnych rozwiązań dopuszczalnych.

4. Funkcja dolnego ograniczenia przyporządkowuje każdemu rozwiązaniu ograniczenie wartości funkcji w postaci tzw. granicznie możliwego minimum (GMM).

5. Górne ograniczenie wartości funkcji celu jest wartością tej funkcji dla pełnego rozwiązania.

Ogólne sformułowanie zagadnienia

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci kompleksu obiektów budowlanych i planowanych do wykonania

$$O = \{O_i\}, \quad i = 1, n$$

na ustalonych frontach roboczych i

$$F = \{F_i\}, \quad i = 1, p$$

oraz macierz czasów trwania robót j na frontach i

$$T = [t_{ij}].$$

Roboty budowlane należy prowadzić zgodnie z zasadami technologii według określonego porządku, tj.

$$P_j = \{P_j\}, \quad j = 1, m.$$

Należy zsynchronizować roboty z zastosowaniem kryterium minimalnego czasu wykonania oraz uwzględnieniem warunku równoległości robót (tj. w diagonalach macierzy czasów trwania robót).

Możliwe interpretacje praktyczne

Zagadnienia tego typu mogą się pojawiać np. podczas realizacji obiektów przemysłowych – hal stalowych. W takich obiektach pewne rodzaje robót budowlanych, np. roboty dachowe, termo- i hydroizolacyjne, mogą być związane z robotami posadzkarskimi. Roboty te, choć nie są związane bezpośrednią zależnością sekwencyjną, ze względu jednak na wzajemną ich zależność, wywołaną np. koniecznością zabezpieczenia wykonania posadzek przemysłowych przed opadami atmosferycznymi, oraz w warunkach zimowych zapewnieniem temperatury w pomieszczeniach powyżej 5°C , są od siebie zależne. Powiązanie pomiędzy robotami można wyrazić za pomocą sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych, a roboty te będą stanowić w macierzy diagonal q . Ustalenie podstawowych parametrów czasowych robót, tj. terminów rozpoczęcia i zakończenia, z podziałem na etapy, jest niezbędne w fazie podejmowania decyzji realizacyjnych oraz w początkowej fazie procesu inwestycyjnego

– podczas opracowywania umów na wykonanie robót. Wielkości te są najczęściej ustalane dyrektywnie, na podstawie negocjacji, bez szczegółowej analizy i uzasadnienia merytorycznego. Prowadzi to w praktyce do wielu kolizji i zakłóceń w procesie realizacji robót, polegających najczęściej na przerwach w pracy, z uwagi na niedostępność wolnego frontu robót, konieczność uwzględnienia przerw technologicznych, związanych np. z procesem dojrzewania betonu itp.

Przykład liczbowy

W prezentowanym przykładzie wykorzystano dane z realizacji rozbudowy zakładu przemysłowego, produkującego wyroby ceramiczne. Kompleks, w którym zaprojektowano nowy ciąg technologiczny, składa się z następujących obiektów: nawy I, nawy II, nawy III oraz magazynu gliny IV. Powierzchnia obiektów wynosi 22 000 m². W wyniku podziału i scalenia robót wydzielono 7 zadań (procesów), które obejmowały: roboty ziemne, roboty fundamentowe, montaż konstrukcji, obudowę dachu, obudowę ścian, roboty palowe i wykonanie fundamentu płytowego pod piec tunelowy. Ustalono czasy trwania poszczególnych robót na działkach obejmujących wymienione obiekty. W wyniku analizy struktury organizacyjnej i technologicznej kompleksu zbudowano macierz czasów trwania robót na działkach roboczych.

Tabela 5.2.1

Macierz czasów trwania robót (dni robocze)

Rodzaj robót Działka robocza	Roboty ziemne	Roboty fundamentowe	Montaż konstrukcji	Przerwa technologiczna	Obudowa dachu	Obudowa ścian	Roboty palowe pod fundament	Fundamenty pod maszyny
I	2	3	4	5	6	7	8	9
Nawa I	10	10	20	4	6	18	0	0
Nawa II	14	18	18	4	6	24	18	53
Nawa III	8	8	16	4	6	28	0	0
Magazyn gliny IV	12	12	24	4	6	17	0	0

Obliczenie minimalnego czasu realizacji kompleksu

Obliczenia wykonano metodą podziału i ograniczeń, umożliwiającą ustalenie kolejności robót, z uwzględnieniem wskaźnika GMM właściwości węzłów

drzewa wariantów. Przyjęto kryterium wyboru minimalnej wartości węzła obliczanego za pomocą wskaźnika GMM na każdym poziomie drzewa. Zastosowano przedstawione powyżej reguły metody B&B oraz tabelaryczny sposób prowadzenia obliczeń.

Etap I

I	10	10	20	4	6	18	0	0			
II		14	18	18	4	6	24	18	53		
III			8	8	16	4	6	28	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$$\text{GMM} = 10 + 14 + 20 + 18 + 16 + 24 + 24 + 28 + 53 + 0 + 0 = 235 \text{ JEDN.}$$

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
I		10	10	20	4	6	18	0	0		
III			8	8	16	4	6	28	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$$\text{GMM} = 14 + 18 + 18 + 20 + 16 + 24 + 18 + 53 + 17 = 198 \text{ JEDN.}$$

III	8	8	16	4	6	28	0	0			
II		14	18	18	4	6	24	18	53		
I			10	10	20	4	6	18	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$$\text{GMM} = 8 + 14 + 18 + 18 + 20 + 28 + 24 + 18 + 53 = 201 \text{ JEDN.}$$

IV	12	12	24	4	6	17	0	0			
II		14	18	18	4	6	24	18	53		
I			10	10	20	4	6	18	0	0	
III				8	8	16	4	6	28	0	0

$$\text{GMM} = 12 + 14 + 24 + 18 + 20 + 17 + 24 + 18 + 53 = 200 \text{ JEDN.}$$

Etap II

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
I		10	10	20	4	6	18	0	0		
III			8	8	16	4	6	28	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$$\text{GMM} = 14 + 18 + 18 + 20 + 16 + 24 + 18 + 53 + 17 = 198 \text{ JEDN.}$$

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
III		8	8	16	4	6	28	0	0		
I			10	10	20	4	6	18	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$$\text{GMM} = 14 + 18 + 18 + 16 + 20 + 24 + 28 + 53 + 17 = 208 \text{ JEDN.}$$

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
IV		12	12	24	4	6	17	0	0		
I			10	10	20	4	6	18	0	0	
III				8	8	16	4	6	28	0	0

$$\text{GMM} = 14 + 18 + 18 + 24 + 20 + 24 + 18 + 53 + 28 = 217 \text{ JEDN.}$$

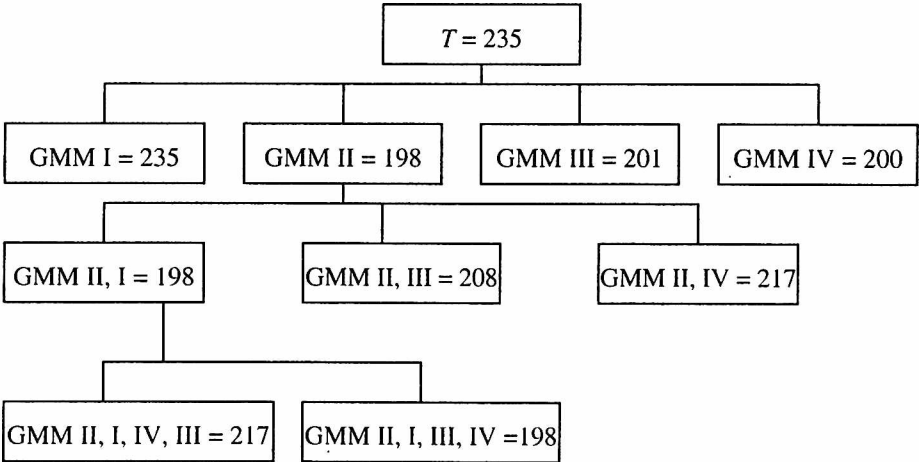
Etap III

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
I		10	10	20	4	6	18	0	0		
IV			12	12	24	4	6	17	0	0	
III				8	8	16	4	6	28	0	0

$GMM = 14 + 18 + 18 + 20 + 24 + 24 + 18 + 53 + 28 = 217 \text{ JEDN.}$

II	14	18	18	4	6	24	18	53			
I		10	10	20	4	6	18	0	0		
III			8	8	16	4	6	28	0	0	
IV				12	12	24	4	6	17	0	0

$GMM = 14 + 18 + 18 + 20 + 16 + 24 + 18 + 53 + 17 = 198 \text{ JEDN.}$



Na podstawie wyników obliczeń wskazano nową kolejność realizacji robót w obiektach, tj. z kolejności I, II, III, IV, w której planowany czas realizacji wynosi 235 jednostek, na II, I, III, IV, zapewniającą czas trwania 198 jednostek. Stanowi to skrócenie realizacji o 37 dni roboczych, tj. o 15,7%.

Rozdział 6

Zastosowanie systemów komputerowych w metodach organizacji uwzględniających sprzężenia czasowe

Rozwiązywanie zagadnień związanych z planowaniem przebiegu robót budowlanych z zastosowaniem sprzężeń czasowych umożliwiając, opracowane z udziałem autora, systemy komputerowe. W ślad za rozwojem metod organizacji robót budowlanych wykorzystujących różne zestawienia sprzężeń czasowych, tworzone jest oprogramowanie, umożliwiające zastosowanie w praktyce budowlanej prezentowanych algorytmów.

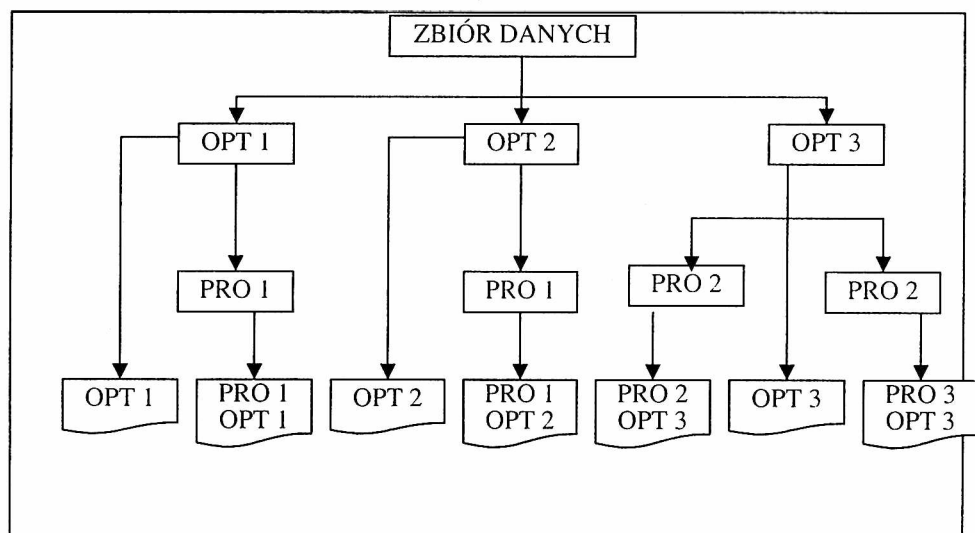
Jednym z czynników decydujących o efektywności prowadzenia robót budowlanych jest ich właściwa kolejność, uwzględniająca technologiczne i organizacyjne ograniczenia. Jest to problem zaliczany do deterministycznej teorii szeregowania zadań o charakterze permutacyjnym, o $n!$ możliwych wariantach. W związku z tym traktowany jest jako zagadnienie o dużej złożoności obliczeniowej, z uwagi na wielką liczbę dopuszczalnych rozwiązań.

W praktyce ustalenie racjonalnej kolejności prowadzenia robót jest możliwe do przeprowadzenia na drodze zmiany kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach roboczych. Sprawdzenie jednak wszystkich możliwych wariantów realizacyjnych, z uwagi na złożoność obliczeniową problemów kombinatorycznych, byłoby trudne lub nawet niemożliwe. Stosuje się więc przeglądowe algorytmy podziału i ograniczeń, umożliwiające ukierunkowany przegląd przestrzeni rozwiązań. Są one bardziej efektywne od pełnego przeglądu wariantów realizacyjnych, ze względu na stosunkowo dużą szybkość obliczeń, są jednak od nich mniej dokładne.

Założenia te były bazą umożliwiającą opracowanie algorytmów programów komputerowych, niezbędnych w praktyce budowlanej.

System komputerowy OPTY

Jednym z pierwszych systemów komputerowych, w którego opracowaniu brał udział autor rozprawy, był zbiór programów OPTY, umożliwiający przeprowadzanie obliczeń dla pięciu podstawowych metod organizacji, uwzględniających sprzężenia czasowe. System ten zapewniał uwzględnienie problemu kolejnościowego dla każdej z metod, na podstawie własnego algorytmu optymalizacyjnego, pod nazwami OPT1, OPT2 i OPT3. Obliczanie charakterystyk czasowych robót, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych czasów rozpoczęcia i zakończenia robót, przeprowadza się z zastosowaniem programów PRO1, PRO2 lub PRO3. Pakiet ten jest ze sobą związany, tworząc system OPTY. Program ten był stosowany do celów praktycznych podczas opracowywania wielu projektów organizacji robót budowlanych oraz w dydaktyce w ramach ćwiczeń projektowych.



Schemat systemu OPTY

Zastosowanie systemu komputerowego OPTY wymagało przygotowania danych wejściowych w postaci macierzy czasów trwania robót budowlanych na działkach roboczych. Ustalenie czasów trwania robót wymagało przeprowadzania działań inżynierskich związanych z przedmiarowaniem robót na podstawie projektów technicznych, ustaleniem nakładów rzeczowych i określeniem przewidywanych czasów robót dla zespołu pracowników. Wyniki obliczeń obejmowały dane dotyczące terminów, rozpoczęcia i zakończenia robót, dla najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów robót. Były one podstawą do opracowania dokumentacji graficznej: cyklogramów i modeli sieciowych.

Szczegółowy opis programu, schematy blokowe oraz program źródłowy systemu OPTY przedstawił autor w swojej rozprawie doktorskiej [63].

Dane wejściowe powinny zawierać:

- ↳ liczbę serii danych,
- ↳ liczbę wierszy i kolumn macierzy,
- ↳ macierze czasów wykonywania robót.

System komputerowy BRYGADY

Na podstawie założeń metod organizacji robót uwzględniających sprzężenie czasowe opracowano algorytmy planowania pracy grup roboczych w specjalistycznym przedsiębiorstwie budowlanym. Zadanie obejmowało rozwiązanie zagadnienia szeregowania zadań rzeczowych, realizowanych przez brygady robocze, w rozliczeniowym przedziale czasu (kwartał, rok kalendarzowy).

Ze względu na zróżnicowany zakres działań jednostek organizacyjnych (Kierownictw Grup Robót) opracowano algorytm planowania pracy grup roboczych, umożliwiający racjonalny rozdział zadań dla każdego rodzaju robót (dekarsko-blacharskich, chemoodpornych, izolacyjnych i innych). Uwzględniając podstawowe zadania wyspecjalizowanego przedsiębiorstwa opracowano komputerowy system BRYGADY.

Harmonizacja robót polegała na takim przyporządkowaniu odpowiednich robót, aby zapewnić zerowe sprzężenia między środkami realizacji, tj. ciągłość pracy grup roboczych jednej specjalności.

Przykładowe okna ekranu z programu BRYGADY:

Okno z programu Brygady

IDENTYFIKACJA BRYGAD	
Identyfikator brygady:	1
Nazwisko brygadzysty:	NASIONEK
Norma:	100,0 %

F1 – pomoc Następný Poprzedni Aktualizacja Dopisz Usuń Opcje Koniec

Okno z programu Brygady

Brygady	Przydzielanie	Zestawienia	Opcje	Koniec
Identyfikacja brygad remontowych				
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru F1 – pomoc F2 – instrukcja				

Okno z programu Brygady

PRZYDZIELANIE ZADAŃ rec. 1/61	
Identyfikator zadania	1
Zleceniodawca	DZBM Stare Miasto
Lokalizacja	Skargi 7-11
Opis zadania	
Zajętość formatu 1 88.04.01	Data przydzielenia
Procent wykonania 0	Dzień rozpoczęcia 1
Stadnicki Identyfikator brygady 16	Nazwisko brygadzysty Norma

System komputerowy POTOKI

Kolejnym etapem w rozbudowie komputerowego wspomaganie projektowania procesu realizacji obiektów budowlanych z wykorzystaniem metod organizacji robót uwzględniających sprzężenia czasowe było opracowanie systemu POTOKI. Program napisano na podstawie algorytmów optymalizacyjnych systemu OPTY i dostosowano do nowej generacji komputerów kompatybilnych z IBM PC XT/AT. Instrukcję obsługi napisano edytorem tekstu WORD STAR 2000. Wymagano, aby komputer umożliwiający uruchomienie systemu był wyposażony w system operacyjny DOS wersję 3.10 lub wyższą.

Program ten umożliwia wyznaczenie kolejności realizacji robót dla metod organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi, z uwzględnieniem obu wymienionych sprzężeń czasowych oraz sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. Na tej podstawie otrzymuje się podstawowe charakterystyki czasowe robót, umożliwiające graficzne przedstawienie przebiegu procesów budowlanych.

Przykładowe okna z programu POTOKI:

Okno z programu Potoki

objaśnienia Dane Kolejność Charakterystyki Zakończenie
WYBIERZ Z POWYŻSZEGO MENU za pomocą następujących klawiszy
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru

Okno z programu Potoki

Obliczanie charakterystyk przy założeniu zerowych sprzężeń między frontami roboczymi (z ciągłą pracą na frontach)		
objaśnienia Dane Kolejność Charakterystyki Zakończenie		
Odczytanie Wpisywanie Poprawianie Usuwanie Koniec	Optymalizacja Wpisywanie Usuwanie Raport	1. metoda 2. metoda 3. metoda 4. metoda 5. metoda
WYBIERZ Z POWYŻSZEGO MENU za pomocą następujących klawiszy		
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru		

System komputerowy CHARPOTO

Opracowano wersję programu POTOKI, umożliwiającą analizę wyznaczonych charakterystyk czasowych robót z zastosowaniem pięciu podstawowych metod organizacji uwzględniających sprzężenie czasowe. Charakterystyki te służą do wyznaczania kryteriów efektywności badanego procesu realizacji, którego przebieg planuje się zgodnie z przyjętą metodą organizacji robót budowlanych. Porównanie kryteriów efektywności daje możliwość wyboru metody najbardziej efektywnej.

Program ten pozwala na określenie podstawowych parametrów robót:

- ↳ najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót,
- ↳ najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót,
- ↳ wartości sprzężeń między środkami realizacji,
- ↳ wartości sprzężeń między frontami roboczymi,
- ↳ wartości sprzężeń diagonalnych,
- ↳ wartości sprzężeń odwrotnych diagonalnych,
- ↳ ogólną rezerwę czasu.

Poniżej przedstawiono przykładowe okna z programu CHARPOTO z informacją o założeniach systemu:

Okno z programu Charpoto

CHARAKTERYSTYKI NIERYTMICZNEGO POTOKU

Program wymaga, aby dane wejściowe (czasy realizacji robót na poszczególnych frontach roboczych) były zapamiętane w pliku.

Wybierz jedną z następujących możliwości:

1. DANE NIE SĄ JESZCZE WPROWADZONE
2. DANE SĄ JUŻ ZAPAMIĘTANE W PLIKU
3. NALEŻY POPRAWIĆ DANE W PLIKU
4. NALEŻY ZMIENIĆ KOLEJNOŚĆ FRONTÓW

Przerwanie (koniec programu)

WYBIERAM

Okno z programu Charpoto

Program ten służy do wyznaczania podstawowych charakterystyk modelowanych procesów dla wszystkich pięciu metod. Dla każdego potoku (rodzaju roboty) i każdego frontu roboczego wyznacza się:

* **NAJWCZEŚNIEJSZE TERMINY ROZPOCZĘCIA I ZAKOŃCZENIA ROBÓT.**

* **NAJPÓŹNIEJSZE TERMINY ROZPOCZĘCIA I ZAKOŃCZENIA ROBÓT.**

* **SPRZĘŻENIE MIĘDZY FRONTAMI ROBOCZYMI**, tzn. czas od momentu zakończenia bieżącej roboty do momentu rozpoczęcia następnej roboty na danym froncie. Sprzężenia te określają stopień ciągłości zajmowania frontu. Jeśli front nie ma przestojów, to są one równe zeru. Mają zasadniczy wpływ na skracanie całkowitego czasu realizacji robót. Minimalizuje się je wówczas, gdy głównym kryterium jest przekazanie w najkrótszym terminie realizowanych obiektów do eksploatacji.

* **SPRZĘŻENIE MIĘDZY ŚRODKAMI REALIZACJI**, tzn. czas od momentu zakończenia bieżącej roboty w danym potoku (danego rodzaju) do momentu rozpoczęcia roboty tego rodzaju na następnym froncie. Sprzężenia te określają stopień ciągłości wykorzystania zasobów. Jeśli brygady robocze po zakończeniu roboty na jednym froncie przechodzą bez przestojów na następny front, to sprzężenia te są równe zeru. Są one w praktyce budowlanej bardzo istotne, gdyż obrazują stopień wykorzystania brygad roboczych i sprzętu.

* **SPRZĘŻENIE DIAGONALNE**, tzn. czas od momentu rozpoczęcia bieżącej roboty do momentu rozpoczęcia roboty w następnym potoku na poprzednim froncie.

* **SPRZĘŻENIE ODWROTNE DIAGONALNE** tzn. czas od momentu rozpoczęcia bieżącej roboty do momentu rozpoczęcia roboty w następnym potoku na poprzednim froncie.

* **OGÓLNA REZERWA CZASU**, tzn. różnice między terminem najpóźniejszym a najwcześniejszym rozpoczęcia (zakończenia) danej roboty. Naciśnij ...

Okno z programu Charpoto

CHARAKTERYSTYKI NIERYTMICZNEGO POTOKU

Niniejszy program umożliwia stosowanie pięciu potokowych metod organizacji procesów budowlanych, które znacznie zwiększają możliwości manewru decyzyjnego organizatora produkcji budowlanej. Metody te uwzględniają kombinacje sprzężeń między poszczególnymi robotami wykonywanymi na kolejnych frontach roboczych. Rodzaje występujących sprzężeń stanowią podstawę klasyfikacji tych metod. Stosowanie ich wymaga wyznaczenia optymalnej kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach (zadanie to realizuje inny program), a następnie dla tej kolejności obliczenia charakterystyk nierytmicznego potoku. Charakterystyki te z kolei służą do wyznaczania kryteriów efektywności badanego procesu realizacji, którego przebieg planuje się zgodnie z przyjętą metodą organizacji robót. Porównanie kryteriów efektywności poszczególnych metod daje możliwość wyboru metody najbardziej efektywnej.

Naciśnij dowolny klawisz

System komputerowy ZADANIA

Dla Dzielnicowego Zarządu Budynków Mieszkalnych opracowano komputerowy system planowania pracy brygad kompleksowych przeznaczony dla struktury organizacyjnej DZBM oraz dla jednostek niższego szczebla zarządzania, tj. Rejonów Obsługi Mieszkańców. Proces realizacji kompleksu robót remontowych potraktowano jako zbiór robót budowlanych przewidywanych do wykonania przez zespoły robocze. Metody potokowe organizacji robót określają rodzaj występujących między robotami sprzężeń czasowych, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami. Rozwiązanie całościowe zagadnienia planowania pracy kompleksowych brygad remontowych wymagało rozwiązania kilku zadań częściowych:

↳ opracowania sposobu modelowania potoku z zastosowaniem zapisu macierzowego,

↳ zbadania możliwości tworzenia nowych metod potokowej organizacji robót,

↳ opracowania algorytmu formowania częściowych potoków z uwzględnieniem kilku brygad jednej specjalności. Na tej podstawie opracowano komputerowy system planowania pracy kompleksowych brygad remontowych, który został wdrożony w Dzielnicowym Zarządzie Budynków Mieszkalnych.

Poniżej przedstawiono przykładowe okna z programu ZADANIA.

Okno z programu Zadania

1 – Wpisywanie danych

2 – Obliczenia

3 – Poprawianie danych

4 – Lista zespołów

5 – Lista zawodów

0 – Koniec

Wybór ... 0

Okno z programu Zadania

INFORMACJE O ZADANIACH zapis 1[1]

Identyfikator zadania 0

Zleceniodawca

Lokalizacja

Opis zadania

Czas trwania realizacji (normatywny) 0 [dni]

Czy front wolny? (T/N) T

Data przydzielenia 89.01.14

Procent wykonania 0

Dzień rozpoczęcia 0

Data rozpoczęcia

99.09.09

Nazwisko brygadzysty

Identyfikator brygady 0

Norma 0.0 [%]

Czas wykonania zadania

0 [dni]

DOPISYWANIE NOWEGO ZAPISU – wypełnij rozjaśnione pola
F1 – objaśnienia Następny Poprzedni Zmień Dopisz Usuń Opcje Koniec
F2 – opis klawiszy

INFORMACJE O ZADANIACH zapis 1[1]

Identyfikator zadania	1
Zleceńodawca ???	
Lokalizacja	Miarki 4
Opis zadania ???	
Czas trwania realizacji (normatywny)	330 [dni]
Czy front wolny? (T/N) T	Data przydzielenia 89.01.14
Procent wykonania 0	Dzień rozpoczęcia 0
Data rozpoczęcia 99.09.09	
Nazwisko brygadzysty	
Identyfikator brygady 0	Norma 0.0 [%]
Czas wykonania zadania	0 [dni]

DOPISYWANIE NOWEGO ZAPISU – wypełnij rozjaśnione pola
F1 – objaśnienia Następny Poprzedni Zmień Dopisz Usuń Opcje Koniec
F2 – opis klawiszy

OBJAŚNIENIA

Czas trwania realizacji (normatywny):

Podaj czas trwania realizacji w dniach, przy założeniu
że zadanie będzie realizowane przez brygadę wzorcową.

– Naciśnij dowolny klawisz –

System komputerowy ZESPOŁY EXE

Wraz z pogłębianiem problematyki dotyczącej metod równoległo-potokowych pojawiła się konieczność oprogramowania opracowanych algorytmów. Do rozwiązania problemów organizacyjnych, w celu skrócenia czasów trwania robót wiodących, w miejsce wybranych częściowych potoków wprowadza się potoki szczegółowe. Powoduje to odmienne, niż w przypadku klasycznych metod potokowych, podejście do ustalania kolejności realizacji robót i wyznaczania charakterystyk czasowych potoku. Na podstawie oryginalnych algorytmów, uwzględniających ograniczenia technologiczne i organizacyjne, opracowano programy komputerowe, umożliwiające ich stosowanie w praktyce.

Konieczne było oprogramowanie następujących zagadnień:

- ↳ procedura wyznaczania elementów macierzy pracochłonności robót,
- ↳ wyznaczanie macierzy wyjściowej,
- ↳ wyznaczanie charakterystyk czasowych dla zbioru metod równoległo-potokowych.

W skład niezbędnych programów i zbiorów wchodzi:

- ↳ program EBK, dotyczący zakładania i aktualizacji bazy katalogowej i cenowej,
- ↳ program OBM, służący do zakładania zbiorów transakcyjnych i przetwarzania kosztorysu,
- ↳ zbiór KONFIG.DBF, zawierający konfigurację zbiorów bazowych,
- ↳ zbiór TYTUL.DBF.

System komputerowy ORGANIZATOR

Do opracowania dokumentacji technicznej, a zwłaszcza projektu organizacji budowy, niezbędne stają się systemy komputerowe, umożliwiające w końcowej fazie obliczeń odwzorowywanie wyników za pomocą cyklogramów i sieci zależności. Program ten umożliwia zastosowanie pięciu podstawowych metod organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Zawiera algorytmy optymalizacyjne wykorzystujące do rozwiązywania zagadnień kolejnościowych, m.in. metodę podziału i ograniczeń oraz algorytmy umożliwiające określenie podstawowych parametrów robót budowlanych – najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót i wartości sprzężeń czasowych.

Zakończenie

W pracy przedstawiono nierozwiązane dotychczas zagadnienia dotyczące planowania przebiegu procesów budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Zanalizowano zależności technologiczne i organizacyjne wpływające na bezkolizyjność procesów budowlanych.

Sformułowano i udowodniono 8 twierdzeń dotyczących właściwości metod organizacji, zapewniających bezkolizyjne powiązanie robót budowlanych z uwzględnieniem następstw technologicznych i organizacyjnych.

Przedstawiono metodykę wyznaczania parametrów czasowych robót, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Opracowane algorytmy pozwalają na wyznaczenie wartości terminów robót, zapewniają racjonalne planowanie przebiegu procesów budowlanych z uwzględnieniem szczegółowych zależności technologicznych i organizacyjnych, pomijanych w innych metodykach, np. WBS (*Work Breakdown Structures*). Należy zaznaczyć, że plany realizacji w praktyce ulegają ciągłym modyfikacjom, z uwagi na zmieniające się warunki otoczenia, w jakich przebiega realizacja. Najczęściej są dynamicznym instrumentem umożliwiającym menedżerom zarządzanie zmianami w sposób świadomy i uporządkowany. Służyć temu mogą sprzężenia czasowe, zapewniające czynne wyznaczanie parametrów czasowych robót budowlanych.

W rozdziale pierwszym omówiono założenia metodologii Wrocławskiego Ośrodka Metod Organizacji Robót Budowlanych. Wieloletnie badania problematyki planowania robót budowlanych z wykorzystaniem sprzężeń czasowych pozwoliły wyodrębnić zagadnienia związane z uwzględnieniem szeregowej i równoległej struktury potoków. Ten wyznaczony kierunek badań wyraźnie odróżnia Petersburską Szkołę Metod Organizacji, w której prace koncentrują się wokół modeli i metod organizacji stosowanych do planowania realizacji pojedynczych obiektów lub ich kompleksów. Prace grupy wrocławskiej dotyczą wewnętrznych struktur kompleksów procesów budowlanych wynikających

ze szczegółowej analizy zależności technologicznych i organizacyjnych wyznaczonych za pomocą sprzężeń czasowych.

W rozdziale drugim omówiono algorytmy podstawowych metod organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi, sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. Zaprezentowano algorytmy wyznaczania parametrów czasowych robót z uwzględnieniem zagadnienia kolejnościowego. Przedstawiono syntetyczne schematy algorytmów w zapisie tabelarycznym. Na zakończenie rozdziału ilustracją praktyczną jest przykład liczbowy z realizacji kompleksu obiektów rozbudowywanego zakładu urządzeń energetycznych (w tym przedsięwzięciu uczestniczył autor). Zastosowanie podstawowych metod organizacji pozwoliło skrócić realizację robót od zadanego dyrektywnego terminu o około 10%.

W rozdziale trzecim ujęto zagadnienia modelowania robót budowlanych w formie tabeli – macierzy struktury. Omówiono konstrukcję modeli macierzowych MM, zapewniające odwzorowanie ogólnych założeń organizacyjnych, tj. struktury podziału zadania na procesy robocze, oraz podziału na niezależne konstrukcyjnie części obiektu lub kompleksu – fronty robocze. Z uwagi na zmieniające się wielkości frontów roboczych przedstawiono procedurę skalowania macierzy SMM. Zapewnia ona odwzorowanie zmian zachodzących w czasie realizacji przedsięwzięcia (projektu).

W rozdziale czwartym dokonano przeglądu właściwości metody organizacji robót, w której wykorzystano zależności polegające na uwzględnieniu relacji między kolejnymi procesami budowlanymi na sąsiednich frontach roboczych (w macierzy sprzężenia diagonalne). Pojawiają się bowiem w modelu macierzowym procesów budowlanych zależności diagonalne, tj. o jednakowej sumie indeksów macierzy czasu trwania robót, mające interesujące własności praktyczne. **Sformułowano osiem twierdzeń oraz dowodów, w których uzasadniono szczególne właściwości metody. Pozwalają one na wskazanie wielu czynników wpływających na zjawiska kolizji występujące podczas prowadzenia robót budowlanych. Są to: twierdzenie o minimalnej liczbie robót krytycznych w kompleksie, o sumie czasów robót krytycznych, o jednakowych wartościach rezerw czasu dla późnych i wczesnych terminów, o minimalizacji sprzężeń między frontami roboczymi, o ograniczonym wpływie intensywności robót w ich kompleksie na skrócenie terminu realizacji, o wpływie zmiany kolejności realizacji na czas trwania przedsięwzięcia.**

W rozdziale piątym przedstawiono analizę przypadków następstw technologicznych i organizacyjnych w robotach budowlanych. Wykorzystane sprzę-

żenia czasowe łączą roboty o jednakowych indeksach w zapisie macierzowym. Stanowi to istotny czynnik umożliwiający analizę wariantów organizacyjnych z uwzględnieniem przyjętych uwarunkowań praktycznych. Zaprezentowano analizę przypadku dotyczącego zależności pomiędzy najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia robót powiązanych zerowymi sprzężeniami diagonalnymi. Przedstawiono szczegółowy przegląd możliwych zależności, eliminując te, które nie mają praktycznego odniesienia. Rozpisano szczegółowe algorytmy wyznaczania charakterystyk czasowych robót, niezbędne w procesie harmonogramowania robót. Ponadto omówiono możliwe zależności występujące pomiędzy robotami w przypadkach najpóźniejszych terminów ich zakończenia. Opracowano algorytmy wyznaczania charakterystyk czasowych dla robót powiązanych zależnościami technologicznymi i organizacyjnymi wyznaczonymi za pomocą sprzężeń diagonalnych. Szczegółowa analiza pozwoliła wyodrębnić te przypadki, które mają szczególne znaczenie praktyczne w procesie budowy. Przedstawiono przykład liczbowy, testujący opracowane algorytmy, wykorzystujący metodykę niezbędną do budowy optymalnych (z kryterium minimalnego czasu realizacji robót) harmonogramów realizacji obiektów budowlanych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują na możliwości skracania terminów realizacji, z uwzględnieniem ograniczeń pomijanych w praktyce.

W pracy szczegółowo zanalizowano zależności pomiędzy procesami technologicznymi, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych oraz relacji technologicznych (w zapisie macierzowym), mające bezpośredni wpływ na efektywne planowanie robót budowlanych. Opracowano metodykę planowania kompleksu procesów budowlanych – sformułowano i udowodniono twierdzenia o szczególnych właściwościach następstw technologicznych. Udoskonalono metodykę planowania przebiegu robót budowlanych i wykazano znaczenie szczególnych ograniczeń technologicznych i organizacyjnych na bezkolizyjny przebieg procesów budowlanych.

Literatura

- [1] Afanasev V.A., *Algoritmy formirovanija rasčeta i optimizacii metod organizacii rabot.* Učebnoe pasobie, Leningrad 1980.
- [2] Afanasev V.A., *Modeli organizacii rabot LISI.* Sbornik trudov, nr 6, Leningrad 1977.
- [3] Afanasev V.A., *Potočnaja organizacija stroitelstva.* Strojizdat, Leningrad 1977.
- [4] Afanasev V.A., *Učet zatrat vremeni na pereboizirovanie stroitelnych organizacii pri formirovani i optimalizacii kompleksov potokov.* Aktualnye problemy sovetskogo stroitelstva, Sankt-Petersburg 1994.
- [5] Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Formirovanie kompleksnyh potokov iz obektnykh i orientirovanoe naznačenie dopolnitelnykh odnotipnykh brygad.* TNIPB, Wrocław–Szklarska Poręba 1990.
- [6] Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Proektirovanie organizacii stroitelstva, organizacii i proizvodstva rabot.* LISI, Leningrad 1988.
- [7] Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Paralelno-potočnaja organizacija stroitelstva.* LISI, Leningrad 1985.
- [8] Afanasev V.A., Mrozowicz J., Hejducki Z., *Metoda potokowej organizacii robót z krytycznymi robotami wyznaczonymi przy uwzględnieniu sprzężeń diagonalnych.* XXXIX konferencja naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1980.
- [9] Afanasev V.A., Mrozowicz J., Smirnov A., *Vklad v razvitie teorii potočnoj organizacii rabot.* Na strojkach Rossii, nr 8, Leningrad 1978.
- [10] Afanasev V.A., Afanasev A.V., Valeeva V.K., Vlasov V.N., *Novye raznovidnosti potočnoj organizacii stroitelstva.* Sankt-Petersburg 1991.
- [11] Antoszkiewicz J., *Metody heurystyczne.* PWE, Warszawa 1982.
- [12] Acker D.D., *Skill in Communication.* Fort Belvoir, VA: Defense System Management College. Chap. 1.2 and 8, 1980.
- [13] Al Sarraj Z.M., *Formal development of line-of-balance technique.* J. Constr. Eng. Manage., 116 (4), 1990, 689–704.
- [14] Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K., *Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology.* Department of Civil and Architectural Engineering, Illinois Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Honan University, South Korea 2001.
- [15] Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K., *Effect of learning on line-of-balance scheduling.* International Journal of Project Management, In press, 2001.
- [16] Biernacki J., Cyunel B., *Metody sieciowe w budownictwie.* Arkady, Warszawa 1989.

- [17] Biliński T., Czachorowski J., *Bauen und Baurecht in Polen*. Hinweise für Investoren Deutsch-Polnische Wirtschaftsförderungsgesellschaft AG, Szczecin 1995.
- [18] Biliński T., Czachorowski J., *Proces budowlany wg stanu prawnego w dniu 1 stycznia 1995*. Wyd. CUTOB PZITB, Wrocław 1995.
- [19] Blum E., *Betriebs-Organisation: Methoden und Techniken*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1991.
- [20] Bubnicki Z., *System Engineering-Control Engineering Flexible Manufacturing Systems*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 1995.
- [21] Budzyński S., Chorobiński A., *Metoda podziału i ograniczeń w projektowaniu zakładów przemysłowych*. PWN, Warszawa 1967.
- [22] Bennet J., *International construction project management*. John Wiley and Sons, New York 1991.
- [23] Bernecker G., *Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen*. Verlag TUV Rheinland, 1984.
- [24] Brandenberger J., Ruosch E., *Projektmanagement im Bauwesen*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1991.
- [25] Clough R.H., Sears G.A., *Construction project management*. 3 ed., John Wiley and Sons, New York 1991.
- [26] Coffman E.G., *Teoria szeregowania zadań*. WNT, Warszawa 1980.
- [27] Chrzanowski Jr. E.N., Johnston D.W., *Application of linear construction*. J. Constr. Eng., 112 (4), 1986, 476–491.
- [28] Czapliński K., *Beziehungen zwischen Konstruktiver und Technologischer Projektierung*. VII IKIB, Leipzig 1984.
- [29] Czapliński K., *Realizacja obiektów budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [30] Czapliński K., Hejducki Z., Mrozowicz J., *Modelieren des Flusses mit Dauerbetrieb der Brigaden in Diagonalen (mit Null-Stufenkopplungen)*. Industrialisierung, Leipzig 1984.
- [31] Czapliński K., Mrozowicz J., Musiał W., *Podstawy metodologii projektowania w budownictwie*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [32] Czapliński K., Mrozowicz J., *Realizacja obiektów budowlanych. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1983.
- [33] Cooper D.F., Chapman C.B., *Risk Analysis for Large Projects*. John Wiley and Sons, Chichester 1987.
- [34] Cleland D.I., King W.R. (eds.), *Project Management Handbook*. 2nd, Ed. Van Nostrand Reinhold, New York 1988.
- [35] Cavendish P., Martin D.M., *Negotiating and Contracting for Project Management*. International Journal of Project Management, Vol. 10, No. 2, 1992.
- [36] Dyżewski A., *Technologia i organizacja budowy*. Arkady, Warszawa 1990.
- [37] Dinsmore P.C., *Human factors in Project Management*. Rev. edit., New York 1990.
- [38] Fleischmann H.D., *Bauorganisation Ablaufplanung Baustelleneinrichtung, Betriebsorganisation, Arbeitsorganisation*. Wernerverlag, Dusseldorf 1983.
- [39] Frame J.D., *Managing projects in organisations*. San Francisco 1987.
- [40] Grabowski J., *Uogólnione zagadnienia optymalizacji kolejności operacji w dyskretnych systemach produkcyjnych*. Prace Nauk. Inst. Cybernetyki 50, Monografie 7, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.

- [41] Grudzewski W.M., *Badania operacyjne w organizacji i zarządzaniu* (praca zbiorowa). PWN, Warszawa 1985.
- [42] Gusakov A.A., *Modelirovanie i primenenie vychislitelnoy tekhniki v stroitelnom proizvodstvie*. Strojizdat, Moskva 1979.
- [43] Hamerlink D.J., *Linear scheduling model: The development of a linear scheduling model with micro computer application for highway construction control*. PhD tezis, Iowa State Univ., 1995
- [44] Hamerlink D.J., Rowings J.E., *Linear scheduling model: Development of controlling activity path*. Journal of Construction Engineering and Management, 124(4), 1998, 266–268.
- [45] Harris R.B., Ionnon P.G., *Scheduling projects with repeating activities*. Journal of Construction Engineering and Management, 124(4), 1998, 269–278.
- [46] Hartman S., *Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm*. Manuskrypte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, Nr. 435, Germany 1997.
- [47] Hegazy T., *Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms*. Canadian Journal of Civil Engineering, 26, 1999, 685–697.
- [48] Hegazy T., Moselhi O., Fazio P., *BAL: an algorithm for scheduling and control of linear projects*. AACE Transactions, C. 8, 8.1–8.14, 1993.
- [49] Herroelen W., De Reyck B., Demeulemeester E., *Resource-constrained project scheduling: a survey of recent developments*. Computers and Operations research, 25, 1998, 279–302.
- [50] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonizacja kompleksów robót o złożonej strukturze wewnętrznej*. Przegląd budowlany, nr 5, 1989.
- [51] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonizacja potoków z uwzględnieniem ustalonych zasobów (liczby brygad roboczych)*. XXXII konferencja naukowa nt.: Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komitet Nauki PZITB, Krynica 1986.
- [52] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 109, Gliwice 1992.
- [53] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej z ciągłym prowadzeniem robót na obiektach budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 115, Gliwice 1994.
- [54] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Komputerowo wspomagane projektowanie ciągłej pracy brygad roboczych w nierytmicznych procesach*. Przegląd Budowlany, nr 4, 1984.
- [55] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Problemy harmonogramowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 75, Gliwice 1984.
- [56] Hejducki Z., Mrozowicz J., *The Problems of Row Structure Flow Modeling*. International Symposium, Sankt Petersburg 1995.
- [57] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Ustalenie kolejności w zbiorze potoków obejmujących kompleks obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 85, Gliwice 1986.
- [58] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Ustalenie kolejności prowadzenia robót budowlanych*. XXXVI konferencja naukowa. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komitet Nauki PZITB, Referaty, t. 5, Krynica 1990.

- [59] Hejducki Z., Mrozowicz J., Sawicki M., *Wybrane sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Konferencja TNIPB, Wrocław-Polanica 1996.
- [60] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienie wykorzystania zasobów w procesie planowania realizacji kompleksu obiektów*. Problemy Rozwoju Budownictwa, nr 2, 1984.
- [61] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienia synchronizacji kompleksów robót budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 95, 1988.
- [62] Hejducki Z., *Próba zastosowania potokowych metod organizacji robót do planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych*. Praca doktorska. Wrocław 1985.
- [63] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 125, Gliwice 1998.
- [64] Hejducki Z., Hoła B., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych o równoległej strukturze wewnętrznej*. Konferencja naukowa, Sekcja organizacji i zarządzania Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, kwiecień 1998.
- [65] Jaworski K.M., *Projektowanie realizacji budowy według kryterium niezawodności. Teoria i metoda*. Budownictwo, z. 66, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
- [66] Jaworski K.M., Marcinkowski R., *Harmonizacja niejednorodnych procesów technologicznych w planowaniu przedsięwzięć budowlanych*. Przegląd Budowlany, nr 12, 1990.
- [67] Jaworski K.M., Minasowicz A., *Decision talking problems in defining the quality of the chosen elements of investment process*. V International Conference EUROPA'95, France, Lyon 1995.
- [68] Jaworski K.M., *Metodologia projektowania realizacji budowy*. PWN, Warszawa 1999.
- [69] Jaworski K.M., Lenkiewicz W., *Organizacja i planowanie budowy*. T. 1. *Wiadomości ogólne*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992.
- [70] Jaworski K.M., *Wielokryterialna analiza jakości harmonogramów budowlanych*. Przegląd Budowlany, nr 1, styczeń 2002.
- [71] Jerzak M., *Organizacja i ekonomika wykonawstwa budowlano-montażowego*. PWN, Warszawa 1990.
- [72] Johnson S.M., *Optimal Two- and Three-stage production schedules with set-up times included*. Naval Res. Quart, Vol. 1, 1954.
- [73] Johnston, D.W., *Linear scheduling method for highway construction*, J. Constr. Div., Am. Soc. Civ. Eng, 107 (2), 1984, 247–261.
- [74] Kapliński O., *Informatyka stosowana w inżynierii produkcji budowlanej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.
- [75] Kapliński O., *Techniki decyzyjne w organizacji i zarządzaniu w budownictwie. Stan wiedzy i problemy komputeryzacji*. Metody komputerowe w inżynierii lądowej, t. 4, nr 2, 1994.
- [76] Kapliński O., Kamiński R., Pawlak G., *Komputer IBM PC w przedsiębiorstwie budowlanym i na budowie*. TNOiK, Poznań 1991.
- [77] Kapliński O., Stefański A., *Metody sieciowe w organizacji i planowaniu budowy*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1978.
- [78] Kapliński O., *Modelling of Construction Processes*. PAN, Studia z zakresu inżynierii, nr 43, Warszawa 1997.
- [79] Kapliński O., Thiel T., *Some aspects of sensitivity analysis in the entropy method*. Foundations of Control Engineering, Vol. 15.1, 1990, s. 39–48.

- [80] Kasprowicz T., *Dwukryterialna optymalizacja organizacji robót inżynieryjno-budowlanych*. Archiwum Inżynierii Łądowej, t. XXXVII, z. 3–4, 1991.
- [81] Kasprowicz T., *Harmonogramowanie robót inżynieryjno-budowlanych z terminowym zapotrzebowaniem niezależnych brygad roboczych*. Biuletyn WAT, nr 2 (498), Warszawa 1994.
- [82] Kasprowicz T., *Metody wyboru technologii i organizacji robót inżynieryjno-budowlanych*. WAT, Warszawa 1990.
- [83] Kasprowicz T., *Cost-Time Scheduling of Complex Operation Execution*. AACE International Transactions 43rd, Denver, Colorado 1999.
- [84] Kolisch R., Hartmann S., *Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis*. In: Project scheduling. Edited by J. Weglarz, Kluwer, Boston, Mass., 1999, 147–178.
- [85] Kosecki A., *Stochastyczne modele sieciowe przy planowaniu zadań budowlanych*. Zeszyt Naukowy nr 2, Politechnika Krakowska, Kraków 1989.
- [86] Kostrzewski M., *Organizacja zarządzania budową wielkich kompleksów produkcyjnych*. UW, Warszawa 1987.
- [87] Kowalowski H. i in., *Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych*. WNT, Warszawa 1984.
- [88] Kerzner H., *Project Management: a system approach to planning, scheduling and controlling*. 4th ed., Van Nostrand Reinhold, New York 1992.
- [89] Kessler H., Winkelhofer G.A., *Projektmanagement*. Verlag TUV Rheinland, 1997.
- [90] Lenkiewicz W., *Organizacja i planowanie budowy* (praca zbiorowa). PWN, Warszawa 1985.
- [91] Lenkiewicz W., Michnowski Z., *Elementy inżynierii systemów*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
- [92] Lomnicki Z.A., A „Branch-and-Bound” Algorithm for the Exact Solution of the Tree-machine Scheduling Problem. Operational Research Quarterly, Vol. 11, No. 6, 1965.
- [93] Liberzon V., *Russian Approach to Project Management Software: Spider Project Package*. International Symposium, Sankt Petersburg 1995.
- [94] Leu S.-S., Yang C.-H., *Ga-base multicriteria optimal model for construction scheduling*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127, 1999, 270–280.
- [95] Marcinkowski R., *Harmonogramowanie zadań inżynieryjno-budowlanych według wybranych kryteriów decyzyjnych*. Rozprawa doktorska. WAT, Warszawa 1990.
- [96] Marcinkowski R., *Metody harmonogramowania przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych*. WAT, Warszawa 1995.
- [97] Marcinkowski R., *Optymalizacja produkcji dla jednostki wykonawstwa budowlanego*. Materiały konferencji naukowej Inżynieria procesów budowlanych, Szczecin–Międzyzdroje 1999.
- [98] Marcinkowski R., *Operacyjna ocen wykonalności zadań inżynieryjnych*. Biuletyn WAT, nr 2, Warszawa 2002.
- [99] Marcinkowski R., *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej*. WAT, Warszawa 2002.
- [100] Michnowski Z., *Organizacja i planowanie budowy*. T. 2. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.

- [101] Miłosz M., Sobotka A., *Organizacja i zarządzanie w budownictwie*. Cz. 4. *Modelowanie symulacyjne procesów budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1993.
- [102] Mitten L.G., „*Branch-and-Bound*” *Methods. General Formulation and Properties*. Operation Research, No. 18, Wiley and Sons, 1970.
- [103] Mohamad Maher Jaudi, *Równoległo-potokowe metody organizacji procesów budowlanych*. Praca doktorska. Wrocław 1990.
- [104] Mrozowicz J., *Metody potokowe organizacji procesów budowlanych o charakterze deterministycznym*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa, Seria: Monografie 14, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1982.
- [105] Mrozowicz J., Hejducki Z., *Równoległo-potokowa metoda organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych*. XXXIX konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1993.
- [106] Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 1997.
- [107] Martin T.M., Teagarden C.C., Lamberth C.F., *Contract Administration for the Project Manager*. 1983.
- [108] Martino J.P., *Research and development project selection*. Van Nostrand Reinhold, 1995.
- [109] Meridith J.R., Mantel S.J., *Project Management – A Managerial Approach*. Wiley and Sons, New York 1985.
- [110] *Management in Construction Project. Construction Risk Management*. Proc. Inst. (1). Eng. Part 1, 1985.
- [111] Mattila K.G., Park A., *Comparison of Linear Scheduling Model and Repetitive Scheduling Method*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2003.
- [112] Mattila K.G., Abraham D.M., *Resource leveling of linear schedules using integer linear programming*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120 (4), 1998, 232–244.
- [113] Moselhi O., El-Rayes K., *Scheduling of respective projects with cost optimization*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 199, 1993, 681–697.
- [114] Nowicki K., *Organizacja i ekonomika budowy*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992.
- [115] Peurifoy R.L., Ledbetter W.B., Schexnayder C.J., *Construction planning, equipment, and methods*. Wiley and Sons, New York 1996.
- [116] *Podstawy organizacji zarządzania i technologii w budownictwie*. Praca zbiorowa pod red. Z. Michnowskiego, Arkady, Warszawa 1985.
- [117] Portugal V.M., *Isledovanie assymptotičeskogo povenija zadači Džonsona*. Kibernetika, nr 11, 1971.
- [118] *Project Management Body of Knowledge (PM Book)*. Project Management Institute, Drexel Hill, Pennsylvania 1987.
- [119] *Projektmanagement beim Bauen.../VDI-Gesellschaft Bautechnik*, 1992.
- [120] Rahbar F.F., Rowings J.E., *Respective activity scheduling process*. Trans., Am. Assn. Cost Eng., 2, O.5.1–O.5.8, 1992.
- [121] Reda R.M., *RPM: respective project modeling*. J. Constr. Eng. Manag., 116 (2), 1990, 316–330.
- [122] Rösch M., Volkmann R., *Bau-Projektmanagement*. Verlag TUV Rheinland, 1994.

- [123] Rowiński L., *Organizacja i zarządzanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.
- [124] Rowiński L., *Organizacja produkcji budowlanej*. Arkady, Warszawa, 1982.
- [125] Rowings J.E., Rahbar F., *Use of linear scheduling in transportation projects*. In: *Proceedings of the Transportation Research Board 71st Annual Meeting*. TRB, D.C. Washington 1992.
- [126] Russel A.D., Wong W.C.M., *New generation of planning structures*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119, 1993, 196–214.
- [127] Sawicki M., *Sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Praca doktorska. Wydział Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.
- [128] Sobotka A., *Wrażliwość decyzji logistycznych w przedsiębiorstwie budowlanym*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
- [129] Sysło M., Narsing D., Kowalik J., *Algorytmy optymalizacji dyskretniej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
- [130] Stuckenbruck L.C., *The Implementation of Project Management: The Professional's Handbook*. Addison-Wesley Publishing Company, PMI. Drexel Hill (10th Pr.), 1992.
- [131] Stuckenbruck L.C., *The Implementation of Project Management*. Handbook, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York 1988.
- [132] Schneider H., *Outsourcing von Gebäude- und Verwaltungsdiensten*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1996.
- [133] Sommer H., *Projektmanagement im Hochbau*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1994.
- [134] Steinberg C., *Projektmanagement in der Praxis*. Verlag TUV Rheinland, 1994.
- [135] Schwarze J., *Netzplantechnik*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1994.
- [136] Schub A., Stark K., *Life cycle cost von Bauobjekten*. Verlag TUV Rheinland, 1985.
- [137] Senouci A.B., Eldin N.N., *Dynamic programming approach to scheduling of nonserial linear project*. Journal of Computing in Civil Engineering, 10, 1996, 106–144.
- [138] Skibniewski J., Son J., *Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: hybrid approach*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 125, No. 1, 1999.
- [139] Stella P., Glavinich T., *Construction planning and scheduling*. 2nd ed., Associated General Contractors of America, Alexandria 1994.
- [140] Stradel O., Cacha J., *Time space scheduling method*. J. Constr. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 108 (3), 1982, 445–457.
- [141] Suhail S.A., Neale R.H., *CPM/LOB: New methodology to integrate CPM and line of balance*. J. Constr. Eng. Manag., 120 (3), 1994, 667–684.
- [142] Thabet W.Y., Beliveau Y.J., *HVLS: horizontal and vertical logic scheduling for multi-story projects*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120, 1994, 875–892.
- [143] Turner J.R., *The Handbook of Project Based Management*. Mc Grow-Hill, Maidenhead 1992.
- [144] Thomson P.A., *Engineering construction risks*. Thomas Telford, London 1992.
- [145] Węglarz J., *Sterowanie w systemach typu kompleks operacji*. PWN, Warszawa 1981.
- [146] Węglarz J., *Project Scheduling: Recent Models Algorithms and Applications*. International Series on Operations Research & Management Science Kluwer, Dordrecht 1999.

- [147] Wischniewski E., *Aktives Projektmanagement für das Bauwesen*. Verlag Wiesbaden, Wiesbaden 1997.
- [148] Van Der Merwe, *Multi Project Management*. International Journal of Project Management, August 1997, Vol. 15, No. 4, 1997, 223–234.
- [149] Volker H., Gasta P., *Bauplanung mit MS-Project 4.0*, Verlag TUV Rheinland, 1994.
- [150] Voropaev V.I., *Modeli i metody kalendarnego planirovanija v avtomatizirovanyh sistemach upravlenija stroitelstvom*. Strojizdat, Moskva 1995.
- [151] Voropaev V.I., Scheinberg G.M., *Project Management as a Reform Tool*. PMI'93 in San Diego, Symposium PMI, Drexel Hill. Pennsylvania 2001.
- [152] Vorster M.C., Parvin C.M., *Linear scheduling for highway constructors and state DOT's*. Videotapes, P&W Publications, Richmond 1990.
- [153] Vorster M.C., Bafna T., *Discussion of 'Formal development of line-of-balance technique' by Z. M. Al Sarraj*. J. Constr. Eng. Manag., 118 (1), 1992, 210–211.
- [154] Vorster M.C., Beliveau Y.J., Bafna T., *Linear scheduling and visualization*. Transp. Res. Rec. 1351, 1992, 32–39.
- [155] Wang C., Huang Y., *Controlling activity interval times in LOB scheduling*. Construction Management and Economics, 16, 1998, 5–16.
- [156] Zavadskas E.K., *Mehrkriterielle Entscheidungen im Bauwesen*. Technika, Vilnius 2000.
- [157] Zawadskas E.K., Kaklauskas A., Turskis Z., *Multikriteria decision-making system for building refurbishment Statyba*. Vilnius 1997.

Wykaz podstawowej literatury Wrocławskiego Ośrodka Metod Organizacji Procesów Budowlanych

1. Mrozowicz J., *Metody potokowe organizacji procesów budowlanych o charakterze deterministycznym*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa, Seria: Monografie 14. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1982.
2. Czapliński K., Mrozowicz J., *Realizacja obiektów budowlanych. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1983.
3. Czapliński K., Hejducki Z., Mrozowicz J., *Modelieren des Flusses mit Dauerbetrieb der Brigaden in Diagonalen*. In: Industrialisierung, Conference Proceedings, Leipzig 1984, 37–46.
4. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Problemy harmonogramowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 75, Gliwice 1984.
5. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienie wykorzystania zasobów w procesie planowania realizacji kompleksu obiektów*. Problemy Rozwoju Budownictwa, nr 2, 1984.
6. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Komputerowo wspomagane projektowanie ciągłej pracy brygad roboczych w nierytmicznych procesach*. Przegląd Budowlany, nr 4, 1984.
7. Hejducki Z., *Próba zastosowania potokowych metod organizacji robót do planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych*. Praca doktorska. Wrocław 1985.
8. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Ustalenie kolejności w zbiorze potoków obejmujących kompleks obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 85, Gliwice 1986.

9. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonizacja potoków z uwzględnieniem ustalonych zasobów (liczby brygad roboczych)*. XXXII konferencja naukowa: Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komitet Nauki PZITB, Krynica 1986.
10. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienia synchronizacji kompleksów robót budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 95, Gliwice 1988.
11. Hejducki Z., Mrozowicz J., Maher J., *Równoległo-potokowe metody organizacji robót budowlanych*. Krynica 1989.
12. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonizacja kompleksów robót o złożonej strukturze wewnętrznej*. Przegląd budowlany, nr 5, 1989.
13. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Ustalenie kolejności prowadzenia robót budowlanych*. XXXVI konferencja naukowa. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komitet Nauki PZITB. Referaty, t. 5. Krynica 1990.
14. Mohamad Maher Jaudi, *Równoległo-potokowe metody organizacji procesów budowlanych*. Praca doktorska, Wydział Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
15. Hejducki Z., Mrozowicz J., Durlej B., *Komputerowy system kierowania pracą brygad roboczych w remontach budynków*. Konferencja naukowa, KILiW PAN, Krynica 1991.
16. Mrozowicz J., Konior J., Sawicki M., *Komputerowa symulacja zastosowania potokowych metod organizacji w remontach budynków mieszkalnych*. II konferencja TNIPB, Zielona Góra 1991.
17. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 109, Gliwice 1992.
18. Mrozowicz J., Hejducki Z., *Równoległo-potokowa metoda organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych*. XXXIX konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1993.
19. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej z ciągłym prowadzeniem robót na obiektach budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 115, Gliwice 1994.
20. Hejducki Z., Mrozowicz J., *The Problems of Row Structure Flow Modeling*. International Symposium. Sankt Petersburg 1995.
21. Hejducki Z., Mrozowicz J., Sawicki M., *Wybrane sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Konferencja TNIPB, Wrocław-Polanica 1996.
22. Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 1997.
23. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Kalendarne planowanie pracy brygad z ispolzovaniem paralelnogo-potočnogo metoda*. International Symposium Project Management, Moskva 1997.
24. Sawicki M., *Sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Praca doktorska, Wydział Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
25. Hejducki Z., Gawron K., *Analiza harmonogramów powykonawczych z realizacji zespołu silosów żelbetowych*. Konferencja naukowo-techniczna, Bydgoszcz 1997.
26. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 125, Gliwice 1998.

27. Mrozowicz J., Sawicki M., Gawron K., *Nowe modele organizacji robót uwzględniające kompleksy sprzężeń*. Konferencja naukowa, Sekcja organizacji i zarządzania KILiW PAN, Lublin–Kazimierz Dolny, kwiecień 1998.
28. Hejducki Z., Hoła B., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych o równoległej strukturze wewnętrznej*. Konferencja naukowa, Sekcja organizacji i zarządzania KILiW PAN, Lublin–Kazimierz Dolny, kwiecień 1998.
29. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Kalendarnoe planirovanie raboty brygad*. International Conference, Vol. IV, Vilnius 1999.
30. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Problema synchronizacii kompleksov stoitelných rabot*. International Symposium Project Management, Moskva 1999.
31. Hejducki Z., *Construction work organization methods taking into account zero values of diagonal couplings*. YUPMA, Beograd 2000.
32. Hejducki Z., *Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 34, Wrocław 2000.
33. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Stream methods of construction work organization: an introduction to the problem*. Engineering, Construction and Architectural Management 8/2, 2001, 80–89.
34. Afanasev V.A., Afanasev A.V., Hejducki Z., *Problemy realizacji kompleksów mieszkaniowych w Rosji*. Kalendarz Budowlany 2, 2002.
35. Hejducki Z., *Synchronization of construction work in Project Management*. VII Vedečka Konferencja Koszyce maj 2002, 83–90.
36. Gawron K., *Nowe warianty diagonalnych i odwrotnych diagonalnych sprzężeń czasowych jako podstaw tworzenia metod organizacji procesów budowlanych*. Rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
37. Hejducki Z., Mrozowicz J., *Założenia Międzynarodowej Szkoły Metod Organizacji Procesów Budowlanych*. Konferencja naukowa KILiW PAN, Krynica 2002.
38. Hejducki Z., Zioberski J., *Szczególne zagadnienie zarządzania przedsięwzięciem budowlanym w systemie PMCM*. Konferencja naukowa, Lublin–Kazimierz Dolny 2003.
39. Hejducki Z., Letki R., *Wybrane zagadnienia synchronizacji złożonych procesów budowlanych*. Konferencja naukowa, Lublin–Kazimierz Dolny 2003.
40. Hejducki Z., Gawron K., *Możliwości wariantowania metod organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń czasowych*. Konferencja naukowa, Lublin–Kazimierz Dolny 2003.
41. Hejducki Z., Urmański M., *Analiza efektywności obliczeniowej algorytmów uwzględniających sprzężenia czasowe*. Konferencja naukowa, Lublin–Kazimierz Dolny 2003.
42. Hejducki Z., *Analiza wybranych relacji między procesami budowlanymi w modelu macierzowym (MM)*. XXIX KN KILiW PAN, Krynica 2003.
43. Hejducki Z., *Scheduling problem of construction work with time couplings*. International Conference MOSIBUS, Vilnius 2003.
44. Hejducki Z., *Sequencing problems in methods of organising construction processes*. Engineering Construction and Architectural Management, Vol. 1, 2004.
45. Hejducki Z., *Scheduling problem of construction activity with time couplings*. Journal of Civil Engineering Management, Vol. IX, No. 4, 2003.





W pracy przedstawiono nierozwiązane dotychczas zagadnienia dotyczące planowania przebiegu procesów budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Zanalizowano zależności technologiczne i organizacyjne wpływające na bezkolizyjność procesów budowlanych. Sformułowano i udowodniono osiem twierdzeń dotyczących właściwości metod organizacji, zapewniających bezkolizyjne powiązanie robót budowlanych z uwzględnieniem następstw technologicznych i organizacyjnych.

Omówiono metodykę wyznaczania parametrów czasowych robót, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Opracowane algorytmy pozwalają na wyznaczenie terminów robót, zapewniają racjonalne planowanie przebiegu procesów budowlanych z uwzględnieniem szczegółowych zależności technologicznych i organizacyjnych, pomijanych w innych metodykach. Plany realizacji w praktyce ulegają ciągłym modyfikacjom, ze względu na zmieniające się warunki otoczenia, w jakich przebiega realizacja. Najczęściej są dynamicznym instrumentem umożliwiającym menedżerom zarządzanie zmianami w sposób świadomy i uporządkowany. Służyć temu mogą sprzężenia czasowe, zapewniające czynne wyznaczanie parametrów czasowych robót budowlanych.

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
budynek A-1 PWr., tel. (0-71) 320-25-34;
„Tech”

plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. (0-71) 320-32-52
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową

ISBN 83-7085-771-X