

A4111 I

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

77

Seria: Monografie

34

Zdzisław Hejducki

Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych

Wrocław 2000

Dz. 8



Zdzisław HEJDUCKI

Time couplings incorporated in organizational methods
of complex construction processes

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

77

Seria:
Monografie

34



Zdzisław Hejducki

Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych



Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 2000

Recenzenci

Tadeusz KASPROWICZ

Henryk KOWALOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Alicja KORDAS

Korekta

Maria IZBICKA

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9875

Nakład 130+44 egz. Ark. wyd. 8,75. Ark. druk. 7³/₄. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 327/2000.

*Metody organizacji robót budowlanych,
sprzężenia czasowe*

Zdzisław HEJDUCKI*

SPRZĘŻENIA CZASOWE W METODACH ORGANIZACJI ZŁOŻONYCH PROCESÓW BUDOWLANYCH

Opracowano nie rozwiązane dotychczas problemy modelowania robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Dotyczą one metod kolejnego wykonania bez uwzględnienia jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub z jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju. Przedstawiono zagadnienia związane z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych, odwrotnie diagonalnych, przekątnych i ich kombinacji, tworzących nowe modele organizacji robót budowlanych oraz algorytmy synchronizacji robót i praktyczne przykłady liczbowe. Zaprezentowano rozwinięcie metod organizacji robót o strukturze równoległej wraz z algorytmami harmonogramowania robót, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych tworzących równoległe zależności między robotami i ich kompleksami. Podano warianty oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty lub ich kompleksy zapewniające szeregową strukturę. Dokonano identyfikacji sprzężeń czasowych tworzących zależności szeregowo między robotami lub ich grupami. Dla pełnego obrazu możliwości organizacji, wyrażanych za pomocą sprzężeń czasowych, przedstawiono warianty metod równoległo-potokowych i szeregowo-potokowych. Są one wynikiem uwzględnienia relacji czasowych odwzorowanych za pomocą zestawień, np. sprzężeń przekątnych, odwrotnych diagonalnych i innych. Każda nowo zaprezentowana metodyka została zweryfikowana na przykładach liczbowych, dotyczących realizacji robót budowlanych. Weryfikują one przedstawione w rozprawie nowe metody organizacji uwzględniające sprzężenia czasowe.

Zestawienie oznaczeń

- $\{B\}$ zbiór grup roboczych (firm)
- B_k oznaczenie grupy roboczej B o numerze k
- D dyrektywny termin realizacji
- $\{F_i\}$ zbiór frontów roboczych

* Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Recenzenci

Tadeusz KASPROWICZ

Henryk KOWALOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Alicja KORDAS

Korekta

Maria IZBICKA

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9875

Nakład 130+44 egz. Ark. wyd. 8,75. Ark. druk. 7³/₄. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 327/2000.

*Metody organizacji robót budowlanych,
sprzężenia czasowe*

Zdzisław HEJDUCKI*

SPRZĘŻENIA CZASOWE W METODACH ORGANIZACJI ZŁOŻONYCH PROCESÓW BUDOWLANYCH

Opracowano nie rozwiązane dotychczas problemy modelowania robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Dotyczą one metod kolejnego wykonania bez uwzględnienia jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub z jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju. Przedstawiono zagadnienia związane z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych, odwrotnie diagonalnych, przekątnych i ich kombinacji, tworzących nowe modele organizacji robót budowlanych oraz algorytmy synchronizacji robót i praktyczne przykłady liczbowe. Zaprezentowano rozwinięcie metod organizacji robót o strukturze równoległej wraz z algorytmami harmonogramowania robót, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych tworzących równoległe zależności między robotami i ich kompleksami. Podano warianty oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty lub ich kompleksy zapewniające szeregową strukturę. Dokonano identyfikacji sprzężeń czasowych tworzących zależności szeregowo między robotami lub ich grupami. Dla pełnego obrazu możliwości organizacji, wyrażanych za pomocą sprzężeń czasowych, przedstawiono warianty metod równoległo-potokowych i szeregowo-potokowych. Są one wynikiem uwzględnienia relacji czasowych odwzorowanych za pomocą zestawień, np. sprzężeń przekątnych, odwrotnych diagonalnych i innych. Każda nowo zaprezentowana metodyka została zweryfikowana na przykładach liczbowych, dotyczących realizacji robót budowlanych. Weryfikują one przedstawione w rozprawie nowe metody organizacji uwzględniające sprzężenia czasowe.

Zestawienie oznaczeń

- $\{B\}$ zbiór grup roboczych (firm)
- B_k oznaczenie grupy roboczej B o numerze k
- D dyrektywny termin realizacji
- $\{F_i\}$ zbiór frontów roboczych

* Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

GMM	graniczne możliwe minimum, wskaźnik węzła drzewa wariantów
i	indeks frontu roboczego w macierzy [T]
$J[T_1]$	macierz kolumnowa utworzona z elementów kolumny J dla T_1
j	indeks rodzaju robót w macierzy [T]
k	numer częściowego potoku
$L_{\min}$	minimalny termin realizacji robót
m	liczba kolumn w macierzy [T]
MAX	maksymalna wartość pomocnicza
MW	macierz wskaźników
n	liczba wierszy w macierzy [T]
$\{O_i\}$	zbiór zadań inwestycyjnych
$\{P_i\}$	zbiór procesów roboczych
q	diagonał w macierzy czasów trwania robót – element o jednakowej sumie indeksów
R_{ij}	ogólne rezerwy czasowe
RF	rzędne – fronty robocze w macierzy [T]
RP	rzędne – procesy technologiczne w macierzy [T]
S^D	sprzężenia diagonalne
S^F	sprzężenia między frontami roboczymi
S^{OD}	sprzężenia odwrotne diagonalne
S^{OP}	sprzężenia odwrotne przekątne
S^P	sprzężenia przekątne
S^S	sprzężenia między środkami realizacji
T	czas trwania robót
[T]	macierz czasów trwania robót
T_1	macierz numer 1
T_2	macierz numer 2
$T(R)$	macierz robocza
T_{im}	termin zakończenia roboty na obiekcie i
t_{ij}	czas trwania roboty j na froncie i – element macierzy [T]
t_{ij}^{wr}	najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i
t_{ij}^{wz}	najwcześniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i
t_{ij}^{pr}	najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i
t_{ij}^{pz}	najpóźniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i
t_{ij}^r	okres rozwijania procesu j względem $j - 1$ na froncie i
t_{ij}^z	okres zanikania procesu j względem $j - 1$ na froncie i
$t_{ij}^{pz(Bk)}$	najpóźniejszy termin zakończenia roboty j na froncie n przez grupę roboczą B o numerze k

T_i^r	okres rozwinęcia frontu roboczego i względem $i + 1$
T_k^r	okres rozwinęcia potoku k względem $k - 1$
u	zbiór minimalnych rezerw czasowych na frontach roboczych
τ	macierz czasów trwania robót w ustalonej kolejności ich wykonania
τ'	macierz czasów trwania robót w kolejności ustalonej w procesie optymalizacji
$\{\varphi\}$	zbiór elementów wiersza podmacierzy
$\varphi_{\min}$	najmniejsza wartość elementu wiersza podmacierzy

Wstęp

Prezentowana rozprawa stanowi kontynuację tematyki zapoczątkowanej przez V.A. Afanasjewą i J. Mrozowicza, dotyczącej tworzenia nowych metod organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych, różniących się od dotychczas stosowanych tym, że w modelach organizacyjnych korzysta się ze sprzężeń czasowych, wyrażających relacje technologiczne i organizacyjne między różnymi rodzajami robót. Nowe metody umożliwiają odwzorowanie zależności z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z warunków technologii robót budowlanych oraz zależności organizacyjnych między nimi na realizowanych obiektach. W wyniku uwzględniania różnych czynników, wyrażonych za pomocą sprzężeń czasowych, można utworzyć wiele wariantów realizacyjnych, umożliwiających podejmowanie właściwych decyzji wykonawczych.

Autor podjął próbę uzupełnienia wiedzy o zagadnienia umożliwiające optymalne projektowanie, planowanie i sterowanie niejednorodnymi procesami w budownictwie. Z uwzględnieniem klasyfikacji metod organizacji robót budowlanych, przyjętej w pracach V.A. Afanasjewą i J. Mrozowicza [1–4, 81, 83] (rys. 1), opracował zagadnienia dotyczące metod kolejnego wykonania, bez uwzględniania jednoczesności robót (rys. 2), oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju (rys. 3).

Autor od wielu lat zajmuje się badaniami metod organizacji robót budowlanych z zastosowaniem sprzężeń czasowych. Dzięki nim rozwiązano niektóre zagadnienia związane z modelowaniem procesów budowlanych uwzględniających sprzężenia czasowe. Metody organizacji procesów budowlanych o złożonej wewnętrznej strukturze, będące przedmiotem rozprawy, wypełniły obszar wiedzy określony w pracach V.A. Afanasjewą i J. Mrozowicza [1–3, 81, 83], przedstawiony na schemacie (rys. 1), na którym zaznaczono [*] zagadnienia prezentowane w rozprawie.

W rozprawie autor zaprezentował nie rozwiązane dotychczas problemy modelowania robót budowlanych, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych, dotyczące metod kolejnego wykonania bez uwzględnienia jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju

lub z jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju. Systematykę wymienionych zagadnień przedstawiono na rysunkach 1, 2 i 3.

Rozprawa obejmuje zagadnienia związane z planowaniem robót budowlanych. Wyznacza kierunki i uzupełnia wyniki badań naukowych nad sprzężeniami czasowymi w modelach organizacyjnych. Zapewnia podstawę tworzenia nowych metod organizacji i ich wariantów w zakresie planowania realizacji obiektów budowlanych. Stanowi kontynuację tematyki zapoczątkowanej przez V.A. Afanasjewą, J. Mrozowicza i innych badaczy [1–7, 9, 10, 81, 83], rozwijanej przez J. Mrozowicza i Z. Hejduckiego [38–51, 79]. Uzupełnia wiedzę w zakresie metod organizacji robót budowlanych niezbędnych w zarządzaniu procesem inwestycyjno-budowlanym (*Project Management in Civil Engineering*).

W pracy przedstawiono pojęcia i charakterystyki podstawowych, potokowych metod organizacji robót [1–10, 81, 83], np. V.A. Afanasjewą, J. Mrozowicza, będących bazą określającą kierunki badań nad ich modyfikacją i wariantowaniem. Z uwagi na specyfikę procesu inwestycyjno-budowlanego uwzględniono charakterystyczne zależności technologiczne i organizacyjne w postaci sprzężeń czasowych.

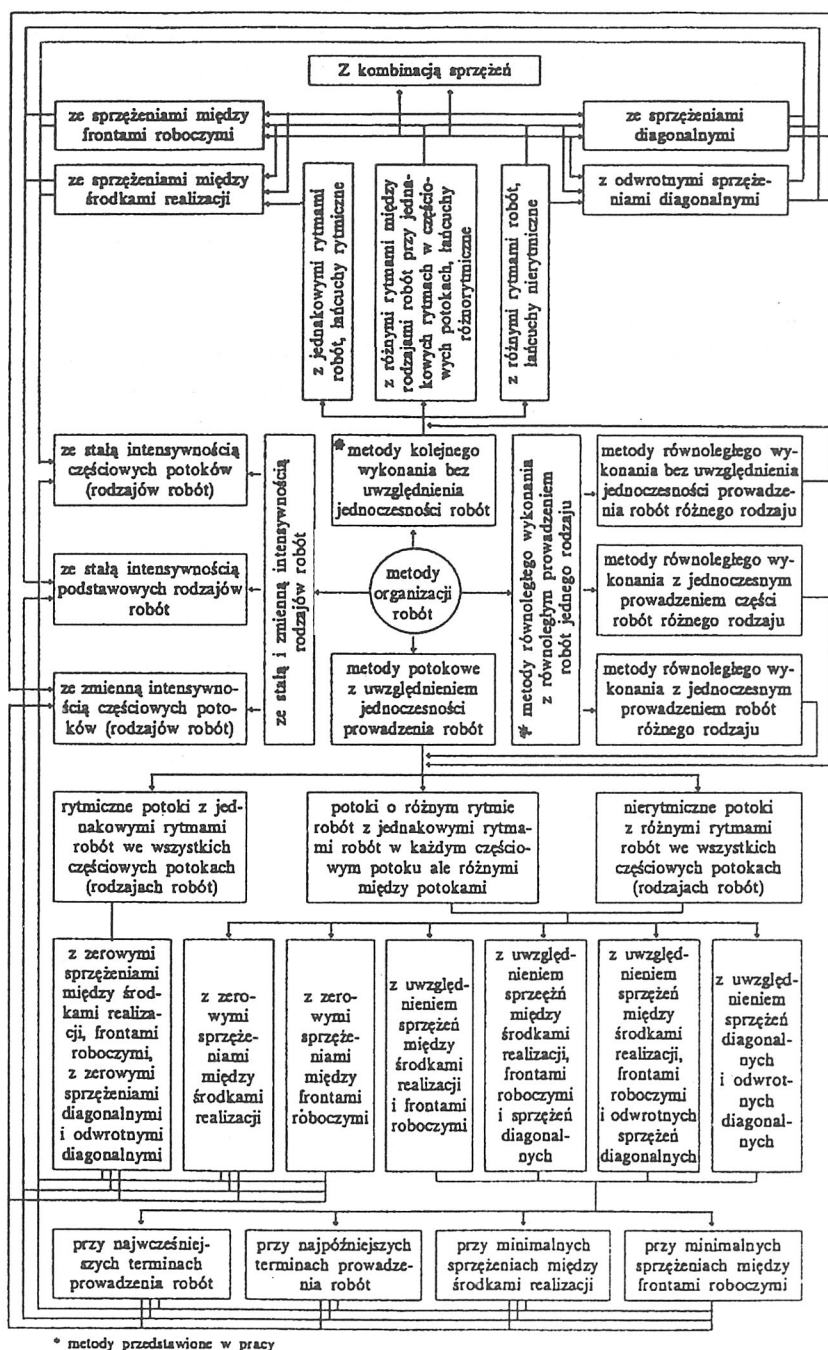
Przedstawiono nie rozwiązane dotychczas zagadnienia związane z uwzględnianiem sprzężeń diagonalnych, odwrotnie diagonalnych, przekątnych i ich kombinacji tworzących nowe modele organizacji robót budowlanych, a także algorytmy synchronizacji robót i praktyczne przykłady liczbowe. Rozwinięto metody organizacji kompleksu robót o strukturze równoległej oraz zaprezentowano algorytmy harmonogramowania robót z uwzględnieniem sprzężeń czasowych tworzących równoległe zależności między robotami i kompleksami. Ponadto przedstawiono warianty oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty lub ich kompleksy zapewniające ich szeregową strukturę. Dokonano identyfikacji sprzężeń czasowych tworzących zależności szeregowie między robotami lub ich grupami. Opracowano zbiór algorytmów harmonogramowania robót i ich kompleksów, dla różnych skali problemu.

Do najważniejszych wyników przedstawionych w pracy można zaliczyć:

1. Rozwinięcie elementów problematyki sprzężeń czasowych.
2. Rozwinięcie i opracowanie nowych metod organizacji robót budowlanych.
3. Sformułowanie i rozwiązanie wielu oryginalnych zagadnień harmonogramowania o dużej użyteczności praktycznej.
4. Określenie kierunków badań naukowych nad problematyką technologiczno-organizacyjną z wykorzystaniem sprzężeń czasowych.

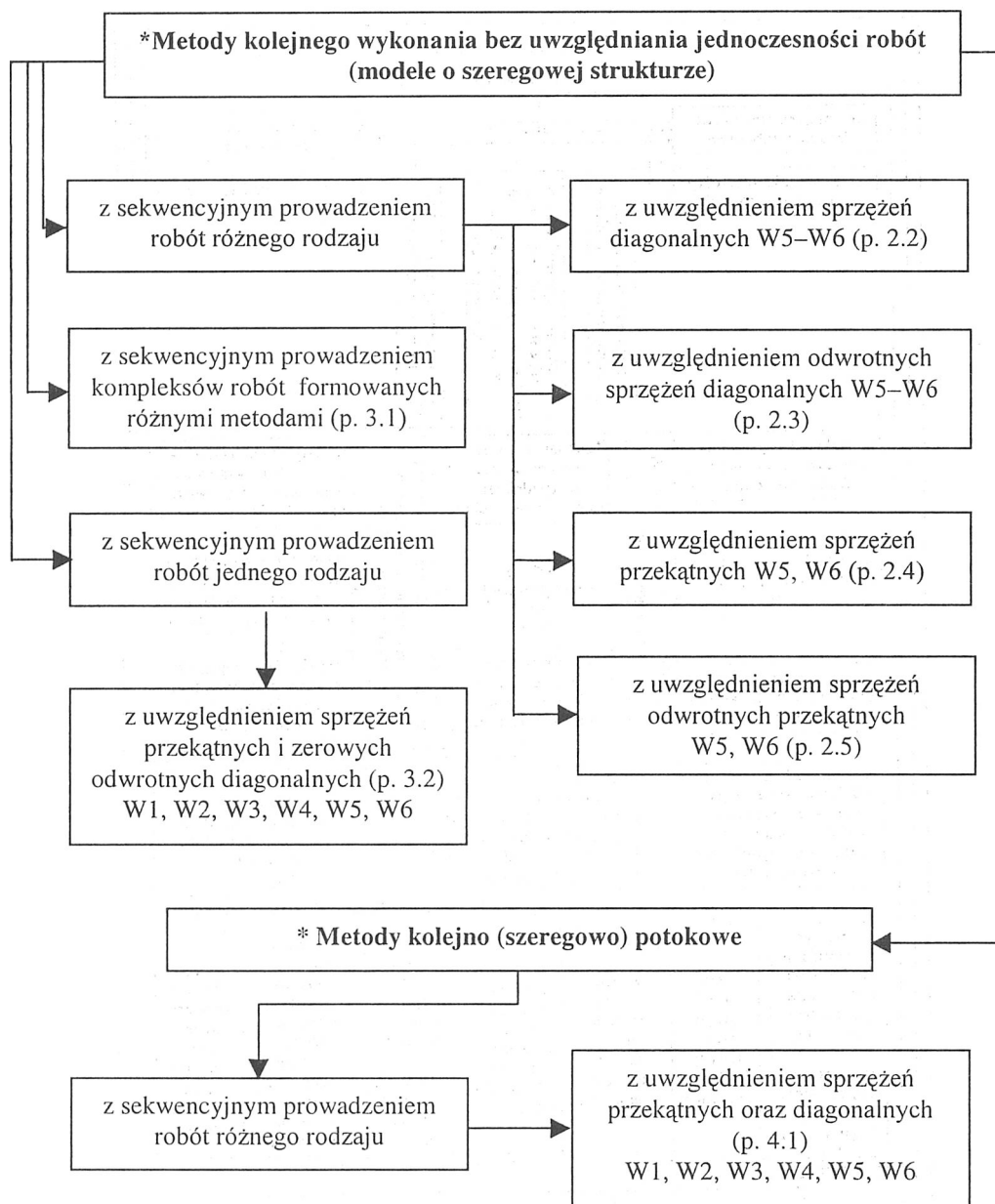
W wielu dotychczasowych opracowaniach technicznych autora zawarte są wyniki z obszaru zastosowań sprzężeń czasowych i metod organizacji robót budowlanych. Na podstawie oryginalnych algorytmów harmonogramowania robót powstały prace mające zastosowanie w firmach i instytucjach budowlanych. Należą do nich następujące opracowania wykonane z udziałem autora:

1. Komputerowo wspomagany system sterowania pracą brygad roboczych w Przedsiębiorstwie Robót Specjalistycznych „Dekar”.



Rys. 1. Klasyfikacja metod organizacji robót budowlanych [1, 2, 81, 83]

Fig. 1. Classification of construction work organization methods [1, 2, 81, 83]

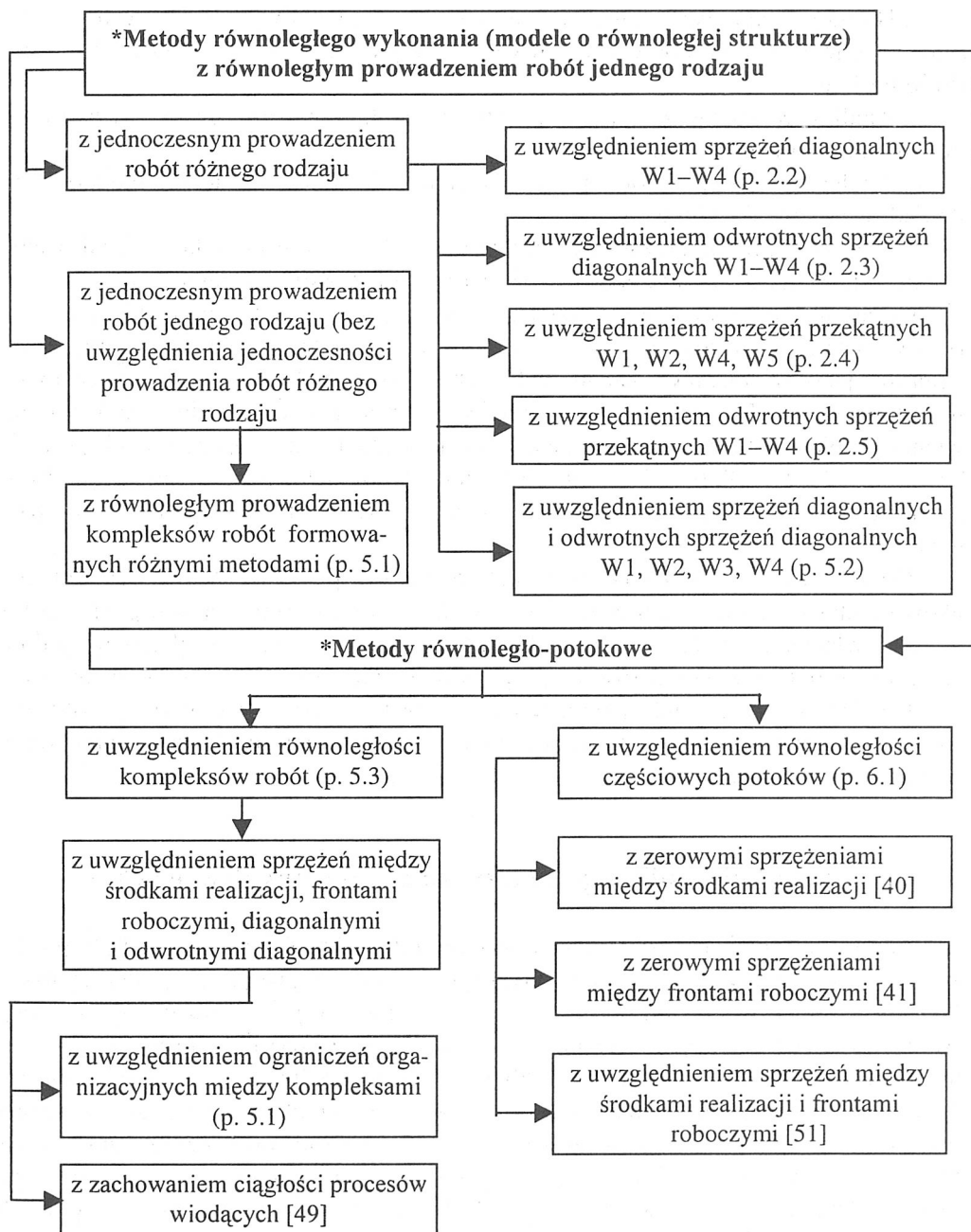


Oznaczenia:

* – metody prezentowane w pracy; W1, 2 – wariant 1, 2 ...; p. 2.2 – podrozdział pracy.

Rys. 2. Warianty metod organizacji procesów budowlanych prezentowane w pracy
(metody kolejnego wykonania bez uwzględniania jednoczesności robót)

Fig. 2. Variants of the methods of construction process organization presented in the thesis
(successive performance methods without considering concurrence of works)



Rys. 3. Warianty metod robót budowlanych prezentowanych w pracy (metody równoległego wykonania z równoległym (lub jednoczesnym) prowadzeniem robót jednego rodzaju)

Fig. 3. Variants of the methods of construction work organization presented in the thesis (parallel performance methods with parallel (concurrent) performance of one kind of work)

2. Harmonogramowanie procesu remontowego budynków mieszkalnych, w którym uwzględniono wykorzystanie brygad kompleksowych, dla ZGK Wrocław-Śródmieście.

3. Analizy wykonawcze wraz z projektami technologiczno-organizacyjnymi remontu budynków mieszkalnych.

4. Analizy wykonawcze oraz projekty technologiczno-organizacyjne modernizacji Zakładów Przemysłu Tłuszczowego.

5. Projekty technologiczno-organizacyjne, w których uwzględniono wdrożenie wynalazku. Świadectwo autorskie nr 158 401 (współautorstwo wynalazku).

Opracowanie wymienionych zagadnień jest kontynuacją i uogólnieniem niektórych wcześniejszych prac [np. 45, 46, 49, 50] autora. Stanowi syntetyczne ujęcie rezultatów jego wieloletnich badań nad problematyką technologiczno-organizacyjną w budownictwie. Z uwagi na to, że w większości prac naukowych dotyczących omawianej problematyki występuje tendencja doskonalenia metod operacyjnych [13, 23, 24, 26, 27, 36, 54, 59, 62, 72, 75, 94] jako narzędzi modelowania procesów budowlanych, podjęto próbę stworzenia podstaw nowych metod organizacji robót budowlanych.

Dotychczasowy dorobek naukowy autora stanowił podstawę do podjęcia prac naukowo-badawczych nad doskonaleniem wyodrębnionych grup metod organizacji robót budowlanych, a zwłaszcza metod kolejnego wykonania bez uwzględniania jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Stanowi to w istocie problem rozwiązywany w prezentowanej rozprawie.

Przegląd publikacji tematycznie związanych z pracą

Planowanie realizacji robót przy zastosowaniu wykresów liniowych było pierwszym sposobem odwzorowania graficznego przebiegu procesów produkcyjnych. Podstawy teorii liniowych harmonogramów budowlanych zawarte są w pracy A. Dyżewskiego [31]. Powszechne stosowanie tej formy wynika z prostoty wykonania, a jednocześnie z możliwości analizy przebiegu realizacji robót i jej kontroli. Zastosowanie do planowania realizacji robót budowlanych wykresów o dwóch osiach współrzędnych stało się niezbędne przy wprowadzaniu metody pracy równomiernej¹. Podstawy założeń metody potokowej organizacji zostały rozwinięte przez A. Dyżewskiego, L. Rowińskiego, W. Lenkiewicza i przedstawione w pracach [31, 72, 94, 95]. Często w tym czasie proponowano graficzne sposoby przedstawienia przebiegu robót z ich modyfikacją na wykresach (np. [94, 95]). Narzędzia te

¹ W literaturze zagranicznej stosowana jest tradycyjna nazwa metody: der Taktstrassen, metod po-
tężnego stroitelstva [1–10].

były stosowane w programach zarządzania robotami i inwestycjami przemysłowymi, głównie w okresie powojennym.

Ostatnio wiele prac poświęcono modelom sieciowym i na nich opartym sposobom planowania robót budowlanych. Wśród publikacji poświęconych modelom sieciowym są również prace zawierające zagadnienia wyprzedzające swoją tematyką problemy przedstawione w opracowaniu. Należy do nich np. niezawodność projektów realizacji budowy K. Jaworskiego [55, 56].

Projektami inwestycyjno-budowlanymi zarządza się z zastosowaniem coraz doskonalszych narzędzi planowania sieciowego, matematycznych i technicznych. Nowe technologie komputerowe pozwalają efektywnie korzystać z możliwości planowania, tworzenia wykresów przebiegu robót, kontrolować ich wykonanie, finansowanie, dostawy materiałów i inne. Stosowane w praktyce systemy komputerowe, np. Microsoft Project, Time Line, CA-Super Projekt, Primavera Project Planner, Spider Project, Scitor Project Scheduler 6 i inne, mają różne ograniczenia i niedostatki. Większość z nich opiera się na prostych algorytmach przedstawionych w pracach D.I. Clelanda, H. Volkera, H. Kerznera, L.C. Stuckenbrucka [29, 53, 69, 87, 99].

Jednym z elementów zarządzania procesami inwestycyjno-budowlanymi jest funkcja czasu. Umożliwia określanie czasu realizacji zadania, terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, rezerw czasowych, prognozowania terminów ich zakończenia, określanie odchyłek czasowych i innych charakterystyk. Czas realizacji ustala się za pomocą analizy wykresów graficznych robót budowlanych, aktualizacji i korekt. Metody i technika zarządzania są przedstawione w licznych pracach E.G. Coffmana, R. Clougha, D.I. Clelanda, H. Kerznera [21, 22, 29, 69, 91]. W harmonogramowaniu robót budowlanych istnieją możliwości rozszerzenia zbioru pojęć, zapewniające ich doskonalenie. Dotyczy to sprzężeń czasowych, prezentowanych w niniejszym opracowaniu.

V.I. Voropajew w pracach [110, 111] zaprezentował macierzowy model kompleksu robót budowlanych i wprowadził pojęcie sprzężeń czasowych: pionowych i diagonalnych. Omówił zjawisko „krytycznego” zbliżenia częściowych potoków oraz proponował wprowadzenie zapasu czasu wykonywania robót, wywołanych czynnikami losowymi.

Zagadnienie stosowania sprzężeń czasowych w modelach realizacyjnych pojawiło się w pracach V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza, Z. Hejduckiego [1–3, 5–7, 10, 81, 83]. Na tej podstawie w niniejszym opracowaniu przedstawiono nowe rodzaje sprzężeń czasowych (przekątne, odwrotne przekątne i ich zestawienia) umożliwiające tworzenie nowych metod organizacji robót budowlanych. Pozwalają one, z uwzględnieniem specyfiki technologicznej i organizacyjnej budownictwa, tworzyć metody organizacji robót budowlanych o strukturze równoległej, szeregowej, potokowo-równoległej i potokowo-szeregowej.

Efektywność harmonogramowania związana jest również z zagadnieniami kolejności. Problematyka szeregowania jest omówiona między innymi w pracach E.G. Coffmana, J. Grabowskiego, V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza, Z. Hejduckiego, K. Jawor-

2. Harmonogramowanie procesu remontowego budynków mieszkalnych, w którym uwzględniono wykorzystanie brygad kompleksowych, dla ZGK Wrocław-Śródmieście.

3. Analizy wykonawcze wraz z projektami technologiczno-organizacyjnymi remontu budynków mieszkalnych.

4. Analizy wykonawcze oraz projekty technologiczno-organizacyjne modernizacji Zakładów Przemysłu Tłuszczowego.

5. Projekty technologiczno-organizacyjne, w których uwzględniono wdrożenie wynalazku. Świadectwo autorskie nr 158 401 (współautorstwo wynalazku).

Opracowanie wymienionych zagadnień jest kontynuacją i uogólnieniem niektórych wcześniejszych prac [np. 45, 46, 49, 50] autora. Stanowi syntetyczne ujęcie rezultatów jego wieloletnich badań nad problematyką technologiczno-organizacyjną w budownictwie. Z uwagi na to, że w większości prac naukowych dotyczących omawianej problematyki występuje tendencja doskonalenia metod operacyjnych [13, 23, 24, 26, 27, 36, 54, 59, 62, 72, 75, 94] jako narzędzi modelowania procesów budowlanych, podjęto próbę stworzenia podstaw nowych metod organizacji robót budowlanych.

Dotychczasowy dorobek naukowy autora stanowił podstawę do podjęcia prac naukowo-badawczych nad doskonaleniem wyodrębnionych grup metod organizacji robót budowlanych, a zwłaszcza metod kolejnego wykonania bez uwzględniania jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych. Stanowi to w istocie problem rozwiązywany w prezentowanej rozprawie.

Przegląd publikacji tematycznie związanych z pracą

Planowanie realizacji robót przy zastosowaniu wykresów liniowych było pierwszym sposobem odwzorowania graficznego przebiegu procesów produkcyjnych. Podstawy teorii liniowych harmonogramów budowlanych zawarte są w pracy A. Dyżewskiego [31]. Powszechne stosowanie tej formy wynika z prostoty wykonania, a jednocześnie z możliwości analizy przebiegu realizacji robót i jej kontroli. Zastosowanie do planowania realizacji robót budowlanych wykresów o dwóch osiach współrzędnych stało się niezbędne przy wprowadzaniu metody pracy równomiernej¹. Podstawy założeń metody potokowej organizacji zostały rozwinięte przez A. Dyżewskiego, L. Rowińskiego, W. Lenkiewicza i przedstawione w pracach [31, 72, 94, 95]. Często w tym czasie proponowano graficzne sposoby przedstawienia przebiegu robót z ich modyfikacją na wykresach (np. [94, 95]). Narzędzia te

¹ W literaturze zagranicznej stosowana jest tradycyjna nazwa metody: der Taktstrassen, metod potocznego stroitelstva [1–10].

były stosowane w programach zarządzania robotami i inwestycjami przemysłowymi, głównie w okresie powojennym.

Ostatnio wiele prac poświęcono modelom sieciowym i na nich opartym sposobom planowania robót budowlanych. Wśród publikacji poświęconych modelom sieciowym są również prace zawierające zagadnienia wyprzedzające swoją tematyką problemy przedstawione w opracowaniu. Należy do nich np. niezawodność projektów realizacji budowy K. Jaworskiego [55, 56].

Projektami inwestycyjno-budowlanymi zarządza się z zastosowaniem coraz doskonalszych narzędzi planowania sieciowego, matematycznych i technicznych. Nowe technologie komputerowe pozwalają efektywnie korzystać z możliwości planowania, tworzenia wykresów przebiegu robót, kontrolować ich wykonanie, finansowanie, dostawy materiałów i inne. Stosowane w praktyce systemy komputerowe, np. Microsoft Project, Time Line, CA-Super Projekt, Primavera Project Planner, Spider Project, Scitor Project Scheduler 6 i inne, mają różne ograniczenia i niedostatki. Większość z nich opiera się na prostych algorytmach przedstawionych w pracach D.I. Clelanda, H. Volkera, H. Kerznera, L.C. Stuckenbrucka [29, 53, 69, 87, 99].

Jednym z elementów zarządzania procesami inwestycyjno-budowlanymi jest funkcja czasu. Umożliwia określanie czasu realizacji zadania, terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, rezerw czasowych, prognozowania terminów ich zakończenia, określanie odchyłek czasowych i innych charakterystyk. Czas realizacji ustala się za pomocą analizy wykresów graficznych robót budowlanych, aktualizacji i korekt. Metody i technika zarządzania są przedstawione w licznych pracach E.G. Coffmana, R. Clougha, D.I. Clelanda, H. Kerznera [21, 22, 29, 69, 91]. W harmonogramowaniu robót budowlanych istnieją możliwości rozszerzenia zbioru pojęć, zapewniające ich doskonalenie. Dotyczy to sprzężeń czasowych, prezentowanych w niniejszym opracowaniu.

V.I. Voropajew w pracach [110, 111] zaprezentował macierzowy model kompleksu robót budowlanych i wprowadził pojęcie sprzężeń czasowych: pionowych i diagonalnych. Omówił zjawisko „krytycznego” zbliżenia częściowych potoków oraz proponował wprowadzenie zapasu czasu wykonywania robót, wywołanych czynnikami losowymi.

Zagadnienie stosowania sprzężeń czasowych w modelach realizacyjnych pojawiło się w pracach V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza, Z. Hejduckiego [1–3, 5–7, 10, 81, 83]. Na tej podstawie w niniejszym opracowaniu przedstawiono nowe rodzaje sprzężeń czasowych (przekątne, odwrotne przekątne i ich zestawienia) umożliwiające tworzenie nowych metod organizacji robót budowlanych. Pozwalają one, z uwzględnieniem specyfiki technologicznej i organizacyjnej budownictwa, tworzyć metody organizacji robót budowlanych o strukturze równoległej, szeregowej, potokowo-równoległej i potokowo-szeregowej.

Efektywność harmonogramowania związana jest również z zagadnieniami kolejności. Problematyka szeregowania jest omówiona między innymi w pracach E.G. Coffmana, J. Grabowskiego, V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza, Z. Hejduckiego, K. Jawor-

skiego, T. Kasprowicza [22, 35, 55, 65]. J. Grabowski w pracy [35] analizuje możliwości minimalizacji długości szeregowania zadań, minimalizacji czasu przepływu oraz szeregowania zadań z minimalizacją czasów wykonania zadań w systemach komputerowych. Prezentowane algorytmy oparte na metodzie podziału i ograniczeń, np. w pracy S. Budzyńskiego, A. Chorobińskiego [17], nie mają wielomianowej złożoności obliczeniowej i są zaliczane do klasy problemów NP–zupełnych. Niektóre algorytmy kolejnościowe pojawiają się w komputerowych systemach harmonogramowania, np. *Primavera Project Planner*.

Specyfika zarządzania procesem realizacji robót budowlanych pozwala na zastosowanie metody podziału i ograniczeń w metodach organizacji robót prezentowanych w opracowaniu. Służą temu algorytmy wyznaczania wartości liczbowych charakteryzujących węzły graf-drzewa, uwzględniające ograniczenia technologiczne i organizacyjne (tzw. GMM – granicznie możliwe minimum). Wartości te są wyznaczone z uwzględnieniem sprzężeń czasowych w pracach V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza [1–4, 81, 83].

Z zagadnieniami przedstawionymi w niniejszej pracy związana jest ściśle problematyka zawarta w publikacjach V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza [1–8, 10, 81–83], w których zaprezentowano metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenie czasowe między robotami wykonywanymi na kolejnych frontach roboczych. Przedstawiono ponadto algorytmy wyznaczania charakterystyk czasowych oraz sposoby ustalania kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach w celu znalezienia minimalnego czasu realizacji kompleksu robót.

Pierwsze wyniki badań dotyczących potokowych metod organizacji robót w nowym ujęciu opublikował V.A. Afanasjew w pracach [1–4, 7]. Przedstawił w nich klasyfikację metod organizacji robót z uwzględnieniem roli sprzężeń czasowych, jako kryterium tworzenia metod organizacji robót. Podał sposoby formowania potoków w budownictwie różnymi metodami organizacji robót, wyznaczania ich czasowych charakterystyk (terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, wartości rezerw czasu), oraz przedstawił zarys metodyki wyboru metody organizacji robót. W następnych pracach V.A. Afanasjew i J. Mrozowicz rozwijają problematykę, wprowadzając zagadnienia związane z wyznaczaniem kolejności realizowanych obiektów budowlanych. Podają algorytmy optymalizacji minimalnoczasowej potoków za pomocą metody podziału i ograniczeń oraz modyfikacji algorytmu Johnsona SM. Opracowane programy komputerowe umożliwiają wyznaczenie charakterystyk czasowych modelowanego potoku, obliczenie wskaźników decyzyjnych służących do wyboru metody organizacji robót oraz zapewniają przegląd możliwych kolejności realizowanych obiektów na drodze badania możliwych przedstawień frontów roboczych [5, 6, 8–10, 81–83].

W pracach [81, 83] J. Mrozowicz podaje podstawowe definicje umożliwiające rozwinięcie prezentowanych przez autora problemów. Klasyfikacja metod organizacji robót wraz z przyjętą terminologią stworzyły możliwość uporządkowania wiedzy w tej dziedzinie i jej dalszego rozwoju. Opracowany system komputerowy *Organiza-*

tor 97² umożliwia dokonywanie obliczeń związanych z ustaleniem racjonalnej kolejności realizowanych obiektów oraz wyznaczeniem charakterystyk czasowych modelowanego potoku. Praktyczne walory prezentowanej problematyki potwierdza zastosowanie metod potokowych do projektowania realizacji kompleksu obiektów przemysłowych.

Prezentowane w wymienionych pracach zagadnienia nie wyczerpują problematyki harmonizacji potoków w budownictwie. Są natomiast podstawą pogłębienia i wzbogacenia wiedzy dotyczącej sprzężeń czasowych.

Prowadząc badania w zakresie harmonogramowania w budownictwie, autor wyodrębnił nowe zagadnienia do opracowania [38, 40–43]. W pracy [50] zaprezentował rysujące się możliwości tworzenia nowych metod potokowej organizacji robót oraz pierwsze wyniki ich weryfikacji na przykładzie liczbowym. W referacie [49] zapowiadał możliwości modelowania złożonych potoków z uwzględnieniem pewnych technologicznych i organizacyjnych ograniczeń. W publikacjach [39, 48] zwrócił uwagę na problemy wykorzystania zasobów (brygad roboczych) podczas planowania realizacji kompleksu obiektów z zastosowaniem metod potokowych. Zmodyfikowany algorytm przeglądu przestrzeni rozwiązań przedstawiono w publikacjach [45, 46, 49], natomiast problemy oceny i wyboru metody potokowej organizacji robót w publikacji [50]. Prace [8, 44] są wynikiem współpracy z Uniwersytetem Architektoniczno-Budowlanym w Sankt Petersburgu. Autor prowadził również badania nad znanymi metodami potokowej organizacji robót, ich wyniki przedstawił w pracach [39, 47, 51]. Idee zawarte w pozostałych publikacjach autora wytyczyły obszary wiedzy, stanowiące tematykę prac doktorskich [80, 97].

Wyrażam podziękowanie Profesorowi dr. hab. inż. Juliuszowi Mrozowiczowi z Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej za serdeczne wsparcie i cenne uwagi podczas opracowywania niniejszej pracy, stanowiącej kontynuację idei naukowych Profesora. Dziękuję również Profesorowi dr. hab. inż. W.A. Afanasjewowi z Uniwersytetu Architektoniczno-Budowlanego w Sankt Petersburgu za inspirację niniejszą tematyką na początku mej drogi naukowej.

Zdzisław Hejducki

² Systemy komputerowe *Organizator 97* i inne znajdują się w Bibliotece Programów Zakładu Metod Projektowania i Realizacji Obiektów Budowlanych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

skiego, T. Kasprowicza [22, 35, 55, 65]. J. Grabowski w pracy [35] analizuje możliwości minimalizacji długości szeregowania zadań, minimalizacji czasu przepływu oraz szeregowania zadań z minimalizacją czasów wykonania zadań w systemach komputerowych. Prezentowane algorytmy oparte na metodzie podziału i ograniczeń, np. w pracy S. Budzyńskiego, A. Chorobińskiego [17], nie mają wielomianowej złożoności obliczeniowej i są zaliczane do klasy problemów NP–zupełnych. Niektóre algorytmy kolejnościowe pojawiają się w komputerowych systemach harmonogramowania, np. *Primavera Project Planner*.

Specyfika zarządzania procesem realizacji robót budowlanych pozwala na zastosowanie metody podziału i ograniczeń w metodach organizacji robót prezentowanych w opracowaniu. Służą temu algorytmy wyznaczania wartości liczbowych charakteryzujących węzły graf-drzewa, uwzględniające ograniczenia technologiczne i organizacyjne (tzw. GMM – granicznie możliwe minimum). Wartości te są wyznaczone z uwzględnieniem sprzężeń czasowych w pracach V.A. Afanasjew, J. Mrozowicza [1–4, 81, 83].

Z zagadnieniami przedstawionymi w niniejszej pracy związana jest ściśle problematyka zawarta w publikacjach V.A. Afanasjew, J. Mrozowicza [1–8, 10, 81–83], w których zaprezentowano metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenie czasowe między robotami wykonywanymi na kolejnych frontach roboczych. Przedstawiono ponadto algorytmy wyznaczania charakterystyk czasowych oraz sposoby ustalania kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach w celu znalezienia minimalnego czasu realizacji kompleksu robót.

Pierwsze wyniki badań dotyczących potokowych metod organizacji robót w nowym ujęciu opublikował V.A. Afanasjew w pracach [1–4, 7]. Przedstawił w nich klasyfikację metod organizacji robót z uwzględnieniem roli sprzężeń czasowych, jako kryterium tworzenia metod organizacji robót. Podał sposoby formowania potoków w budownictwie różnymi metodami organizacji robót, wyznaczania ich czasowych charakterystyk (terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, wartości rezerw czasu), oraz przedstawił zarys metodyki wyboru metody organizacji robót. W następnych pracach V.A. Afanasjew i J. Mrozowicz rozwijają problematykę, wprowadzając zagadnienia związane z wyznaczaniem kolejności realizowanych obiektów budowlanych. Podają algorytmy optymalizacji minimalnoczasowej potoków za pomocą metody podziału i ograniczeń oraz modyfikacji algorytmu Johnsona SM. Opracowane programy komputerowe umożliwiają wyznaczenie charakterystyk czasowych modelowanego potoku, obliczenie wskaźników decyzyjnych służących do wyboru metody organizacji robót oraz zapewniają przegląd możliwych kolejności realizowanych obiektów na drodze badania możliwych przedstawień frontów roboczych [5, 6, 8–10, 81–83].

W pracach [81, 83] J. Mrozowicz podaje podstawowe definicje umożliwiające rozwinięcie prezentowanych przez autora problemów. Klasyfikacja metod organizacji robót wraz z przyjętą terminologią stworzyła możliwość uporządkowania wiedzy w tej dziedzinie i jej dalszego rozwoju. Opracowany system komputerowy *Organiza-*

tor 97² umożliwia dokonywanie obliczeń związanych z ustaleniem racjonalnej kolejności realizowanych obiektów oraz wyznaczeniem charakterystyk czasowych modelowanego potoku. Praktyczne walory prezentowanej problematyki potwierdza zastosowanie metod potokowych do projektowania realizacji kompleksu obiektów przemysłowych.

Prezentowane w wymienionych pracach zagadnienia nie wyczerpują problematyki harmonizacji potoków w budownictwie. Są natomiast podstawą pogłębienia i wzbogacenia wiedzy dotyczącej sprzężeń czasowych.

Prowadząc badania w zakresie harmonogramowania w budownictwie, autor wyodrębnił nowe zagadnienia do opracowania [38, 40–43]. W pracy [50] zaprezentował rysujące się możliwości tworzenia nowych metod potokowej organizacji robót oraz pierwsze wyniki ich weryfikacji na przykładzie liczbowym. W referacie [49] zapowiadał możliwości modelowania złożonych potoków z uwzględnieniem pewnych technologicznych i organizacyjnych ograniczeń. W publikacjach [39, 48] zwrócił uwagę na problemy wykorzystania zasobów (brygad roboczych) podczas planowania realizacji kompleksu obiektów z zastosowaniem metod potokowych. Zmodyfikowany algorytm przeglądu przestrzeni rozwiązań przedstawiono w publikacjach [45, 46, 49], natomiast problemy oceny i wyboru metody potokowej organizacji robót w publikacji [50]. Prace [8, 44] są wynikiem współpracy z Uniwersytetem Architektoniczno-Budowlanym w Sankt Petersburgu. Autor prowadził również badania nad znanymi metodami potokowej organizacji robót, ich wyniki przedstawił w pracach [39, 47, 51]. Idee zawarte w pozostałych publikacjach autora wytyczyły obszary wiedzy, stanowiące tematykę prac doktorskich [80, 97].

Wyrażam podziękowanie Profesorowi dr. hab. inż. Juliuszowi Mrozowiczowi z Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej za serdeczne wsparcie i cenne uwagi podczas opracowywania niniejszej pracy, stanowiącej kontynuację idei naukowych Profesora. Dziękuję również Profesorowi dr. hab. inż. W.A. Afanasjewowi z Uniwersytetu Architektoniczno-Budowlanego w Sankt Petersburgu za inspirację niniejszą tematyką na początku mej drogi naukowej.

Zdzisław Hejducki

² Systemy komputerowe *Organizator 97* i inne znajdują się w Bibliotece Programów Zakładu Metod Projektowania i Realizacji Obiektów Budowlanych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

1. Podstawowe pojęcia

Według J. Mrozowicza metody organizacji robót budowlanych mogą charakteryzować się dwiema cechami: stopniem jednoczesności wykonania robót różnych rodzajów i stopniem równoległości wykonania robót jednego rodzaju [81]. Gdy roboty różnych rodzajów są wykonywane jednocześnie, a brak jest równoległości w wykonaniu robót jednego rodzaju, mamy do czynienia z potokowymi metodami organizacji robót – V.A. Afanasjew, J. Mrozowicz [1, 2, 81]. A. Dyżewski i L. Rowiński w pracach [31, 94, 95] posługiwali się również nazwami: metoda pracy równomiernej, rytmicznej, rytmiczno-równomiernej lub potokowa. Roboty budowlane, wykonywane podczas realizacji obiektów budowlanych potokowymi metodami organizacji robót, tworzą potok charakteryzujący się okresami: rozwijania, ustabilizowanej pracy i zanikania [31, 94, 95]. Roboty jednego rodzaju (częściowo procesy), np. ziemne, betonowe, montażowe, które są wykonywane kolejno na działkach (frontach roboczych), tworzą częściowo potoki. Podobnie, zbiór robót różnych rodzajów, niezbędnych do realizacji danego obiektu, jest też określany jako częściowy kompleks lub częściowy front. Inaczej mówiąc, jest to proces budowlany, w wyniku którego powstaje budowla.

W literaturze krajowej [31, 94, 95] spotykamy się z dwoma pojęciami charakteryzującymi potoki: **rytm** i **cykl**. Rytmem nazwano czas, który upływa pomiędzy wejściem kolejnych brygad roboczych na działkę, cykl natomiast określa czas pracy brygady na działce roboczej. Pojęcia te są związane z metodą pracy równomiernej, której zastosowanie w klasycznej postaci do projektowania obiektów budowlanych napotyka poważne trudności. Przyjęto więc jedną cechę potoku – rytm, określający czas pracy brygady na działce roboczej. Zgodnie z przyjętym założeniem potoki można podzielić na: rytmiczne, wielorytmiczne i nierytmiczne [1, 2, 81, 83]. W potokach rytmicznych czasy wykonania robót są jednakowe, w nierytmicznych różne, w wielorytmicznych natomiast są jednakowe w częściowych potokach, lecz różne pomiędzy nimi.

W procesie modelowania kompleksu robót występują pomiędzy nimi sprzężenia czasowe, o następujących cechach:

- sprzężenia między środkami realizacji – wiążą roboty jednego rodzaju, występujące w częściowym potoku,
- sprzężenia między frontami roboczymi (działkami) – wiążą występujące w ciągu technologicznym roboty różnych rodzajów, wykonywane na tej samej działce,
- sprzężenia diagonalne – wiążą roboty występujące w sąsiednich częściowych potokach, na danej i poprzedniej działce (froncie),
- sprzężenie odwrotne diagonalne – wiążą roboty na danej działce roboczej, w danym częściowym potoku, z robotami na następnej działce, w poprzedzającym częściowym potoku,
- sprzężenie przekątne – wiążą roboty danego rodzaju wykonywane na danej działce (froncie), z robotami poprzedzającymi w porządku technologicznym, prowadzonymi na poprzedniej działce.

1.1. Metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe

Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji

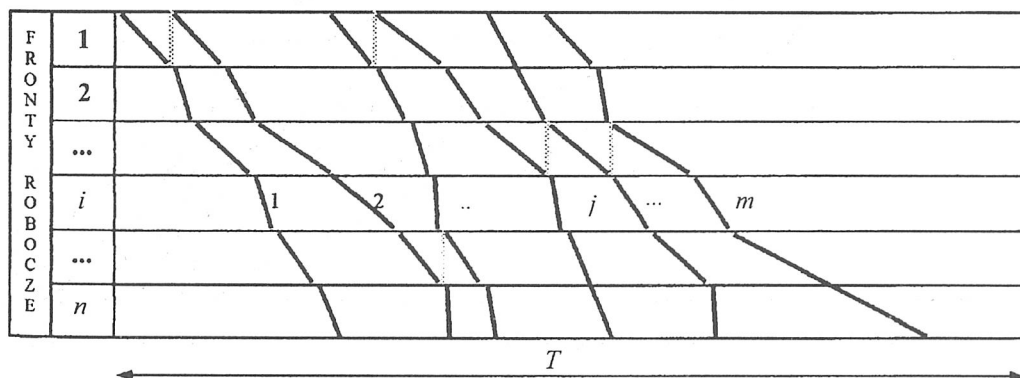
Metoda ta zapewnia ciągłość pracy grup roboczych, maszyn i urządzeń. Specjalizowane brygady przechodzą bez przerw, z działki na działkę, zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach. Jest to często spotykane ograniczenie organizacyjne.

Modelowanie potoku tą metodą prowadzi się w dwu etapach. Wyznacza się racjonalną kolejność wykonywania robót na działkach (obiektach), z uwzględnieniem minimalnoczynasowego kryterium, a następnie oblicza się czasowe charakterystyki niezbędne do sporządzenia modelu graficznego (wykresów Gantta, linii cyklicznych, sieci zależności).

Rozwiązanie zagadnienia kolejności 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. Wyeliminować je można 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 stwierdzono na podstawie wyników badań V.A. Afanasjewa i J. Mrozowicza, 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 [1–3, 81, 83].



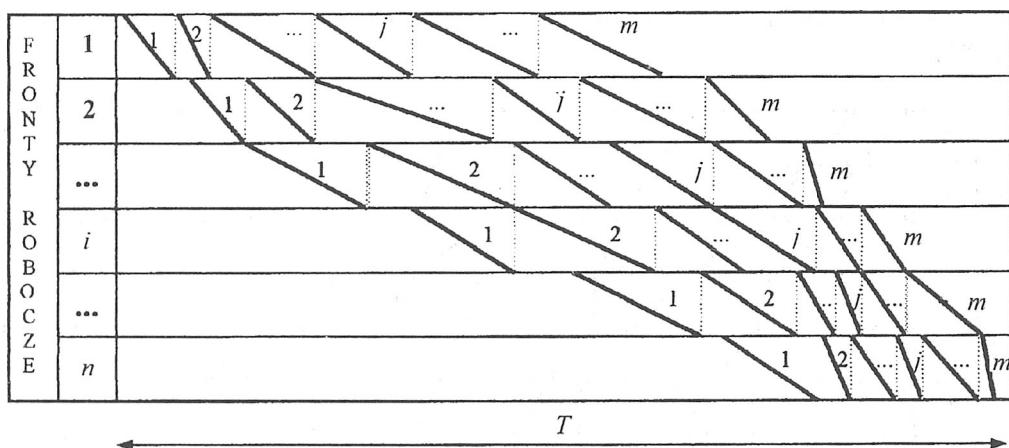
Rys. 1.1. Schemat procesów budowlanych z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji
Fig. 1.1. Scheme of construction processes with zero couplings between centres of realization

Metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

Podstawową właściwością danej 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 zwijania pozostałych jest najmniejsza. Analizując schematy graficzne potoku (cyklogramy), możemy zauważyć, że na czas realizacji kompleksu robót nie ma wpływu środkowy blok procesów budowlanych. Wykorzystano to w opracowanym algorytmie poszukiwania kolejności realizowanych obiektów, zapewniających najkrótszy czas realizacji. Im większa część robót zostaje „ukryta” w pierwszym procesie, tym mniejsza będzie wartość sumy czasów zwijania. Przegląd możliwych kombinacji z wykorzystaniem drzewa wariantów i zastosowaniem pomocniczego wskaźnika **granicznie możliwego minimum** (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, gdy są przewidziane 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 wówczas, 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 [1–3, 81, 83].



Rys. 1.2. Schemat procesów budowlanych
z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

Fig. 1.2. Scheme of construction processes with zero couplings between work fronts

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

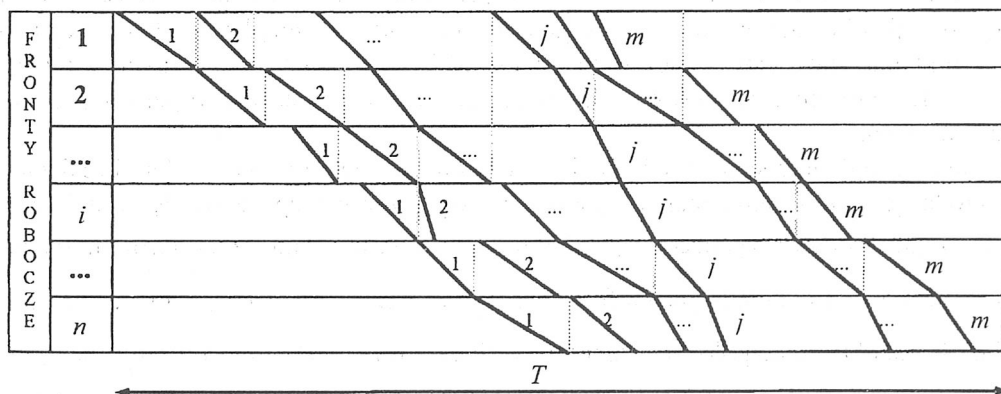
Ta metoda zapewnia najkrótszy czas realizacji kompleksu robót. Równoczesne uwzględnienie obu sprzężeń czasowych wywołuje w modelu potoku drogę krytyczną. Dzięki zsumowaniu czasów wykonania robót pojawiających się na ścieżce krytycznej można wyznaczyć czas trwania robót T . Przez zmianę kolejności prowadzenia robót na frontach (obiektach) dokonuje się przestawień robót na drodze krytycznej, w wyniku czego ulega zmianie czas trwania realizacji.

Minimalny czas trwania realizacji kompleksu obiektów można osiągnąć 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.

Zagadnienie kolejności rozwiązuje się metodą podziału i ograniczeń, która umożliwia ukierunkowane przeszukiwanie różnych rozwiązań.

Po ustaleniu racjonalnej kolejności prowadzenia robót na działkach (obiektach) wyznacza się charakterystyki czasowe potoku, z uwzględnieniem dwóch rodzajów sprzężeń: między środkami realizacji i frontami roboczymi.

W metodzie tej dopuszcza się przerwy w pracy grup roboczych, jak również przestoje frontów roboczych. Umożliwia to utworzenie takiej drogi krytycznej, która zapewnia najkrótszy czas realizacji zadania inwestycyjnego. Możliwość niezwłocznego zatrudnienia brygad roboczych na zwalnianych działkach, bez ograniczeń dotyczących ciągłości ich pracy, znacznie skraca okres przestoju frontu lub oczekiwanie brygady na kolejne zadanie. Osiągnięcie najkrótszego czasu realizacji kompleksu obiektów prezentowaną metodą powoduje jednak trudności w planowaniu równomiernego i ciągłego wykorzystania środków realizacji [1–3, 6, 81, 83].



Rys. 1.3. Schemat procesów budowlanych z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami robót

Fig. 1.3. Scheme of construction processes considering simultaneously the couplings between realization centres and work fronts

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 poprzednio. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na sposobie modelowania potoku. Dla każdej z nich wyznacza się charakterystyki czasowe potoku, z uwzględnieniem odpowiednio występujących sprzężeń.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że czasy realizacji kompleksu robót są z reguły dłuższe lub równe czasom uzyskiwanym poprzednią metodą.

Metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych

W danej metodzie roboty jednego stopnia tworzą diagonały, 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, dzięki ustaleniu takiej ich kolejności, że roboty o najdłuższym czasie trwania będą znajdowały się w jednym lub minimalnej liczbie diagonalów [8, 25].

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

1.2. Warianty podstawowych metod organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe

W dotychczasowych opracowaniach V.A. Afanasjewa, A.V. Afanasjewa, J. Mrowicza, M. Sawickiego, Z. Hejduckiego przedstawiono sześć potokowych metod organizacji robót utworzonych z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi, sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. Umożliwiły one określenie podstawowych wariantów metod potokowej organizacji robót budowlanych.

Jeśli uwzględnia się oddziaływanie zerowych sprzężeń między środkami realizacji (metoda I), wyznaczenie charakterystyk czasowych robót rozpoczyna się od najwcześniejszego terminu rozpoczęcia t_{ij}^{wr} . Zależy on od najwcześniejszego terminu zakończenia roboty na poprzedzającym froncie $t_{i-1,j}^{wz}$, przy czym $t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j}^{wz}$. Ponadto, z uwagi na ściśle określenie położenia robót na skali czasu, $t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{pr}$ oraz $t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz}$.

Jeśli przyjmie się oddziaływanie zerowych sprzężeń między frontami roboczymi (metoda II), obliczenie charakterystyk czasowych robót rozpoczyna się od najwcześniejszego terminu rozpoczęcia roboty t_{ij}^{wr} . Zależy on od najwcześniejszego terminu zakończenia roboty $t_{i,j-1}^{wz}$, przy czym $t_{ij}^{wr} = t_{i,j-1}^{wz}$. Ponadto $t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{pr}$ oraz $t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{pz}$.

Jednoczesne działanie sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi (metoda III) wymaga określenia charakterystyk czasowych robót na podstawie wartości największej z dwóch, tj. $t_{i-1,j}^{wz}$ i $t_{i,j-1}^{wz}$. Dotyczy to najwcześniejszego terminu rozpoczęcia roboty t_{ij}^{wr} . Wyznaczenie najpóźniejszych terminów t_{ij}^{pz} rozpoczynamy od przyjęcia założenia, że $t_{nm}^{wz} = t_{nm}^{pz}$. Termin t_{ij}^{pz} wyznaczamy, w zależności od najpóźniejszego terminu rozpoczęcia roboty następnej w porządku technologicznym $t_{i,j+1}^{pr}$. Do obliczeń przyjmujemy wartość najmniejszą.

Metoda IV, w podstawowej postaci, charakteryzuje się jednoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i sprzężeniami diagonalnymi. Obliczanie charakterystyk czasowych robót t_{ij}^{wr} i pozostałych odbywa się na drodze wyboru maksymalnej wartości ze zbioru: $t_{i-1,j}^{wz}, t_{i,j-1}^{wz}$ i $t_{i+1,j-1}^{wr}$.

Uwzględnienie sprzężeń między środkami realizacji, sprzężeń między frontami roboczymi i odwrotnych sprzężeń diagonalnych jest podstawą metody V w jej klasycznym ujęciu. Najwcześniejszy termin rozpoczęcia danej roboty t_{ij}^{wr} określa się z uwzględnieniem maksymalnej wartości ze zbioru: $t_{i-1,j}^{wz}, t_{i,j-1}^{wz}$ i $t_{i-1,j+1}^{wr}$. Obliczanie późnych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót wymaga uwzględnienia w odwrotnej kolejności, mniejszej ze zbioru

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

W opracowaniach poświęconych tej problematyce dokonano analizy i formalizacji matematycznej wariantów trzech podstawowych metod organizacji robót budowlanych. Określono możliwości wariantowania metod i obszary ich praktycznego zastosowania w planowaniu realizacji robót.

A. Warianty metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi

Wariant 1 – rozpoczęcie robót w najwcześniejszych terminach

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

Zależność ta wiąże ze sobą roboty na sąsiednich frontach i określa, że wcześniejszy termin roboty t_{ij}^{wr} może nastąpić nie wcześniej niż rozpocznie się robota j na poprzednim froncie $i-1$ oraz roboty $j-1$ na tym samym. Przyjmując zerowe wartości sprzężeń czasowych, nakładamy warunek jednoczesnego wykonania robót jednego rodzaju na sąsiednich frontach lub konieczność realizacji robót kolejnych technolo-

gicznie na tym samym froncie. Ograniczenie to nie zawsze jest realne, choć pojawiają się sytuacje, kiedy z uwagi na wielkość frontu robót prowadzone są równoległe roboty, np. instalacyjne i osadzanie stolarki okiennej.

Wariant 2 – rozpoczęcie robót w najpóźniejszych terminach

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

Powiązanie ze sobą najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót nakłada skrajny warunek realizacyjny, kiedy to rozpoczęcie prac na sąsiednich frontach musi nastąpić jednocześnie i nie później niż to zostało obliczone. W przypadku niejednoczesnego rozpoczęcia robót może zostać zakłócona droga krytyczna i końcowy czas realizacji. Po przyjęciu tego ograniczenia dla wszystkich robót warunek ten staje się nierealny z punktu widzenia praktyki wykonawczej.

Wariant 3 – terminy zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

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

Zależność ta wiąże ze sobą najwcześniejsze terminy zakończenia robót $j, j-1$. O rozpoczęciu roboty j decyduje odleglejszy z tych terminów. Warunek ten zapewnia równoległość prowadzenia robót na sąsiednich frontach i oraz $i-1$ lub równoległe prowadzenie robót różnego rodzaju j i $j-1$ na tym samym froncie.

Wariant 4 – warunek zakończenia robót w najpóźniejszych terminach

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

Zapewniony został warunek równoczesnego zakończenia robót na froncie i oraz $i+1$ dla robót tego samego rodzaju j oraz następujących w porządku technologicznym $j+1$.

W wyniku obliczeń, na podstawie przedstawionej zależności można stwierdzić, że zastosowanie sprzężeń czasowych, zarówno między środkami realizacji, jak i frontami roboczymi powoduje równoległość prowadzenia robót jednego rodzaju $j+1$ oraz j , a także jednoczesne prowadzenie robót tego samego rodzaju j na froncie i . Sytuacje tego typu mogą występować tylko w przypadku niektórych robót budowlanych, realizowanych na niektórych działkach roboczych.

Wariant 5 – wczesne terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i nastąpi wówczas, gdy zostanie zakończona robota j na froncie poprzedzającym oraz rozpocznie się robota

$j-1$ na tym samym froncie i . Zależności, wyrażone sprzężeniami czasowymi, powodują, że roboty tego samego rodzaju, tj. j , będą prowadzone kolejno, natomiast $j-1$ oraz j równolegle na tym samym froncie roboczym.

Wariant 6 – późne terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Zależność ta określa warunki jednoczesnego zakończenia robót tego samego rodzaju j na sąsiednich frontach roboczych $i, i+1$. Ponadto termin t_{ij}^{pz} zależy od najpóźniejszego rozpoczęcia roboty $t_{i,j+1}^{pr}$ na tym samym froncie roboczym. Wybierając wielkość mniejszą w obliczeniu powrotnym, uzyskujemy ograniczenia, zapewniające jednakowe terminy zakończenia robót na frontach roboczych $t_{nm}^{pz} = t_{n-1,m}^{pz} = \dots = t_{1m}^{pz}$.

Wariant 7 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Warunek ten zapewnia realizację robót tego samego rodzaju j na sąsiednich frontach roboczych $i, i-1$ lub sekwencję robót: $j-1$ oraz j . Wybór większej wielkości decyduje o uwzględnieniu zerowego sprzężenia między środkami realizacji lub frontami roboczymi. Jeżeli

$$t_{i-1,j}^{wr} > t_{i,j-1}^{wz} \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j}^{wr}$$

lub

$$t_{i-1,j}^{wr} < t_{i,j-1}^{wz} \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i,j-1}^{wz}$$

to uwzględnienie pierwszego przypadku, tj. $t_{i-1,j}^{wr} > t_{i,j-1}^{wz}$, wpływa na skrócenie czasu realizacji robót, umożliwiając jednoczesne prowadzenie robót tego samego rodzaju na sąsiednich frontach roboczych.

Wariant 8 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Przypadek ten nakłada konieczność równoległego prowadzenia robót j oraz $j+1$ na tym samym froncie roboczym i . Roboty jednego rodzaju j związane są zależnością, umożliwiając prowadzenie ich kolejno na sąsiednich frontach roboczych. W zależności od sytuacji praktycznych, określających możliwości techniczne jednoczesnego prowadzenia robót różnego rodzaju j oraz $j+1$ na tym samym froncie roboczym, może być to wariant przydatny w praktyce budowlanej.

B. Warianty metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi oraz sprzężeń diagonalnych

Po uwzględnieniu dodatkowo sprzężeń diagonalnych, wiążących ze sobą roboty budowlane, można utworzyć zbiór wariantów metody organizacji robót. Kombinacje zależności między charakterystykami czasowymi robót pozwalają na identyfikację osiemnastu wariantów metody.

Wariant 1 – terminy rozpoczęcia robót w najwcześniejszych terminach

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

Wariant 2 – terminy rozpoczęcia robót w najpóźniejszych terminach

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

Wariant 3 – terminy zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

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

Wariant 4 – terminy zakończenia robót w najpóźniejszych terminach

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

Wariant 5 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 6

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

Wariant 7

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

Wariant 8

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

Wariant 9

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

Wariant 10

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

Wariant 11

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

Wariant 12 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 13

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

Wariant 14

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

Wariant 15

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

Wariant 16

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

Wariant 17

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

Wariant 18

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

C. Warianty metody organizacji robót budowlanych z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi oraz odwrotnych sprzężeń diagonalnych

Po uwzględnieniu w macierzowym modelu organizacyjnym dodatkowo odwrotnych sprzężeń diagonalnych można utworzyć zbiór wariantów metody organizacji robót budowlanych. Wiążąc ze sobą charakterystyki czasowe robót w różnych zestawieniach można zidentyfikować szesnaście wariantów metody:

Wariant 1 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót

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

Wariant 2 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót

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

Wariant 3 – najwcześniejsze terminy zakończenia robót

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

Wariant 4 – najpóźniejsze terminy zakończenia robót

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

Wariant 5 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 6 – najpóźniejsze terminy zakończenia i rozpoczęcia robót

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

Wariant 7 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 8 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 9 – najwcześniejsze terminy zakończenia i rozpoczęcia robót

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

Wariant 10 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 11 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 12 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 13 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 14 – najpóźniejsze terminy zakończenia i rozpoczęcia robót

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

Wariant 15 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Wariant 16 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

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

Na podstawie znajomości problemów związanych z planowaniem realizacji procesów budowlanych, z literatury technicznej oraz własnej praktyki zawodowej, nasuwa się potrzeba doskonalenia metod organizacji robót budowlanych. Jednym z czynników umożliwiających tworzenie nowych metod organizacji robót budowlanych jest identyfikacja i analiza sprzężeń czasowych. Mogą one określać wzajemne relacje technologiczne i organizacyjne występujące między robotami w procesie realizacyjnym. Sprzężenia czasowe oraz ich kombinacje są podstawą nowych metod organizacji robót budowlanych, które zostały przedstawione w niniejszej pracy.

2. Rodzaje sprzężeń czasowych jako podstawa wariantów metod organizacji robót budowlanych

2.1. Sprzężenia czasowe i ich rodzaje

Ze względu na ograniczenia mogące wystąpić w praktyce budowlanej prezentowana interpretacja pojęcia **sprzężenia czasowego** jest niepełna i ogranicza obszar zastosowania metod organizacji. W pracy [50] autor zaproponował rozszerzenie tego pojęcia i przyjęcie sprzężeń czasowych wyznaczonych z możliwych kombinacji najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Zostały stworzone podstawy teorii sprzężeń czasowych, umożliwiające rozszerzanie obszaru wariantowania metod organizacji robót. Wyniki badań nad identyfikacją sprzężeń czasowych odwzorowujących zależności technologiczne i organizacyjne między robotami budowlanymi oraz nad wskazaniem kierunków wariantowania metod organizacji przedstawiono w pracy [50]. Problem ten został wówczas po raz pierwszy dostrzeżony, odkrywając nowe możliwości wariantowania i stworzenia nowych metod organizacji robót, z uwzględnieniem wielu dodatkowych ograniczeń technologicznych i organizacyjnych.

Rozwinięciem zapoczątkowanych prac nad identyfikacją sprzężeń czasowych były badania praktycznych możliwości zastosowania nowych ich rodzajów i ich kombinacji oraz sprawdzenie poprawności zapisów matematycznych [97]. Stwierdzono, że zaproponowane rodzaje sprzężeń czasowych są znaczącym elementem rozwoju nowych metod organizacji. Opracowanie sposobów wyznaczania charakterystyk czasowych dla nowych wariantów sprzężeń pozwala na zwiększenie obszaru zastosowania metod w budownictwie [97]. Wyróżnia się następujące rodzaje sprzężeń czasowych:

- między środkami realizacji,
- między frontami roboczymi,
- diagonalne i odwrotne diagonalne,
- przekątne i odwrotne przekątne.

Sprzężenia między środkami realizacji wiążą kolejne roboty jednego rodzaju, określając stopień ciągłości wykorzystanych zasobów.

Sprzężenia między frontami roboczymi wiążą kolejne roboty różnego rodzaju wewnątrz każdego częściowego kompleksu robót, odzwierciedlając stopień ciągłości robót na działkach.

Sprzężenia diagonalne są natomiast bardziej złożone, wiążą roboty różnych rodzajów w kolejności technologicznej, przy zachowaniu zasady, że każda robota na danym froncie w poprzedzającym ciągu technologicznym (rodzaju robót) wiąże się z robotą na poprzedzającym froncie w danym ciągu technologicznym.

Sprzężenia odwrotne diagonalne wiążą roboty na danym froncie roboczym, w danym ciągu technologicznym, z robotami na następnym froncie roboczym w poprzedzającym ciągu technologicznym (rodzaju robót).

Analiza nowych przypadków sprzężeń czasowych dla trzech metod organizacji robót pozwoliła na wysunięcie wniosków praktycznych [83, 97]. Ograniczono się jedynie do następujących metod organizacji robót budowlanych:

- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi,
- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i sprzężen stopniowych,
- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i odwrotnych sprzężeń stopniowych.

W niniejszej pracy przedstawiono inne rodzaje sprzężeń czasowych, umożliwiające tworzenie wariantów metod organizacji robót budowlanych, powstałych z pojedynczych sprzężeń lub ich kombinacji. Zakreślono obszar, którego zbadanie i analiza są niezbędne do poszerzenia zbioru możliwych do zastosowania w praktyce wariantów organizacji robót budowlanych.

2.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem zerowych sprzężeń diagonalnych

Zerowe sprzężenia diagonalne wiążą ze sobą terminy rozpoczęcia i zakończenia robót jednostopniowych, tj. mających jednakową sumę indeksów w zapisie macierzowym. Są one realizacją ograniczeń technologicznych, zapewniających powiązanie pomiędzy kolejnymi procesami roboczymi (rodzajami robót), oraz organizacyjnych, związanych z danym i poprzedzającym frontem robót. Związane jest to z praktycznymi sytuacjami pojawiającymi się w procesie inwestycyjno-budowlanym, kiedy zachodzi np. konieczność intensyfikacji niektórych robót (skracania terminów). Warunek jednoczesnego wejścia firmy budowlanej (grupy roboczej) na dwa fronty, na których będą wykonywane kolejne roboty w niezmiennym porządku technologicznym, może być spełniony przy czynnym wykorzystaniu zerowych sprzężeń diagonalnych.

Metoda z zerowymi sprzężeniami diagonalnymi może mieć różne warianty.

Wariant 1 – sprzężenia łączące terminy rozpoczęcia w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} \quad (2.1)$$

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

2. Rodzaje sprzężeń czasowych jako podstawa wariantów metod organizacji robót budowlanych

2.1. Sprzężenia czasowe i ich rodzaje

Ze względu na ograniczenia mogące wystąpić w praktyce budowlanej prezentowana interpretacja pojęcia **sprzężenia czasowego** jest niepełna i ogranicza obszar zastosowania metod organizacji. W pracy [50] autor zaproponował rozszerzenie tego pojęcia i przyjęcie sprzężeń czasowych wyznaczonych z możliwych kombinacji najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Zostały stworzone podstawy teorii sprzężeń czasowych, umożliwiające rozszerzanie obszaru wariantowania metod organizacji robót. Wyniki badań nad identyfikacją sprzężeń czasowych odwzorowujących zależności technologiczne i organizacyjne między robotami budowlanymi oraz nad wskazaniem kierunków wariantowania metod organizacji przedstawiono w pracy [50]. Problem ten został wówczas po raz pierwszy dostrzeżony, odkrywając nowe możliwości wariantowania i stworzenia nowych metod organizacji robót, z uwzględnieniem wielu dodatkowych ograniczeń technologicznych i organizacyjnych.

Rozwinięciem zapoczątkowanych prac nad identyfikacją sprzężeń czasowych były badania praktycznych możliwości zastosowania nowych ich rodzajów i ich kombinacji oraz sprawdzenie poprawności zapisów matematycznych [97]. Stwierdzono, że zaproponowane rodzaje sprzężeń czasowych są znaczącym elementem rozwoju nowych metod organizacji. Opracowanie sposobów wyznaczania charakterystyk czasowych dla nowych wariantów sprzężeń pozwala na zwiększenie obszaru zastosowania metod w budownictwie [97]. Wyróżnia się następujące rodzaje sprzężeń czasowych:

- między środkami realizacji,
- między frontami roboczymi,
- diagonalne i odwrotne diagonalne,
- przekątne i odwrotne przekątne.

Sprzężenia między środkami realizacji wiążą kolejne roboty jednego rodzaju, określając stopień ciągłości wykorzystanych zasobów.

Sprzężenia między frontami roboczymi wiążą kolejne roboty różnego rodzaju wewnątrz każdego częściowego kompleksu robót, odzwierciedlając stopień ciągłości robót na działkach.

Sprzężenia diagonalne są natomiast bardziej złożone, wiążą roboty różnych rodzajów w kolejności technologicznej, przy zachowaniu zasady, że każda robota na danym froncie w poprzedzającym ciągu technologicznym (rodzaju robót) wiąże się z robotą na poprzedzającym froncie w danym ciągu technologicznym.

Sprzężenia odwrotne diagonalne wiążą roboty na danym froncie roboczym, w danym ciągu technologicznym, z robotami na następnym froncie roboczym w poprzedzającym ciągu technologicznym (rodzaju robót).

Analiza nowych przypadków sprzężeń czasowych dla trzech metod organizacji robót pozwoliła na wysunięcie wniosków praktycznych [83, 97]. Ograniczono się jedynie do następujących metod organizacji robót budowlanych:

- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi,
- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i sprzężen stopniowych,
- metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i odwrotnych sprzężeń stopniowych.

W niniejszej pracy przedstawiono inne rodzaje sprzężeń czasowych, umożliwiające tworzenie wariantów metod organizacji robót budowlanych, powstałych z pojedynczych sprzężeń lub ich kombinacji. Zakreślono obszar, którego zbadanie i analiza są niezbędne do poszerzenia zbioru możliwych do zastosowania w praktyce wariantów organizacji robót budowlanych.

2.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem zerowych sprzężeń diagonalnych

Zerowe sprzężenia diagonalne wiążą ze sobą terminy rozpoczęcia i zakończenia robót jednostopniowych, tj. mających jednakową sumę indeksów w zapisie macierzowym. Są one realizacją ograniczeń technologicznych, zapewniających powiązanie pomiędzy kolejnymi procesami roboczymi (rodzajami robót), oraz organizacyjnych, związanych z danym i poprzedzającym frontem robót. Związane jest to z praktycznymi sytuacjami pojawiającymi się w procesie inwestycyjno-budowlanym, kiedy zachodzi np. konieczność intensyfikacji niektórych robót (skracania terminów). Warunek jednoczesnego wejścia firmy budowlanej (grupy roboczej) na dwa fronty, na których będą wykonywane kolejne roboty w niezmiennym porządku technologicznym, może być spełniony przy czynnym wykorzystaniu zerowych sprzężeń diagonalnych.

Metoda z zerowymi sprzężeniami diagonalnymi może mieć różne warianty.

Wariant 1 – sprzężenia łączące terminy rozpoczęcia w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} \quad (2.1)$$

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

Wzór (2.1) określa zasadę wzajemnej zależności dla najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót. Oznacza on, że rozpoczęcie robót na dwóch sąsiednich obiektach dla dwóch uporządkowanych technologicznie relacją poprzedzania $\prec$ robót musi nastąpić jednocześnie. Nałożony warunek jest spotykany w praktyce budowlanej jako wyrażenie potrzeby jednoczesnego zaangażowania dwóch firm realizujących kolejne rodzaje robót na kolejnych frontach roboczych.

Po zanalizowaniu tego przypadku można dostrzec sytuację równoległości prowadzonych robót j frontu i oraz robót $j-1$ frontu $i+1$, z warunkiem jednoczesnego ich rozpoczęcia.

Definicja

$$\bigwedge_{a_1, a_2 \in P} \bigvee_{H \subset P} f(h_1) = a_1 \wedge f(h_2) = a_2 \Rightarrow a_1 = a_2,$$

gdzie:

$$H = \{a_1, a_2\} \text{ oraz } S^D = 0.$$

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

P – zbiór terminów rozpoczęcia robót na sąsiednich frontach roboczych,

S^D – sprzężenia diagonalne,

P – zbiór terminów rozpoczęcia robót,

h_1, h_2 – nakłady pracy w roboczogodzinach (maszynogodzinach) wyznaczone na podstawie bazy normatywnej (KNR, KSNR, normy zakładowe),

$f(h_1)$ – czas pracy t_{ij} obliczony według zależności

$$t_{ij} = \frac{h_1}{Nz} \text{ brygadodni,}$$

N – liczba zatrudnionych,

z – liczba godzin (dnia pracy),

h_1 – jednostkowe nakłady pracy,

a następnie, po wyznaczeniu wartości za pomocą algorytmu przedstawionego w podrozdziale 2.3.1, wyznacza się charakterystyki robót $(t_{ij}^{wr}, t_{ij}^{wz}, t_{ij}^{pr}, t_{ij}^{pz})$,

$f(h_2)$ – jak wyżej, lecz dotyczy następnego frontu roboczego.

Podobnie w zapisie logicznym przedstawiono ogólne zależności dotyczące charakterystyk czasowych robót w pozostałych wariantach.

Wariant 2 – sprzężenia łączące terminy rozpoczęcia robót w późnych terminach

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1, j-1} \quad (2.2)$$

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

Wzór (2.2) gwarantuje spełnienie warunku równoczesnego rozpoczęcia robót z uwzględnieniem ich najpóźniejszego terminu. Jest to bardzo szczególny przypadek praktyczny nie mający częstego zastosowania, może być jedynie związany z koniecznością dotrzymania najpóźniejszego terminu zakończenia robót. Jest więc to zależność pośrednia, przenoszona przez ciąg innych uwarunkowań technologicznych i organizacyjnych. Przyjmując jako niezmienny najpóźniejszy termin zakończenia roboty t_{ij}^{pz} , możemy wyznaczyć wartość t_{ij}^{pr} , uwzględniając czas trwania roboty j frontu i , a następnie przyjmując warunek oddziaływania zerowych sprzężeń diagonalnych przyjmujemy najpóźniejszy termin roboty $j-1$ frontu $i+1$. Ciąg wzajemnych relacji będzie wówczas

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

przy czym: $t_{ij}^{pz} = t_{ij}^{pr} + t_{ij}$.

Definicja

$$\bigwedge_{b_1, b_2 \in P} \bigvee_{K \subset P} f(k_1) = b_1 \wedge f(k_2) = b_2 \Rightarrow b_1 = b_2,$$

gdzie: $K = \{b_1, b_2\}$ oraz $S^D = 0$.

Wariant 3 – sprzężenia łączące terminy zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j-1}^{wz} \quad (2.3)$$

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

Wzór (2.3) spełnia warunek jednoczesnego zakończenia różnych robót na dwóch sąsiednich frontach roboczych. Dotyczy to bezpośrednio najwcześniejszych terminów zakończenia robót. Jest to często występująca sytuacja organizacyjna związana z jednoczesnym zakończeniem różnych robót (np. w budownictwie przemysłowym – zakończeniem montażu obudowy z robotami dachowymi, hydroizolacyjnymi, których realizacja umożliwia prowadzenie robót posadzkarskich). Dla tak sformułowanego warunku, diagonalne sprzężenia zerowe $S^D = 0$ powodują równoległość prowadzenia robót różnego rodzaju w ich końcowej fazie, tj. robót j frontu i oraz robót $j-1$ frontu $i+1$.

Definicja

$$\bigwedge_{c_1, c_2 \in p} \bigvee_{L \subset P} f(l_1) = c_1 \wedge f(l_2) = c_2 \Rightarrow c_1 = c_2,$$

gdzie $L = \{c_1, c_2\}$ oraz S^D .

Wariant 4 – sprzężenia łączące terminy zakończenia robót w najpóźniejszych terminach

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1, j-1}^{pz} \quad (2.4)$$

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

Wzór (2.4) stanowi warunek jednoczesnego zakończenia robót różnego rodzaju j oraz $j-1$ na sąsiednich frontach i oraz $i+1$. Ważna jest w tym przypadku relacja od roboty poprzedzającej technologicznie do następnej w ustalonym porządku. Zerowe sprzężenia diagonalne zapewnią zrealizowanie warunku jednoczesnego zakończenia robót j frontu i oraz robót $j-1$ frontu $i+1$, co powoduje, że roboty te mogą być realizowane w zależności od ich długotrwałości, jako równoległe w końcowej fazie realizacji.

Wymienione cztery przypadki oddziaływania zerowych sprzężeń diagonalnych wskazują na możliwości tworzenia modelu organizacyjnego o równoległej strukturze wewnętrznej. Roboty różnego rodzaju wykonywane na sąsiednich frontach mogą być realizowane równoległe w zależności od nakładanych warunków.

Definicja

$$\bigwedge_{d_1, d_2 \in p} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = d_1 \wedge f(y_2) = d_2 \Rightarrow d_1 = d_2,$$

gdzie: $Y = \{d_1, d_2\}$ oraz $S^D = 0$.

Wariant 5 – sprzężenia łączące terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz} \quad (2.5)$$

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

Zależność (2.5) nakazuje po wykonaniu roboty $j-1$ przystąpić do realizacji roboty j . Jest to jeden z częstych praktycznych przypadków, kiedy firma budowlana po wykonaniu robót na jednym froncie przechodzi na następny, wykonując innego rodzaju operację technologiczną. Aktywne oddziaływanie zerowych sprzężeń diagonalnych powoduje taką synchronizację robót, że następują one po sobie, tworząc kompleks robót o szeregowej strukturze wewnętrznej [44, 49, 50].

Definicja

$$\bigwedge_{e_1, e_2 \in P} \bigvee_{X \subset P} f(x_1) = e_1 \wedge f(x_2) = e_2 \Rightarrow e_1 = e_2,$$

gdzie: $X = \{x_1, x_2\}$ oraz $S^D = 0$.

Wariant 6 – sprzężenia łączące terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w najpóźniejszych terminach

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pz} \quad (2.6)$$

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

Wzór (2.6) określa zależność pomiędzy zakończeniem roboty poprzedzającej i następującej, które należy zrealizować na różnych obiektach budowlanych. Jest to częsty przypadek wykonawczy, lecz dotyczy sytuacji związanej z uwzględnieniem najpóźniejszych terminów realizacji robót. Sprowadza się go do sytuacji kolejnego prowadzenia robót na różnych obiektach, tj. tworzy się kompleks robót o szeregowej strukturze wewnętrznej.

Wymienione dwa warianty oddziaływania zerowych sprzężeń diagonalnych umożliwiają synchronizację robót budowlanych, tworząc kompleks o szeregowej strukturze wewnętrznej.

Definicja

$$\bigwedge_{h_1, h_2 \in P} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = h_1 \wedge f(y_2) = h_2 \Rightarrow h_1 = h_2,$$

gdzie: $Y = \{h_1, h_2\}$ oraz $S^D = 0$.

2.2.1. Algorytm harmonogramowania robót budowlanych z zerowymi sprzężeniami diagonalnymi

Podstawowe założenia

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci zbioru obiektów

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

na których prowadzone będą roboty przez wyspecjalizowane firmy

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_p\}.$$

Na każdym obiekcie O należy wykonać określone kosztorysem roboty

$$P_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}].$$

Roboty budowlane mają być wykonywane w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu P_{ik-1} , a przed zakończeniem P_{ik+1} .

Na proces realizacyjny nałożone zostały następujące wymagania:

- firmy budowlane (brygady robocze) przechodzą z obiektu na obiekt w sposób ciągły,
- procesy budowlane powinny być wykonywane kolejno na obiektach O_i , tj. sprzężenia diagonalne połączą terminy zakończenia danego procesu P_j na obiekcie O_i z terminem rozpoczęcia następnego P_{j+1} na obiekcie O_{i-1} ,
- wartość sprzężeń diagonalnych powinna być równa zero,
- rozpoczęcie procesu P_{ik} na obiekcie O_i jest możliwe po zakończeniu na nim procesu P_{ik-1} .

Zagadnienie harmonogramowania robót polega na ustaleniu takiej kolejności realizacji, aby

$$L_{\min} = \max_i |T_{im} - D_i|,$$

gdzie:

D_i – dyrektywny (inwestorski) termin realizacji,

T_{im} – termin zakończenia procesu P_m na obiekcie i ,

$L_{\min}$ – minimalny termin realizacji robót.

Schemat algorytmu

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

Faza 1 – wyznaczamy termin rozpoczęcia i zakończenia roboty w pierwszym diagonalnie macierzy τ .

Faza 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w drugim diagonalnie. Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na drugim obiekcie przyjmujemy równy zero. Pozostałe terminy wyznaczamy z warunków:

$$t_{2,1}^{wr} = 0,$$

$$t_{2,1}^{wz} = t_{2,1},$$

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

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

Tworzymy zbiór par terminów zakończenia i rozpoczęcia kolejnych robót na obiekcie

$$R_1 = \{t_{1,1}^{wz}, t_{1,2}^{wr}\}.$$

Należy rozpatrzyć następujące możliwe przypadki:

jeżeli: $t_{1,1}^{wz} \leq t_{1,2}^{wr} \rightarrow$ przyjmujemy ustalone terminy realizacji,

$t_{1,1}^{wz} > t_{1,2}^{wr} \rightarrow$ wyznaczamy nowe terminy realizacji.

Obliczamy różnicę $t_{1,2}^{wr} - t_{1,1}^{wz} = a$, a następnie wyznaczamy

$$t_{1,2}^{wr} + a.$$

Wartość ta stanowi podstawę do wyznaczania pozostałych charakterystyk robót w diagonalnie

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

Faza 3 – terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w trzecim diagonalu wyznacza się podobnie jak w poprzednim etapie

$$t_{3,1}^{wr} = 0, \quad t_{3,1}^{wz} = t_{3,1} + t_{3,1}, \quad t_{2,2}^{wr} = t_{3,1}^{wz}, \quad t_{2,2}^{wz} = t_{2,2}^{wr} + t_{2,2},$$

$$R_2 = \{(t_{2,2}^{wr}, t_{2,1}^{wz}), (t_{1,2}^{wz}, t_{3,3}^{wr})\},$$

jeżeli $t_{2,1}^{wz} > t_{2,2}^{wr}$ lub $t_{1,1}^{wz} > t_{1,2}^{wr}$, wyznaczamy różnice:

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

oraz

$$t_{1,2}^{wz} - t_{1,3}^{wr} = c.$$

Otrzymujemy zbiór $\{b, c\} \xrightarrow{\text{MAX}} b \vee c$, a następnie dodajemy odpowiednią wartość do terminu rozpoczęcia danej roboty ($t_{1,3}^{wr}$ lub $t_{2,2}^{wr}$) i postępujemy tak, jak w poprzednim etapie.

Zgodnie z podanym schematem postępujemy do chwili wyczerpania zbioru diagonalów, wyznaczając charakterystyki czasowe robót.

2.2.2. Przykład zastosowania algorytmu

Sporządzono macierz czasów trwania robót remontowych (odnowienie powłok malarskich) w czterech budynkach mieszkalnych. Zbiór procesów obejmuje kolejno: naprawę tynków wewnętrznych, zewnętrznych, malowanie klatek schodowych i malowanie elewacji. Czasy trwania robót podano w macierzy τ

$$\tau = \begin{bmatrix} 12 & 9 & 11 & 6 \\ 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}.$$

Wiersze w macierzy odpowiadają kolejnym obiektom budowlanym, kolumny natomiast procesom roboczym.

W wyniku optymalizacji minimalizacji czasu (według [25]) uzyskano nową kolejność realizacji obiektów

$$\tau' = \begin{bmatrix} 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 12 & 9 & 11 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}.$$

Zmiana kolejności realizacji obiektów zapewni bez jakichkolwiek dodatkowych nakładów skrócenie terminu realizacji kompleksu z 40 jednostek do 38, tj. o 5%.

Tabela 2.1. Charakterystyki czasowe

(cyfry w polach oznaczają kolejno: termin rozpoczęcia roboty, czas jej trwania, termin zakończenia roboty)

Obiekt	Diagonały						
	1	2	3	4	5	6	7
II	1/9/10	10/6/16	16/7/23	31/4/35			
III		3/7/10	12/4/16	21/10/31	32/4/36		
I			0/12/12	12/9/21	21/11/32	32/6/38	
IV				6/6/12	17/4/21	27/5/32	32/3/35

2.3. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem zerowych, odwrotnych sprzężeń diagonalnych

Zerowe odwrotne sprzężenia diagonalne wiążą ze sobą roboty znajdujące się w diagonalach macierzy. Różnica w stosunku do sprzężeń diagonalnych wynika z kierunku ich oddziaływania, tzn. różna jest sekwencja robót. Mają wspólny kierunek oddziaływania, lecz różnią się zwrotem (wg nazewnictwa dotyczącego rachunku wektorowego).

Sprzężenia te odwzorowują zależność technologiczną i organizacyjną, uzależniającą wykonanie danej i poprzedzającej roboty w porządku technologicznym na dwóch sąsiednich frontach roboczych. Jest to sytuacja pojawiająca się w praktyce budowlanej, np. gdy dane firmy (brygady robocze) prowadzą jednocześnie dwie różne technologicznie roboty na dwóch obiektach lub ich częściach. Uzależnienie obu robót może być również związane z wykorzystaniem wspólnego transportu pionowego, który limituje wspólne rozpoczęcie robót na różnych frontach danego obiektu budowlanego. Istotną właściwością jest uzależnienie robót j frontu i oraz robót $j+1$ frontu $i-1$.

Roboty różnego rodzaju wykonywane na sąsiednich frontach roboczych mogą być realizowane równolegle w zależności od ustalonych warunków.

Definicja

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

gdzie: $X = \{a, b\}$ oraz $S^{\text{OD}} = 0$.

Przegląd wariantów metody

Wariant 1 – sprzężenia łączące czasy rozpoczęcia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{\text{wr}} = t_{i-1, j+1}^{\text{wr}} \quad (2.7)$$

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

Wzór (2.7) określa zasadę jednoczesnego rozpoczęcia robót na sąsiednich frontach roboczych (obiektach budowlanych). Nakłada on warunek sekwencyjności robót, uzależniając rozpoczęcie danej roboty od terminu rozpoczęcia roboty na poprzednim obiekcie, następnej w porządku technologicznym.

W praktyce wykonawczej pojawia się sytuacja organizacyjna związana z równoległością prowadzenia robót różnego rodzaju j oraz $j-1$ na dwóch niezależnych frontach roboczych i oraz $i-1$.

Definicja

$$\bigwedge_{c,d \in p} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = c \wedge f(y_2) = d \Rightarrow c = d,$$

gdzie $Y = \{c, d\}$.

Możliwości:

- 1) $y_1 = c \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{ij}^{wr} \Leftrightarrow S^D = 0,$
- 2) $y_2 = d \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} \Leftrightarrow S^{OD} = 0.$

Wariant 2 – sprzężenia łączące czasy rozpoczęcia robót w najpóźniejszych terminach

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad (2.8)$$

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

Zależność (2.8) określa warunek jednoczesnego rozpoczęcia robót różnego rodzaju (j oraz $j-1$). Należy wówczas uwzględnić najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót. Warunek ten dotyczy robót znajdujących się poza drogą krytyczną, gdy mamy możliwość takiego planowania robót, aby rozpocząć je, wykorzystując maksymalnie rezerwy czasowe.

Sytuacja taka jest wówczas, gdy musimy – ze względu na niezbędne przerwy technologiczne (np. wiązanie betonu, zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji i inne) – wykorzystać czas, planując rozpoczęcie robót w maksymalnym czasie, jaki może upłynąć pomiędzy najwcześniejszym i najpóźniejszym terminem rozpoczęcia robót, tj. t_{ij}^{wr} i t_{ij}^{pr} , wówczas $t_{ij}^{wr} - t_{ij}^{pr} \geq 0$.

Zachodzi również zależność zapewniająca równoległą realizację związanych technologicznie robót na dwóch sąsiednich obiektach.

Definicja

$$\bigwedge_{e,f \in P} \bigvee_{U \subset P} f(u_1) = e \wedge f(u_2) = f \Rightarrow e = f,$$

gdzie $U = \{e, f\}$.

Możliwości:

$$1) u_1 = e \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \Leftrightarrow S^{OD} = 0,$$

$$2) u_2 = f \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pr} = t_{ij}^{pr} \Leftrightarrow S^D = 0.$$

Wariant 3 – sprzężenia łączące czasy zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (2.9)$$

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

Wzór (2.9) nakłada warunek jednoczesnego zakończenia robót różnych rodzajów (j oraz $j+1$) na sąsiednich frontach roboczych. Jest to częste ograniczenie technologicznie związane z koniecznością udostępnienia do eksploatacji lub prowadzenia innych robót (np. instalacyjnych), części lub całego obiektu. Musi zostać spełniony warunek równo-

ległego prowadzenia różnych rodzajów robót i ich jednoczesnego zakończenia. Równocześnie sprzężenia odwrotnie diagonalne określają sekwencję robót, tj. $t_{i-1,j+1} \prec t_{ij}$.

Definicja

$$\bigwedge_{g,h \in W} \bigvee_{Z \subset W} f(z_1) = g \wedge f(z_2) = h \Rightarrow g = h,$$

gdzie $Z = \{z_1, z_2\}$.

Możliwości:

$$1) \ z_1 = g \Rightarrow t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \Leftrightarrow S^{OD},$$

$$2) \ z_2 = h \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{wz} = t_{ij}^{wz} \Leftrightarrow S^D.$$

Wariant 4 – sprzężenia łączące czasy zakończenia robót w późnych terminach

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad (2.10)$$

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

Zależność (2.10) zapewnia jednoczesne zakończenie robót różnych rodzajów (j oraz $j+1$). Warunek ten zapewnia np. możliwości eksploatacji różnych części obiektu po zakończeniu robót. Przykładem mogą być roboty hydroizolacyjne dachu z wykonaniem jego odwodnienia. Spełnienie tego warunku umożliwia prowadzenie robót posadzkarskich, uzależnionych od szczelności pokrycia dachu. Przykłady tego typu sekwencji robót budowlanych, szczególnie w budownictwie przemysłowym, można by mnożyć. Wzór (2.10) nakłada dodatkowo warunek najpóźniejszych terminów realizacji, które wykluczają jakiegokolwiek ich przesunięcie w czasie. Jednocześnie obserwujemy, że roboty te, prowadzone jako równoległe, muszą mieć ściśle określone terminy ich rozpoczęcia. Warunkują one zakończenie robót w ustalonym terminie

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

oraz

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

Definicja

$$\bigwedge_{k,l \in w} \bigvee_{K \in W} f(x_1) = k \wedge f(x_2) = l \Rightarrow k = l,$$

gdzie $K = \{k, l\}$.

Możliwości:

$$1) \ x_1 = k \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \Leftrightarrow S^{OD} = 0,$$

$$2) \ x_2 = l \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{ij}^{pz} \Leftrightarrow S^D = 0.$$

Wariant 5 – sprzężenia łączące czasy rozpoczęcia i zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (2.11)$$

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

Wzór (2.11) nakłada warunek rozpoczęcia roboty j frontu i w zależności od terminu zakończenia roboty $j+1$ frontu $i-1$. Pojawia się wówczas zależność sekwencyjna wskazująca kolejność realizacji robót $j+1$ frontu $i-1$, a następnie robót j frontu i . Roboty budowlane różnego rodzaju należy wykonać w ustalonej kolejności dla wcześniejszych terminów na sąsiednich frontach roboczych. Zależność ta może mieć w praktyce wykonawczej znaczenie organizacyjne, gdyż pozwala realizować różne roboty za pomocą tych samych środków (np. zlecając roboty jednej firmie). Dotyczy to najwcześniejszych terminów realizacji, umożliwia wyznaczenie rezerw czasu dla prowadzenia robót na danym froncie roboczym (S^F).

Dla danej roboty zachodzą zależności:

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

oraz

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

Definicja

$$\bigwedge_{m,n \in p} \bigvee_{M \subset P} f(u_1) = m \wedge f(u_2) = n \Rightarrow m = n,$$

gdzie $M = \{u_1, u_2\}$.

Możliwości:

$$1) u_1 = m \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wz} \Leftrightarrow S^{OD} = 0,$$

$$2) u_2 = n \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{wz} = t_{ij}^{wr} \Leftrightarrow S^D = 0.$$

Wariant 6 – sprzężenia łączące czasy rozpoczęcia i zakończenia robót w najpóźniejszych terminach

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad (2.12)$$

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

Zależność (2.12) zapewnia warunek rozpoczęcia danej roboty t_{ij} po zakończeniu roboty $t_{i-1,j+1}$ na sąsiednich frontach roboczych. Roboty budowlane zgodnie z przyjętą regułą należy realizować w ustalonej sekwencji, prowadząc kolejne roboty na kolejnych frontach roboczych. Jest to sytuacja uzasadniona praktyką wykonawczą, umożliwiającą danej firmie budowlanej lub brygadzie roboczej prowadzenie kolejnych robót na różnych obiektach. Zależność ta wymaga jedynie dostępności frontów roboczych umożliwiających prowadzenie planowanych robót.

W tym wariancie organizacyjnym należy uwzględnić szczegółowy warunek związany z najpóźniejszymi terminami zakończenia robót $j+1$ frontu $i-1$ oraz rozpoczęcia robót j frontu i . Ważna jest również relacja poprzedzania.

Definicja

$$\bigwedge_{p,s \in w} \bigvee_{L \subset W} f(z_1) = p \wedge f(z_2) = s \Rightarrow p = s,$$

gdzie $L = \{p, s\}$.

Możliwości:

$$1) z_1 = p \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pz} \Leftrightarrow S^{OD} = 0,$$

$$2) z_2 = s \Rightarrow t_{i-1,j+1}^{pz} = t_{ij}^{pr} \Leftrightarrow S^D = 0.$$

2.3.1. Algorytm harmonogramowania robót budowlanych z zerowymi, odwrotnymi sprzężeniami diagonalnymi

Podstawowe założenia

Zadanie inwestycyjne dane jest w postaci zbioru obiektów

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}.$$

Mają one być zrealizowane przez wielobranżowe brygady robocze

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_p\}.$$

Przewidywane procesy robocze tworzą ciąg

$$P_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}].$$

Procesy robocze mają być wykonywane na obiektach w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu P_{ik-1} , a przed zakończeniem P_{ik+1} .

Na proces realizacyjny nałożone zostały następujące wymagania:

- grupy robocze (firmy budowlane) przechodzą z obiektu na obiekt w sposób ciągły,
- procesy budowlane powinny być wykonywane zgodnie z ustalonym porządkiem,
- wartość sprzężeń odwrotnych do diagonalnych powinna osiągnąć wartość zera, tj. sprzężenia odwrotne diagonalne łączą terminy zakończenia danego procesu P_j na obiekcie O_i z terminem rozpoczęcia procesu P_{j-1} na obiekcie O_{i+1} . Zagadnienie to polega na takiej harmonizacji robót budowlanych, aby

$$T \rightarrow \min,$$

gdzie T – czas trwania realizacji kompleksu obiektów.

Schemat algorytmu

Budowa modelu organizacyjnego, w którym uwzględniono wpływ sprzężeń odwrotnych diagonalnych przebiega według dalej przedstawionego schematu. Bazą umożliwiającą przeprowadzenie procesu synchronizacji jest macierz czasów wykonania robót na obiektach.

Faza 1 – wyznaczamy termin rozpoczęcia i zakończenia roboty w pierwszym diagonalu macierzy τ .

Faza 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia w drugim diagonalu. Termin rozpoczęcia drugiej roboty na pierwszym obiekcie (indeksy 1, 2) jest równy terminom zakończenia roboty poprzedzającej na tym obiekcie (1, 1). Pozostałe terminy wyznaczamy z warunków:

$$\begin{aligned}
 t_{1,2}^{wr} &= t_{1,1}^{wz}, \\
 t_{1,2}^{wz} &= t_{1,2}^{wr} + t_{1,2}, \\
 t_{2,1}^{wr} &= t_{1,2}^{wz}, \\
 t_{2,1}^{wz} &= t_{2,1}^{wr} + t_{2,1}.
 \end{aligned}$$

Faza 3 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w trzecim diagonale. Rozpoczynamy od trzeciej roboty na pierwszym obiekcie (indeksy macierzy 1,3), postępując tak, jak poprzednio, tj.

$$\begin{aligned}
 t_{1,3}^{wr} &= t_{1,2}^{wz}, \\
 t_{1,3}^{wz} &= t_{1,2}^{wr} + t_{1,3}, \\
 t_{2,2}^{wr} &= t_{1,3}^{wz}, \\
 t_{2,2}^{wz} &= t_{2,2}^{wr} + t_{2,2}, \\
 t_{3,1}^{wr} &= t_{2,2}^{wz}, \\
 t_{3,1}^{wz} &= t_{3,1}^{wr} + t_{3,1}.
 \end{aligned}$$

Po wyznaczeniu ciągu wartości tworzymy zbiory par obejmujące terminy zakończenia i rozpoczęcia kolejnych w ciągu technologicznym robót na obiektach w sąsiednich diagonalach, z wyjątkiem pierwszej i ostatniej roboty w ciągu

$$R = \{t_{2,1}^{wz}, t_{2,2}^{wr}\},$$

jeżeli $t_{2,1}^{wz} > t_{2,2}^{wr}$, wyznaczamy różnicę

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

Otrzymaną wartość dodajemy do wartości terminów rozpoczęcia robót w diagonale i wyznaczamy nowe terminy ich zakończenia.

Korekta ta jest spowodowana koniecznością zachowania warunku bezkolizyjnej pracy brygad roboczych (firm budowlanych). Postępujemy zgodnie z podanym schematem do chwili wyczerpania się zbioru diagonalów. Podczas tworzenia zbiorów różnic wartości zakończenia i rozpoczęcia kolejnych robót na danych obiektach należy pamiętać, że uwzględniamy jedynie maksymalną wartość ze zbioru różnic, o którą to dokonywać będziemy korekty terminów rozpoczęcia robót.

Charakterystyki czasowe robót budowlanych

Sporządzono macierz czasów trwania robót podczas wykonywania podziemnej części czterech budynków. Zbiór procesów obejmuje kolejno: roboty ciesielskie, zbrojarskie, betoniarskie i izolacyjne. Czasy trwania robót podano w macierzy

$$\tau = \begin{bmatrix} 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 12 & 9 & 11 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

Wiersze w macierzy odpowiadają kolejnym obiektom budowlanym, kolumny natomiast procesom roboczym. Elementy macierzy określają czas wykonania danej roboty na obiekcie przez brygadę roboczą (firmę budowlaną).

Na podstawie przedstawionego algorytmu uformowano potok, wyznaczając jego charakterystyki czasowe.

Tabela 2.1. Charakterystyki czasowe robót (sprzężenia odwrotnie diagonalne)

Obiekt	Diagonały						
	1	2	3	4	5	6	7
A	0/9/9	9/6/15	15/7/22	24/4/28			
B		15/7/22	22/4/26	28/10/38	43/4/47		
C			26/12/38	38/9/47	47/11/58	58/6/64	
D				47/6/53	58/4/62	64/5/69	69/3/72

Uwaga: cyfry w polach oznaczają kolejno: termin rozpoczęcia roboty, czas jej trwania, termin zakończenia roboty.

2.4. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych

W kompleksie robót budowlanych różnego rodzaju (różnych technologicznie) wykonywanych na frontach roboczych występują również sprzężenia przekątne. Mają one kierunek prostopadły do kierunku działania sprzężeń diagonalnych w macierzy czasów trwania robót.

Sprzężenia przekątne wiążą roboty danego rodzaju j na danym froncie i z robotami poprzedzającymi w porządku technologicznym $j-1$, wykonywanym na poprzednim froncie $i-1$.

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

Dzięki analizie możliwości oddziaływania sprzężeń przekątnych na roboty budowlane w kompleksie można wyszczególnić kilka przypadków. Wynikają one z moż-

liwości wariantowania ich oddziaływania na roboty budowlane charakteryzujące się najwcześniejszymi i najpóźniejszymi terminami rozpoczęcia i ich zakończenia. Umożliwiają też tworzenie zbioru wariantów metody. Pozwalają wiązać ze sobą roboty jednego rodzaju, np. roboty $j-1, j, j+1$, co powoduje, że tworzone są łańcuchy robót jednakowych technologicznie na frontach roboczych. Powstaje wówczas grupa metod organizacji o właściwościach pośrednich między tzw. metodami potokowej organizacji w klasycznej postaci a metodami kolejnego wykonania.

Transponując macierz wyjściową czasów trwania robót budowlanych z układu RF (rzędne – fronty robocze) do układu RP (rzędne – procesy technologiczne), możemy stworzyć, stosując sprzężenia przekątne, nową grupę zależności organizacyjnych i technologicznych. Sprzężenia te pozwolą wiązać ze sobą fronty robocze w układzie sekwencyjnym, tj. fronty $i-1, i, i+1$. Można więc stworzyć nową grupę zależności między robotami budowlanymi dzięki sprzężeniom przekątnym z uwzględnieniem najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót.

Przegląd wariantów metody

Wariant 1 – dla najwcześniejszych terminów

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j-1}^{wr} \quad (2.13)$$

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

Definicja

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

gdzie $X = \{a, b\}$.

Możliwości:

$$1) \quad x_1 = a \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j-1}^{wr}, \quad S^P = 0,$$

$$2) \quad x_2 = b \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{wr} = t_{ij}^{wr}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 2 – dla najwcześniejszych terminów

$$t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j-1}^{wz} \quad (2.14)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{c,d \in P} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = c \wedge f(y_2) = d \Rightarrow c = d,$$

gdzie $Y = \{c, d\}$.

Możliwości:

- 1) $y_1 = c \Rightarrow t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j-1}^{wz}, \quad S^P = 0,$
- 2) $y_2 = d \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{wz} = t_{ij}^{wz}, \quad S^P = 0.$

Wariant 3 – dla najwcześniejszych terminów

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j-1}^{wr} \quad (2.15)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{e,f \in P} \bigvee_{U \subset P} f(u_1) = e \wedge f(u_2) = f \Rightarrow e = f,$$

gdzie $U = \{e, f\}$.

Możliwości:

$$1) u_1 = e \Rightarrow t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j-1}^{wr}, \quad S^P = 0,$$

$$2) u_2 = f \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{wr} = t_{ij}^{wz}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 4 – dla najpóźniejszych terminów

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j-1}^{pr} \quad (2.16)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{g,h \in W} \bigvee_{Z \subset W} f(z_1) = g \wedge f(z_2) = h \Rightarrow g = h,$$

gdzie $Z = \{g, h\}$.

Możliwości:

$$1) z_1 = g \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j-1}^{pr}, \quad S^P = 0,$$

$$2) z_2 = h \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{pr} = t_{ij}^{pr}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 5 – dla najpóźniejszych terminów

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j-1}^{pz} \quad (2.17)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{k,l \in W} \bigvee_{K \subset W} f(x_1) = k \wedge f(x_2) = l \Rightarrow k = l,$$

gdzie $K = \{k, l\}$.

Możliwości:

- 1) $x_1 = k \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j-1}^{pz}, \quad S^P = 0,$
- 2) $x_2 = l \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{pz} = t_{ij}^{pz}, \quad S^P = 0.$

Wariant 6 – dla najpóźniejszych terminów

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

(2.18)

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

Definicja

$$\bigwedge_{m,n \in P} \bigvee_{U \subset P} f(y_1) = m \wedge f(y_2) = n \Rightarrow m = n,$$

gdzie $U = \{m, n\}$.

Możliwości:

- 1) $y_1 = m \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j-1}^{pz}, \quad S^P = 0,$
- 2) $y_2 = n \Rightarrow t_{i-1,j-1}^{pz} = t_{ij}^{pr}, \quad S^P = 0.$

Sprzężenia przekątne łączące roboty na sąsiednich frontach roboczych $i-1, i$, z uwzględnieniem kolejnych technologicznie robót $j-1, j$, oddziałują na charakterystyki czasowe w sposób pośredni. Najczęściej przybierają wartości > 0 . Pojawiają się również sytuacje wynikające z praktyki wykonawczej, kiedy sąsiednie roboty budowlane (wynikające z sekwencji technologicznej) są traktowane jako „zerowe” (nie występują w praktyce na danym froncie). Wówczas sprzężenia przekątne oddziałują w sposób bezpośredni np. dla roboty t_{ij}

$$t_{i-1,j} = 0 \quad \text{oraz} \quad t_{i,j-1} = 0, \quad \text{to} \quad S^P = 0,$$

wtedy pojawia się jeden z przedstawionych wcześniej wariantów.

2.4.1. Algorytm harmonogramowania robót z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych

Podstawowe założenia

Zadanie inwestycyjne dane jest w postaci zbioru obiektów

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}.$$

Mają one być zrealizowane przez firmy budowlane (grupy robocze)

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_p\}.$$

Planowane procesy technologiczne tworzą ciąg

$$P_i = \langle P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im} \rangle$$

Procesy technologiczne należy wykonać w ustalonym porządku

$$P_{i1} \prec P_{i2} \prec \dots \prec P_{im}.$$

Na proces realizacyjny nałożone zostały ograniczenia wyrażone za pomocą sprzężeń przekątnych.

Zagadnienie harmonogramowania polega na synchronizacji robót budowlanych jednego rodzaju, aby zapewnić najkrótszy czas realizacji zadania inwestycyjnego, tj.

$$T \mapsto \min.$$

Schemat algorytmu

Podstawą prowadzenia obliczeń optymalizacyjnych związanych z wyznaczeniem charakterystyk czasowych robót budowlanych jest macierz czasów trwania robót.

Faza 1 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia roboty o indeksie 1,1, tj.
 $t_{1,1}^{wr} = 0, \quad t_{1,1}^{wz} = t_{1,1}^{wr} + t_{1,1}.$

Faza 2 – wyznaczamy termin rozpoczęcia roboty $t_{2,2}^{wr}$, przyjmując, że $t_{2,2}^{wr} = t_{1,1}^{wz}$, a następnie termin zakończenia roboty $t_{2,2}^{wz} = t_{2,2}^{wr} + t_{2,2}$. Analogicznie określamy termin rozpoczęcia i zakończenia w pozostałych elementach macierzy w pierwszej przekątnej.

Faza 3 – dla robót znajdujących się w drugiej i następnych przekątnych macierzy wyznaczamy terminy rozpoczęcia pierwszych robót w ciągu technologicznym. Polega to na określeniu wartości czasowej pomiędzy terminami rozpoczęcia robót w sąsiednich ciągach technologicznych (t_{rj}). Tworzymy dwukolumnowe podmacierze obejmujące sąsiednie ciągi technologiczne

$$t_{rj} = \max \{ (t_{i-1,j-1}), (t_{i,j} + t_{i-1,j-1} - t_{i-1,j}), (t_{i-1,j-1} + t_{i,j} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j-1} - t_{i+1,j}) \dots \},$$

gdzie:

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

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

Następnie, przyjmując, że $t_{r,j} = t_{i-1,j}^{wr}$, obliczamy pozostałe charakterystyki czasowe robót budowlanych jak wyżej.

Faza 4 – procedurę tę powtarzamy do chwili wyczerpania się zbioru ciągów technologicznych powiązanych sprzężeniem przekątnym w macierzy.

Przykład liczbowy

Opracowano macierz czasów trwania robót budowlanych (odnowienie powłok malarskich) dla czterech budynków mieszkalnych. Zbiór robót wytypowanych podczas przeglądu obejmuje: naprawę tynków wewnętrznych, zewnętrznych, malowanie, naprawę elewacji. Czasy zapisano w macierzy

$$\tau = \begin{bmatrix} 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 12 & 9 & 11 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

Zbudowano macierz τ' z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych, wiążąc zależnością organizacyjną roboty różnych rodzajów prowadzone na różnych obiektach, tj. np.

$$t_{11} < t_{22} < t_{33} < t_{44}.$$

W wyniku obliczeń wyznaczono charakterystyki czasowe robót.

Tabela 2.3

0	9	9	15	20	27	27	31
9		6		7		4	
9	16	9	13	15	25	27	31
7		4		10		4	
16	28	16	25	13	24	25	31
12		9		11		6	
28	34	28	32	25	30	24	27
6		4		5		3	

Zbudowano dwukolumnowe, pomocnicze podmacierze, umożliwiające wyznaczenie odpowiednich terminów rozpoczęcia robót w ciągach organizacyjnych.

$$\begin{array}{c|c} 9 & 6 \\ \hline 4 & 10 \\ \hline 11 & 6 \\ \hline 3 & \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 6 & 7 \\ \hline 10 & 4 \\ \hline 6 & \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 7 & 4 \\ \hline 4 & \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 9 & 7 \\ \hline 4 & 9 \\ \hline 11 & 5 \\ \hline 3 & \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 7 & 12 \\ \hline 9 & 4 \\ \hline 5 & \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 12 & 6 \\ \hline 4 & \end{array}$$

$$t_{r1} = 9$$

$$t_{r2} = 11$$

$$t_{r3} = 7$$

$$t_{r4} = 9$$

$$t_{r5} = 7$$

$$t_{r6} = 12$$

Tabela 2.4

Obiekty	Przekątne						
	1	2	3	4	5	6	7
A	0/9/9	9/6/15	20/7/27	27/4/31			
B	9/4/13	15/10/25			9/7/16		
C	13/11/24	25/6/31			16/9/25	16/12/28	
D	24/3/27				25/5/30	28/4/32	28/6/34

Przyjmując kolejność tworzenia przekątnych i oddziaływania sprzężeń czasowych od ostatniego, dolnego elementu macierzy, możemy otrzymać inny model organizacyjny. Tworzymy dwukolumnowe macierze:

6 12

4

↦ 6

12 7

4 9

5

↦ 12

7 9

9 4

5 11

3

↦ 7

9 6

4 10

11 6

3

↦ 9

6 7

10 4

6

↦ 11

7 4

4

↦ 4

Tabela 2.5. Charakterystyki czasowe robót

34 9	40 6	52 7	56 4
25 7	38 4	50 10	56 4
18 12	34 9	49 11	56 6
6 6	22 4	39 5	52 3

Tabela 2.6

Obiekty	Przekątne						
	1	2	3	4	5	6	7
A				25/9/34	34/6/40	45/7/52	52/4/56
B			18/7/25	34/4/38	40/10/50	52/4/56	
C		6/12/18	25/9/34	38/11/49	50/6/56		
D	0/6/6	18/4/22	34/5/39	49/3/52			

2.5. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem odwrotnych sprzężeń przekątnych

Sprzężenia odwrotne przekątne (mające przeciwny kierunek oddziaływania w stosunku do sprzężeń przekątnych) wiążą roboty danego rodzaju j na danym froncie i z robotami następującymi w porządku technologicznym $j+1$ na następnym froncie $i+1$. Badając możliwości oddziaływania sprzężeń przekątnych, można zauważyć, że przez analogię występują między odpowiednimi robotami sprzężenia odwrotne przekątne.

Zależność ta może mieć znaczenie praktyczne, gdyż powiązane są ze sobą roboty różnego rodzaju j i $j+1$ na sąsiednich frontach roboczych. Jest to powszechne zjawisko związane z ograniczeniami technologicznymi. Należy zapewnić właściwą sekwencję robót budowlanych (np. wykonanie ścian z cegły, tynkowanie, malowanie itd.).

Sprzężenia te, o wartości zera, nakładają dodatkowy warunek ich równoległości wykonania lub realizacji w sposób kolejny. Stanowią więc podstawę do tworzenia wariantów metod organizacji robót budowlanych o złożonych strukturach wewnętrznych: równoległych, szeregowych, równoległo-potokowych, szeregowo-potokowych i potokowych.

Wyróżnić można następujące warianty oddziaływania odwrotnych sprzężeń przekątnych:

Wariant 1 – najwcześniejsze terminy rozpoczęcia robót

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j+1}^{wr} \quad (2.19)$$

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

Definicja

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

gdzie $X = \{a, b\}$.

Możliwości:

$$1) \quad x_1 = a \Rightarrow t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j+1}^{wr}, \quad S^{OP} = 0,$$

$$2) \quad x_2 = b \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{wr} = t_{ij}^{wr}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 2 – najwcześniejsze terminy zakończenia robót

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j+1}^{wz} \quad (2.20)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{b,c \in p} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = b \wedge f(y_2) = c \Rightarrow b = c,$$

gdzie $Y = \{b, c\}$.

Możliwości:

$$1) y_1 = b \Rightarrow t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j+1}^{wz}, \quad S^{OP} = 0,$$

$$2) y_2 = c \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{wz} = t_{ij}^{wz}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 3 – najwcześniejsze terminy łączące zakończenie i rozpoczęcie robót

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j+1}^{wr} \quad (2.21)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{c,d \in U} \bigvee_{P \subset U} f(u_1) = c \wedge f(u_2) = d \Rightarrow c = d,$$

gdzie $P = \{c, d\}$.

Możliwości:

$$1) u_1 = c \Rightarrow t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j+1}^{wr}, \quad S^{OP} = 0,$$

$$2) u_2 = d \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{wr} = t_{ij}^{wz}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 4 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j+1}^{pr} \quad (2.22)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{d,f \in W} \bigvee_{Z \subset W} f(z_1) = d \wedge f(z_2) = f \Rightarrow d = f,$$

gdzie $Z = \{d, f\}$.

Możliwości:

$$1) z_1 = d \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j+1}^{pr}, \quad S^{OP} = 0,$$

$$2) z_2 = f \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{pr} = t_{ij}^{pr}, \quad S^P = 0.$$

Wariant 5 – najpóźniejsze terminy zakończenia robót

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j+1}^{pz} \quad (2.23)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{g,h \in K} \bigvee_{W \subset K} f(x_1) = g \wedge f(x_2) = h \Rightarrow g = h,$$

gdzie $W = \{g, h\}$.

Możliwości:

- 1) $x_1 = g \Rightarrow t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j+1}^{pz}, \quad S^{OP} = 0,$
- 2) $x_2 = h \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{pz} = t_{ij}^{pz}, \quad S^P = 0.$

Wariant 6 – najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j+1}^{pz} \quad (2.24)$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{k,l \in P} \bigvee_{U \subset P} f(y_1) = k \wedge f(y_2) = l \Rightarrow k = l,$$

gdzie $U = \{k, l\}$.

Możliwości:

- 1) $y_1 = k \Rightarrow t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j+1}^{pz}, \quad S^{OP} = 0,$
- 2) $y_2 = l \Rightarrow t_{i+1,j+1}^{pz} = t_{ij}^{pr}, \quad S^P = 0.$

Przedstawione relacje występujące między kolejnymi technologicznie robotami mają swoje odwzorowanie w sytuacjach praktycznych. Pojawiają się relacje wiążące roboty kolejne technologicznie na sąsiednich frontach. Zależność ta może wiązać terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, zarówno wczesne, jak i późne. Dotyczyć to może występującej powszechnie w budownictwie przemysłowym zależności pomiędzy terminem zakończenia realizacji, np. robót hydroizolacyjnych dachu hali, a rozpoczęciem robót posadzkarskich. To ograniczenie technologiczne wynika z potrzeby zabezpieczenia robót posadzkarskich przed opadami, jak również uzyskanie odpowiedniej temperatury ($> 5^\circ\text{C}$), podczas robót betonowych. Przykłady tego typu i zależności technologiczne można by mnożyć. Dotyczyć to może również wykonania np. robót instalacyjnych – wykonania sieci odwodnienia dachu z robotami posadzkarskimi itp.

3. Metody organizacji robót budowlanych o szeregowej strukturze wewnętrznej

Niektóre zagadnienia planowania robót budowlanych o złożonej strukturze wewnętrznej były prezentowane w licznych opracowaniach [7, 10, 38, 40, 44, 51, 75, 76]. Dotyczyły problemów związanych z synchronizacją robót, zastosowaniem różnych metod organizacji w kompleksie, zagadnień równoległości robót jednego rodzaju, jak i równoległości kompleksów robót różnych rodzajów.

Przyjmując do analizy klasyfikację metod organizacji robót budowlanych [1–3] oraz systematykę pojęć i ich definicje [79, 81], można zakreślić obszar niezidentyfikowanych relacji oddziaływania sprzężeń czasowych.

Jednym z istotnych praktycznych problemów związanych z harmonogramowaniem jest zagadnienie powiązania różnych rodzajów robót realizowanych różnymi metodami organizacji robót budowlanych. Zastosowanie sprzężeń, np. między środkami realizacji i frontami roboczymi, było przedstawiane w pracach [1–3, 81, 83]. Sytuacja, kiedy sprzężenia te są stosowane w jednym kompleksie robót rozłącznie, wymaga jednak zastosowania algorytmów umożliwiających bezkolizyjną synchronizację robót [43, 49].

3.1. Synchronizacja robót budowlanych z zastosowaniem różnych metod organizacji w kompleksie

3.1.1. Podstawowe założenia

Dany jest zbiór frontów robót (działek budowlanych, obiektów)

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

na których należy wykonać ciąg procesów technologicznych, tworzących zbiór R

$$R = \{R_j, \quad j = 1, 2, \dots, m\}.$$

Procesy ze zbioru R należy wykonać w ustalonym porządku technologicznym

$$R_1 < R_2 < \dots < R_m.$$

Poszczególne procesy będą realizowane przez firmy budowlane (grupy robocze) tworzące zbiór B

$$B = \{B_j\}, \quad \text{gdzie } j = 1, \dots, m.$$

Grupy procesów technologicznych ze zbioru R będą wykonywane różnymi metodami robót, dla których opracowano, odpowiednio, macierze czasów trwania robót

$$T_1 = [t_{ij}],$$

$$T_2 = [t_{i,j+1}],$$

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

Zagadnienie to polega na takiej synchronizacji robót budowlanych, aby:

$$T \longrightarrow \min.$$

3.1.2. Schemat algorytmu

Problem powiązania kompleksów robót lub ich całości, formowanych różnymi metodami, rozwiązano dla minimalnoczasowego kryterium, służącego do zapewnienia najkrótszych przerw w pracy brygad roboczych w strefie połączenia części potoków.

Faza 1 – po ustaleniu częściowych potoków stanowiących strefę ich połączenia tworzymy zbiór najpóźniejszych terminów zakończenia robót na frontach, w ostatnim częściowym potoku, pierwszego potoku. Elementy danego zbioru tworzą ciąg wartości liczbowych w kolejności ustalonej w procesie szeregowania zadań

$$t^k = \{t_{1m}^{pz}, t_{2m}^{pz}, \dots, t_{nm}^{pz}\},$$

gdzie:

k – numer potoku,

t_{1m}^{pz} – najpóźniejszy termin zakończenia procesu na i -tym froncie,

n – liczba frontów roboczych,

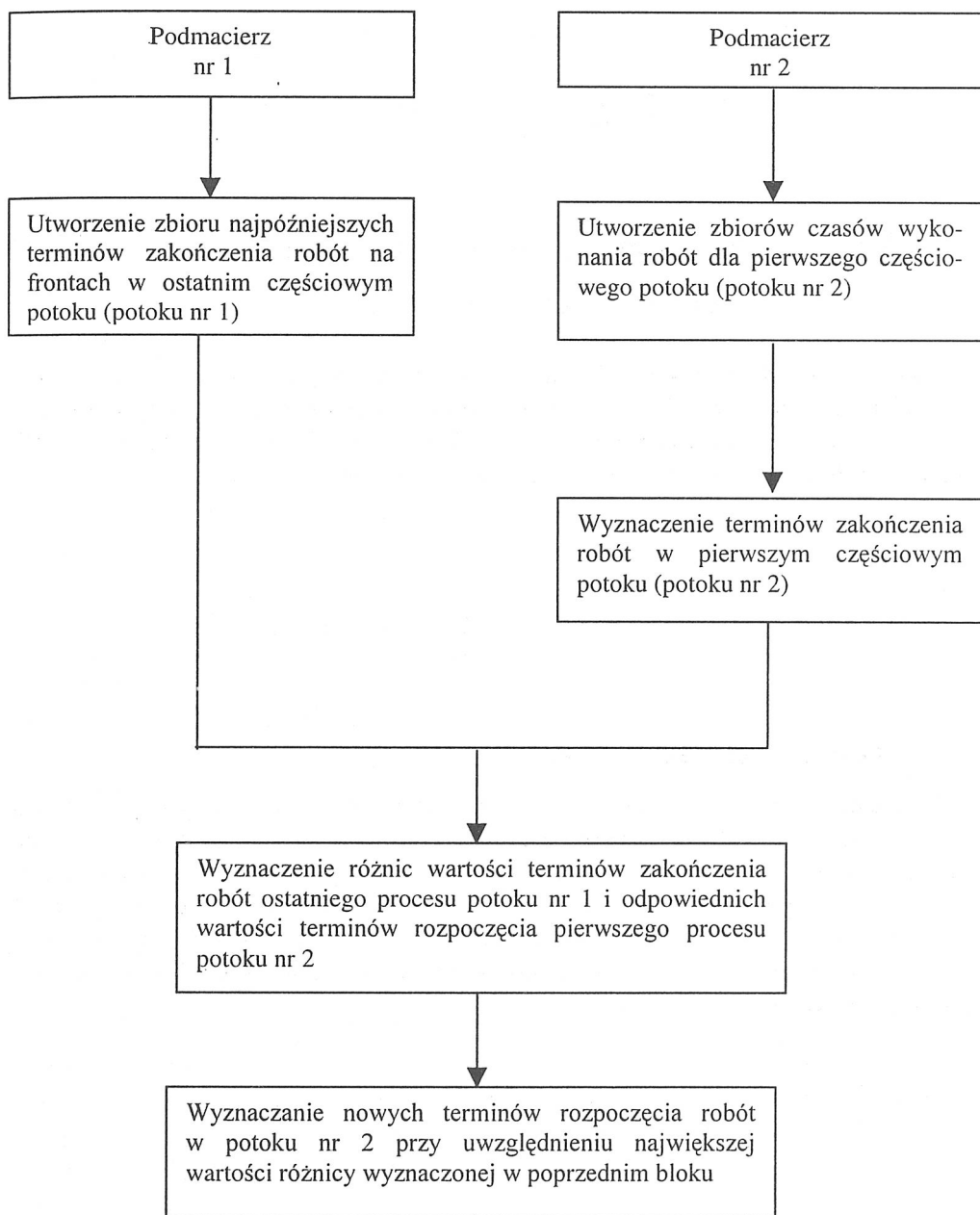
m – ostatni proces potoku k .

Następnie, z elementów kolumny macierzy odpowiadającej pierwszemu częściowemu potokowi drugiego potoku, tworzymy zbiór przewidywanych czasów wykonania robót, w ustalonej wcześniej kolejności

$$t^{k+1} = \{t_{1,m+1}, t_{2,m+1}, \dots, t_{i,m+1}, t_{n,m+1}\}$$

Po ustaleniu kolejności wykonywania robót na działkach (obiektach) najczęściej stwierdzamy, że ich kolejność w obu potokach jest różna. Zachodzi konieczność równoczesnego uwzględnienia metody organizacji robót oraz ustalonych kolejności realizowanych obiektów w potokach. Zapewniają to następne kroki algorytmu.

Faza 2 – wyznaczamy terminy zakończenia robót w pierwszym częściowym potoku drugiego potoku, z uwzględnieniem robót je poprzedzających. Tworzymy zbiór terminów zakończenia robót na odpowiednich w kolejności obiektach. Różnice wartości terminów zakończenia robót ostatniego częściowego procesu (częściowego potoku) pierwszego potoku oraz odpowiednich wartości terminów rozpoczęcia pierwszego częściowego procesu (pierwszego częściowego potoku) drugiego potoku tworzą zbiór minimalnych niezbędnych przerw w pracy brygad, w celu zapewnienia ich bezkolizyjnej pracy (eliminacji zająknięcia)



Rys. 3.1. Schemat algorytmu synchronizacji kompleksów robót (lub ich części) formowanych różnymi metodami organizacji robót

Fig. 3.1 Scheme of the algorithm for synchronization of work complexes (or their parts) formed by the various methods of work organization

$$U = \{U_1, \dots, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n\}$$

$$U_i = t_{im}^{pz} - \sum_{k=1}^p t_{i,m+1}, \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, p$$

oraz

$$p = i - 1,$$

gdzie $\sum_{i=1}^p t_{i,m+1}$ – suma czasów wykonania robót na poprzedzających działkach (obiektach) w ustalonym porządku.

Faza 3 – po ustaleniu niezbędnych wartości przerw w pracy brygad na odpowiednich działkach (obiektach) U_i wyznaczamy skorygowane terminy rozpoczęcia robót na odpowiednich frontach, przyjmując maksymalną wartość liczbową ze zbioru U_i . Dla pierwszej roboty pierwszego częściowego potoku drugiego potoku:

$$t_{1,m+1}^{wr} = U_i,$$

$$t_{i,m+1}^{wr} = U_i + \sum_{k=1}^p t_{i,m+1}.$$

Przykład zastosowania algorytmu

Sporządzono macierz czasów wykonania robót na frontach T , którym odpowiadają budynki mieszkalne. Roboty budowlane scalone, tworząc osiem częściowych procesów (częściowych potoków), tj. zdjęcie humusu, roboty ziemne, fundamentowanie, montaż, uzupełnienie, roboty tynkarskie, roboty murarskie, wykonanie podłóg i posadzek. Macierz opracowano dla zespołu budynków osiedla mieszkaniowego we Wrocławiu, na podstawie obowiązujących normatywów oraz z uwzględnieniem zasobów przedsiębiorstwa wykonawczego

$T =$	2	7	5	54	12	13	15	13
	5	20	15	141	34	37	35	38
	2	7	5	54	12	13	15	13
	5	20	15	141	34	37	25	18

Realizację pierwszych czterech częściowych procesów zaplanowano metodą potokowej organizacji robót, z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, pozostałych natomiast metodą z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

W wyniku obliczeń na komputerze otrzymano podmacierze z nową kolejnością realizowanych budynków

$$\mathbf{T}_1 = \begin{vmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 \\ 5 & 20 & 15 & 141 \\ 5 & 20 & 15 & 141 \\ 2 & 7 & 5 & 54 \end{vmatrix} \quad \mathbf{T}_2 = \begin{vmatrix} 24 & 37 & 35 & 38 \\ 12 & 13 & 15 & 13 \\ 12 & 13 & 15 & 13 \\ 24 & 37 & 35 & 38 \end{vmatrix}$$

Po przyjęciu jako wejściowych kolejność wierszy macierzy $\mathbf{T}$, w wyniku optymalizacji otrzymano nową kolejność realizacji budynków: dla macierzy $\mathbf{T}_1$ – 1, 2, 4, 3, dla macierzy $\mathbf{T}_2$ – 2, 1, 3, 4.

Faza 1 – ciąg wartości terminów zakończenia robót

$$t^1 = [88, 229, 370, 424],$$

ciąg przewidywanych czasów wykonania robót pierwszego procesu drugiego potoku

$$t^2 = [34, 12, 12, 34].$$

Faza 2

Ustalona kolejność realizacji obiektów	t_{im}^{pz}	Ustalona kolejność realizacji obiektu	$t_{i,m+1}$	Pomocnicze terminy rozpoczęcia robót dla kolejności	U_i
1	88	2	34	$1 \div 34$	54
2	229	1	12	$2 \div 0$	229
4	370	3	12	$4 \div 24 + 12 + 12$	312
3	424	4	34	$3 \div 34 + 12$	378

$$U_{i,\max} = 378.$$

Faza 3 – wyznaczenie terminów rozpoczęcia i zakończenia robót w pierwszym częściowym kompleksie

Ustalona kolejność realizacji obiektu	$t_{i,m+1}^{wr}$	$t_{i,m+1}^{wz}$
2	$378 + 0 = 378$	$378 + 34 = 412$
1	$378 + 34 = 412$	$412 + 12 = 424$
3	$378 + 34 + 12 = 424$	$424 + 12 = 436$
4	$378 + 34 + 12 + 12 = 436$	$436 + 34 = 470$

3.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych i zerowych odwrotnych diagonalnych

W obszarze metod organizacji zapewniających realizację robót budowlanych, kolejno (metody kolejnego wykonania) oraz w sposób równoległy (metody równo-

ległego wykonania) znajduje się zbiór możliwości tworzenia wariantów pośrednich. Możliwość oddziaływania wymienionych sprzężeń czasowych oraz ich kombinacji wyznacza nowe sposoby synchronizacji robót budowlanych. Pozwala na rozszerzenie możliwości organizacyjnych i stworzenie nowych narzędzi harmonogramowania robót.

Po uwzględnieniu oddziaływania zerowych sprzężeń diagonalnych oraz sprzężeń przekątnych, wyrażających zależności technologiczne związane z tym samym rodzajem robót, pojawia się nowy jakościowo sposób organizacji robót budowlanych. Przemieszczając roboty na danym froncie, o 1, 2, do $n-2$, zbliżamy zależności organizacyjne do właściwości metody kolejnego wykonania. Można zauważyć, że przemieszczenia te mogą dotyczyć zarówno robót wykonywanych na frontach, jak i frontów w stosunku do rodzajów robót.

Dzięki uwzględnieniu oddziaływania sprzężeń przekątnych dokonujemy przemieszczenia robót w macierzy czasów trwania robót, tworząc sytuacje, kiedy należy uwzględnić realizację robót na różnych frontach sąsiednich obiektów. Sprzężenia między środkami realizacji, mające w macierzy kierunek pionowy, przechodzą w kierunek ukośny, prowadząc do tworzenia się w skrajnym przypadku łańcuchów robót jednego rodzaju.

Budując macierz czasów trwania robót, w której w wierszach umieszczamy wartości związane z frontami roboczymi, możemy utworzyć szereg wariantów.

Wariant 1 – najwcześniejsze terminy:

$$t_{ij}^{wr} = \max \{t_{i-1,j+1}^{wr}, t_{i-1,j-1}^{wz}\} \quad (3.1)$$

oraz

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

tj.

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

Wykonywane na sąsiednich obiektach roboty jednego rodzaju mogą być realizowane szeregowo w zależności od ustalonych warunków

$$t_{i-1,j-1} < t_{ij} < t_{i+1,j+1}.$$

Definicje

$$\bigwedge_{x \in W}, \bigvee_{x \subset W} f(z_1) = x \vee f(z_2) = x \Leftrightarrow,$$

$$z_2 < z_1 > z_3 \vee Z < z_2 > z_3 z_2,$$

$$x = \{z_1, z_2\}.$$

Możliwości:

$$1) z_2 \leq z_1 \Rightarrow z_1 = X, \quad \text{czyli } t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{ij}^{wr},$$

$$2) z_1 < z_2 \Rightarrow z_2 = X, \quad \text{czyli } t_{i-1,j-1}^{wz} < t_{ij}^{wr}.$$

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

Wzór (3.1) wyraża zależność wstępującą między robotami w diagonalach macierzy, z uwzględnieniem oddziaływania sprzężeń przekątnych wiążących roboty jednego rodzaju, przemieszczone szeregowo na froncie roboczym.

Wariant 2 – najwcześniejsze terminy

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (3.2)$$

oraz

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

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

Wzór (3.2) określa zależność pomiędzy zakończeniem roboty poprzedzającej i następującej na dwóch różnych obiektach budowlanych. Zakłada się ponadto, że roboty jednego rodzaju będą wykonywane kolejno po sobie, tworząc ciąg robót o charakterze szeregowym (metoda kolejnego wykonania). Przemieszczenie robót jednego rodzaju na froncie zmienia charakter oddziaływania sprzężeń diagonalnych, wiążąc ponadto roboty jednego rodzaju, tj. robota $j-1$, robota j , robota $j+1$ dotyczą robót w jednej technologii na różnych obiektach.

Definicja

$$\bigwedge_{u \in W} \bigvee_{c \in W} f(z_1) = u \vee f(z_2) = u \Leftrightarrow z_1 \geq z_2,$$

gdzie $C = \{z_1, z_2\}$.

Możliwości:

- 1) $z_1 \geq z_2 \Rightarrow z_1 = u$, czyli $t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j-1}^{wz}$ i $S^D = 0$,
- 2) $z_2 > z_1 \Rightarrow z_2 = x$, czyli $t_{i-1,j-1}^{wz} < t_{ij}^{wr}$ i $S^P > 0$.

Wariant 3 – najwcześniejsze terminy

$$t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wr} \quad (3.3)$$

oraz

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

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

Definicja

$$\bigwedge_{x \in W} \bigvee_{E \subset W} f(z_1) = x \vee f(z_2) = x \Leftrightarrow z_1 \geq z_2$$

gdzie $E = \{z_1, z_2\}$.

Możliwości:

- 1) $z_1 \geq z_2 \Rightarrow z_1 = x$, czyli $t_{i-1,j+1}^{wr} = t_{ij}^{wz}$, $S^P = 0$,
- 2) $z_2 < z_1 \Rightarrow z_2 = x$, czyli $t_{i-1,j-1}^{wz} = t_{ij}^{wz}$, $S^P > 0$.

Wzór (3.3) wyznacza zależność diagonalną pomiędzy robotami różnych rodzajów na różnych frontach roboczych, zapewniając powiązania nie dla bezpośrednio występujących po sobie robót, lecz oddalonych (następnych w kolejności). Zostaje zapewniony jednocześnie warunek sekwencji robót jednego rodzaju, lecz z uwzględnieniem jego przemieszczenia. Jest to występująca niekiedy sytuacja zależności organizacyjnych, technologicznych, kiedy na obiektach budowlanych pojawiają się roboty obejmujące ich części. Sytuację taką można odwzorować za pomocą sprzężeń przekątnych i diagonalnych, nakładając na nie wartości większe lub równe zero.

Wariant 4 – najwcześniejsze terminy

$$t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (3.4)$$

oraz

$$t_{ij}^{wz} > t_{i-1,j-1}^{wz}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{z \in W} \bigvee_{Z \subset W} f(z_1) = a \vee f(z_2) = b \Leftrightarrow z_1 \geq z_2,$$

gdzie $E = \{z_1, z_2\}$.

Możliwości:

- 1) $z_1 \geq z_2 \Rightarrow z_1 = a$, czyli $t_{i-1,j+1}^{wz} = t_{ij}^{wz}$, $S^P = 0$,
- 2) $z_2 < z_1 \Rightarrow z_2 = b$, czyli $t_{i-1,j-1}^{wz} < t_{ij}^{wz}$, $S^P > 0$.

We wzorze (3.4) uwzględniono przedstawione powyżej ograniczenie, lecz powiązane ze sobą roboty, uzależniając najwcześniejsze terminy ich zakończenia. Zależność diagonalna umożliwi równoczesne zakończenie różnych rodzajów robót na sąsiednich frontach, przy czym dotyczy to robót, które nie występują kolejno po sobie, lecz następujących po nich.

Sprzężenia przekątne zapewniają powiązanie robót jednego rodzaju realizowanych sekwencyjnie na sąsiednich frontach roboczych.

Wariant 5 – najpóźniejsze terminy

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad (3.5)$$

oraz

$$t_{ij}^{pr} > t_{i-1,j-1}^{pr}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{x \in W} \bigvee_{A \subset W} f(x_1) = a \vee f(x_2) = b \Leftrightarrow x_1 \geq x_2,$$

gdzie $A = \{x_1, x_2\}$.

Możliwości:

- 1) $x_1 \geq x_2 \Rightarrow x_1 = a$, czyli $t_{i-1,j+1}^{pr} = t_{ij}^{pr}$, $S^D = 0$,
- 2) $x_2 < x_1 \Rightarrow x_2 = b$, czyli $t_{i-1,j-1}^{pr} < t_{ij}^{pr}$, $S^P > 0$.

Wzór (3.5) zapewnia uwzględnienie diagonalnych sprzężeń zerowych, wiążących ze sobą roboty zapisane w diagonalach macierzy. Zależność ta zapewnia powiązanie technologiczne robót różnego rodzaju. Dotyczy to robót, które występują bezpośrednio po sobie. Sprzężenia przekątne gwarantują realizację robót jednego rodzaju, prowadzonych kolejno na sąsiednich frontach roboczych.

Wariant 6 – najpóźniejsze terminy

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad (3.6)$$

oraz

$$t_{ij}^{pz} > t_{i-1,j-1}^{pz}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{u \in PU \subset P} \bigvee f(u_1) = u \vee f(u_2) = u \Leftrightarrow u_1 \geq u_2,$$

gdzie $U = \{u_1, u_2\}$.

Możliwości:

- 1) $u_1 \geq u_2 \Rightarrow u_1 = u$, czyli $t_{ij}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz}$, $S^D = 0$,
- 2) $u_2 < u_1 \Rightarrow u_2 = u$, czyli $t_{i-1,j-1}^{pz} > t_{ij}^{pz}$, $S^P > 0$.

Wzór (3.6) wiąże ze sobą roboty znajdujące się w diagonalach macierzy, zapewniając jednocześnie zakończenie robót różnego rodzaju na różnych frontach roboczych. Warunek ten zapewnia powiązanie robót, które występują po sobie w ciągu technologicznym. Sprzężenia przekątne gwarantują realizację robót jednego rodzaju na sąsiednich frontach. Wariant ten uwzględnia ograniczenia technologiczne i organizacyjne, jak w poprzednich przypadkach, lecz wiąże ze sobą najpóźniejsze terminy zakończenia robót.

Algorytm harmonogramowania robót budowlanych

Podstawowe założenia

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci zbioru obiektów

$$O = \{O_i, i = 1, 2, \dots, n\},$$

które mają być zrealizowane przez grupy robocze (firmy budowlane)

$$B = \{B_p, p = 1, 2, \dots, p\},$$

Na każdym obiekcie mają być zrealizowane procesy technologiczne

$$P_i = \langle P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im} \rangle.$$

Należy je zrealizować w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu $P_{i,k-1}$, a przed $P_{i,k+1}$.

Na proces realizacji obiektów budowlanych zostały nałożone następujące warunki:

1. Grupy robocze (firmy budowlane) przechodzą z obiektu na obiekt w ustalonej kolejności.

2. Procesy budowlane powinny być wykonane kolejno.

3. Wartość sprzężeń diagonalnych powinna być równa zeru.

4. Rozpoczęcie procesu P_{ik} na danym obiekcie O_i jest możliwe po zakończeniu na nim procesu $P_{i,k-1}$.

Zagadnienie polega na ustaleniu takiej wartości charakterystyk czasowych, aby wyeliminować kolizje technologiczne oraz zapewnić najkrótszy czas realizacji

$$T \rightarrow \min.$$

Schemat algorytmu

Budowa modelu organizacyjnego, w którym należy określić podstawowe charakterystyki czasowe robót przebiega według dalej przedstawionych zasad. Bazą umożliwiającą wykonanie obliczeń jest macierz czasów trwania robót budowlanych.

Etap 1 – ustalamy diagonalę macierzy, z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych i diagonalnych. Wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w kolejnych

diagonalach, w których roboty występują pojedynczo. Dotyczy to wszystkich robót na pierwszym froncie roboczym.

Etap 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia robót w diagonalę, gdzie pojawiają się następne roboty według zależności

$$t_{2,j}^{wr} = t_{1,j}^{wz},$$

a następnie

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

oraz

$$t_{2,j}^{wz} = t_{2,j+1}^{wr}.$$

Ustalamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót na drugim froncie roboczym.

Etap 3 – ustalamy początek robót w diagonalę, gdzie występują podwójne roboty i przeprowadzamy procedurę wyznaczania terminów rozpoczęcia i zakończenia dla pozostałych robót na obiekcie.

Etap 4 do n – w podobny sposób wyznaczamy charakterystyki czasowe dla robót znajdujących się na kolejnych obiektach, do chwili ustalenia wszystkich wartości.

Przykład zastosowania algorytmu

Sporządzono macierz czasów trwania robót dla czterech obiektów budowlanych. Zbiór robót wytypowanych do wykonania obejmuje: naprawę tynków wewnętrznych, zewnętrznych, malowanie, naprawę elewacji. Czasy zapisano w macierzy **T**

$$T = \begin{vmatrix} 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 12 & 3 & 11 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{vmatrix}$$

W wyniku zastosowanego algorytmu obliczono charakterystyki czasowe robót budowlanych.

Tabela 3.1. Charakterystyki czasowe robót budowlanych

Obiekty	Diagonały												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I	0	9	15	22									
	9	6	7	4									
	9	15	22	29									
II			29	36	30	40	50						
			7	4	0	0	4						
			36	40	50	50	54						
III							54	66	75	86			
							12	9	11	6			
							66	75	86	93			
IV										92	98	102	107
										6	4	5	3
										98	102	107	110

Liczby w polach oznaczają kolejno:

- termin rozpoczęcia roboty,
- czas jej trwania,
- termin zakończenia roboty.

4. Metody organizacji robót budowlanych o szeregowo-potokowej strukturze wewnętrznej

Zastosowanie sprzężeń przekątnych oraz diagonalnych w modelach organizacyjnych umożliwia tworzenie grupy metod o właściwościach charakterystycznych dla metod potokowych (etap rozwinięcia potoku, pełnego przebiegu i jego zanikania) oraz metod kolejnego wykonania (realizacja grup robót występujących sekwencyjnie). Możemy wyodrębnić grupę metod organizacji robót budowlanych o strukturze szeregowo-potokowej. Przemieszczając roboty na danym froncie (w wierszu macierzy czasów trwania robót), możemy spowodować, w skrajnym przypadku, sytuację, że będą one występować kolejno (sekwencyjnie). Położenie robót w wierszach macierzy poprzedzającej przedstawiony przypadek utworzy strukturę charakterystyczną dla metod szeregowo-potokowych.

Zasadniczą właściwością charakteryzującą tę grupę metod organizacji robót budowlanych jest oddziaływanie sprzężeń przekątnych na roboty różnego rodzaju. Ponadto, nałożone sprzężenia diagonalne o wartości zera zapewniają zależność kolejnych technologicznie robót w ustalonej sekwencji.

4.1. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych wiążących roboty różnych rodzajów

Budując macierz czasów trwania robót w układzie RP, na osi rzędnych umieszczamy rodzaje robót (procesy technologiczne) i uzyskujemy nowy sposób oddziaływania sprzężeń czasowych. Sprzężenia przekątne w macierzy wiążą roboty na sąsiednich frontach roboczych. Są odpowiednikami sprzężeń między frontami roboczymi, najbardziej charakterystycznym sprzężeniem czasowym dla klasycznych potokowych metod organizacji robót [1–4, 81, 83].

Sprzężenia przekątne wiążą ze sobą roboty budowlane, zapewniając sekwencje robót różnego rodzaju wykonywanych kolejno na poszczególnych frontach roboczych.

Sprzężenia diagonalne, które nakładamy na roboty, wyznaczając im wartość zera, wiążą daną i poprzedzającą robotę w porządku technologicznym, na danym i następnym froncie roboczym.

Tego typu warunki określają nowy rodzaj powiązań między robotami (o charakterze technologicznym), zapewniający prawidłowy technologicznie ciąg robót różnego rodzaju. Z uwagi na to, że możliwe są różne sposoby oddziaływania sprzężeń czasowych na najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, istnieje zbiór wariantów metod organizacji robót budowlanych uwzględniający wymienione rodzaje sprzężeń czasowych.

Wariant 1 – najwcześniejsze terminy

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

oraz

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

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

Definicja

$$\bigwedge_{x \in W} \bigvee_{X \subset W} f(x_1) = a \vee f(x_2) = b \Leftrightarrow x_1 \geq x_2,$$

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

Możliwości:

- 1) $x_1 \geq x_2 \Rightarrow x_1 = a$, czyli $t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr}$, $S^P = 0$,
- 2) $x_2 < x_1 \Rightarrow x_2 = b$, czyli $t_{ij}^{wr} > t_{i-1,j-1}^{wr}$, $S^P > 0$.

Wzór (4.1) zapewnia jednoczesne rozpoczęcie robót kolejnych technologicznie j , $j-1$ na sąsiednich frontach roboczych i , $i+1$. Zależność ta zachowuje relacje robót różnego rodzaju na frontach roboczych.

Wariant 2 – najwcześniejsze terminy

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

oraz

$$t_{ij}^{wz} > t_{i-1,j-1}^{wz}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{y \in P} \bigvee_{Y \subset P} f(y_1) = a \vee f(y_2) = b \Leftrightarrow y_1 \geq y_2,$$

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

Możliwości:

- 1) $y_1 \geq y_2 \Rightarrow y_1 = a$, czyli $t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j-1}^{wz}$,
- 2) $y_2 < y_1 \Rightarrow y_2 = b$, czyli $t_{ij}^{wz} > t_{i-1,j-1}^{wz}$.

Wzór (4.2) zapewnia warunek jednoczesnego zakończenia robót różnych rodzajów na kolejnych frontach roboczych. Ponadto zachowana zostaje zależność technologiczna, zapewniająca sekwencję robót różnych rodzajów na danym froncie roboczym.

Wariant 3 – najwcześniejsze terminy

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

oraz

$$t_{ij}^{wr} > t_{i-1,j-1}^{wz}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{u \in P} \bigvee_{R \subset P} f(y_1) = a \vee f(y_2) = b \Leftrightarrow y_1 \geq y_2,$$

gdzie $R = \{y_1, y_2\}$.

Możliwości:

- 1) $y_1 \geq y_2 \Rightarrow y_1 = a$, czyli $t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz}$, $S^P = 0$,
- 2) $y_2 < y_1 \Rightarrow y_2 = b$, czyli $t_{ij}^{wr} > t_{i-1,j-1}^{wz}$, $S^P > 0$.

Wzór (4.3) wyraża przedstawione ograniczenia. Różnica polega na uwzględnieniu odpowiednich charakterystyk czasowych robót budowlanych, które są powiązane

sprężeniami diagonalnymi o wartości zera, sprężeniami przekątnymi – zapewniającymi realizację robót różnych rodzajów (zgodnie z sekwencją technologiczną) na frontach roboczych.

Wariant 4 – najwcześniejsze terminy

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

oraz

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

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

Definicja

$$\bigwedge_{z \in W} \bigvee_{Z \subset W} f(z_1) = a \vee f(z_2) = b \Leftrightarrow z_1 \geq z_2,$$

gdzie $Z = \{z_1, z_2\}$.

Możliwości:

- 1) $z_1 \geq z_2 \Rightarrow z_1 = a$, czyli $t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz}$, $S^D = 0$,
- 2) $z_2 < z_1 \Rightarrow z_2 = b$, czyli $t_{ij}^{wr} > t_{i-1,j-1}^{wr}$, $S^P > 0$.

Wzór (4.4) zachowuje zerowe sprężenia diagonalne wiążące najwcześniejsze terminy zakończenia robót na sąsiednich frontach roboczych. Warunek sekwencyjności robót różnego rodzaju na frontach zostaje zapewniony przez zastosowanie sprężzeń przekątnych.

Wariant 5 – najpóźniejsze terminy

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} \quad (4.5)$$

oraz

$$t_{ij}^{pr} > t_{i-1,j-1}^{pr}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{u \in P} \bigvee_{V \subset P} f(u_1) = a \vee f(u_2) = b \Leftrightarrow u_1 \geq u_2,$$

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

Możliwości:

- 1) $u_1 \geq u_2 \Rightarrow u_1 = a$, czyli $t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr}$, $S^D = 0$,
- 2) $u_2 < u_1 \Rightarrow u_2 = b$, czyli $t_{ij}^{pr} > t_{i-1,j-1}^{pr}$, $S^P > 0$.

Wzór (4.5) wiąże ze sobą roboty budowlane na frontach roboczych w określony powyżej sposób, uwzględnia jedynie odpowiednie charakterystyki czasowe, tj. najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót. Nałożony został podstawowy warunek w postaci zerowych sprzężeń diagonalnych, natomiast sprzężenia przekątne nakładają kolejność realizacji robót różnych rodzajów, lecz ich wartość jest większa od zera.

Wariant 6 – najpóźniejsze terminy

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} \quad (4.6)$$

oraz

$$t_{ij}^{pz} > t_{i-1,j-1}^{pz}$$

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

Definicja

$$\bigwedge_{u \in P} \bigvee_{U \subset P} f(u_1) = a \vee f(u_2) = b \Leftrightarrow u_1 \geq u_2,$$

gdzie $U = \{u_1, u_2\}$.

Możliwości:

- 1) $u_1 \geq u_2 \Rightarrow u_1 = a$, czyli $t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz}$, $S^D = 0$,
- 2) $u_2 < u_1 \Rightarrow u_2 = b$, czyli $t_{ij}^{pz} > t_{i-1,j-1}^{pz}$, $S^P > 0$.

Wzór (4.6) odwzorowuje przyjęte ograniczenia technologiczne nałożone na realizowane roboty budowlane, zapewniając uwzględnienie najpóźniejszych terminów zakończenia robót.

4.2. Metoda organizacji robót budowlanych ze sprzężeniami przekątnymi i zerowymi sprzężeniami diagonalnymi

Podstawowe założenia

Dane jest zadanie inwestycyjne w postaci zbioru obiektów (frontów robót)

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

które mają być wykonane przez brygady robocze (firmy budowlane)

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_p\}.$$

Na każdym obiekcie należy zrealizować ciąg procesów

$$P_i = \langle P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_m} \rangle.$$

Procesy budowlane mają być zrealizowane w zadanym porządku technologicznym, tzn. każdy proces P_{ik} może być wykonany po zakończeniu procesu $P_{i,k-1}$, a przed procesem $P_{i,k+1}$.

Na proces wykonawczy nałożone zostały następujące wymagania:

1. Brygady robocze (firmy budowlane) przechodzą z obiektu na obiekt w sposób ciągły.

2. Procesy budowlane powinny być wykonane kolejno, na odcinkach O_i , tj. sprzężenia diagonalne łączą terminy zakończenia danego procesu P_j na danym obiekcie O_i z terminem rozpoczęcia następnego P_{j+1} na obiekcie O_{i-1} .

3. Wartość sprzężeń diagonalnych w modelowanym potoku powinna osiągnąć wartość zera.

4. Rozpoczęcie procesu P_{ik} na danym obiekcie O_i jest możliwe po zakończeniu na nim procesu $P_{i,k-1}$.

Zagadnienie polega na ustaleniu takiej kolejności realizowania robót, aby

$$L_{\min} = \max_i |T_{im} - D_i|,$$

gdzie:

D_i – dyrektywny termin realizacji,

T_{im} – termin zakończenia procesu P_m na obiekcie i ,

$L_{\min}$ – minimalny termin realizacji.

Schemat algorytmu

Budowa modelu organizacyjnego, w którym uwzględniono oddziaływanie sprzężeń przekątnych i zerowych sprzężeń diagonalnych, przebiega według przedstawionego schematu. Podstawą umożliwiającą wykonanie obliczeń jest macierz czasów realizacji robót budowlanych.

Faza 1 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w pierwszym i drugim diagonalu macierzy **T**.

Faza 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w trzecim diagonalu. Termin rozpoczęcia trzeciej roboty na pierwszym obiekcie (indeksy macierzy 1, 3) jest równy terminowi zakończenia roboty poprzedzającej na tym obiekcie (indeksy 1, 2). Pozostałe roboty wyznaczamy z warunków:

$$t_{1,2}^{wr} = t_{1,1}^{wz}, \quad t_{1,2}^{wz} = t_{1,2}^{wr} t_{1,2},$$

$$t_{1,3}^{wr} = t_{1,2}^{wz}, \quad t_{1,3}^{wz} = t_{1,3}^{wr} + t_{1,3}.$$

Terminy rozpoczęcia robót w trzecim diagonalu

$$t_{2,2}^{wr} = t_{1,3}^{wz}, \quad t_{2,2}^{wz} = t_{2,2}^{wr} + t_{2,2}.$$

Faza 3 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót w czwartym diagonalu. Rozpoczynamy wyznaczanie charakterystyk czasowych od drugiej roboty (2, 2) na drugim obiekcie, mając wyznaczoną w fazie 2 wartość $t_{2,2}^{wz}$, obliczamy $t_{1,4}^{wz}$. Następnie odejmujemy wartość liczbową czasu trwania roboty $t_{1,4}$

$$t_{1,4}^{wr} = t_{1,4}^{wz} - t_{1,4}.$$

Jeżeli

$$t_{1,4}^{wr} < t_{1,3}^{wz},$$

korygujemy wartość $t_{1,4}^{wz}$ o różnicę

$$t_{1,3}^{wz} - t_{1,4}^{wr} = a,$$

a następnie wyznaczamy nowe wartości charakterystyk czasowych robót w kolejnym diagonalu.

Korekta jest spowodowana koniecznością zachowania warunku bezkolizyjnej pracy firm budowlanych (brygad roboczych) na obiektach.

Zgodnie z podanym schematem postępujemy do chwili wyczerpania się zbioru diagonalów.

Zastosowanie sprzężeń diagonalnych nakłada na roboty warunek kolejnego rozpoczęcia i zakończenia robót w diagonalach, tj. $S^P = 0$. Sprzężenie przekątne zapewniają

przemieszczenie robót w wierszach macierzy i zachowanie warunku sekwencyjnego prowadzenia robót jednego rodzaju na sąsiednich frontach (indeksy w macierzy $i-1, j, j+1$).

Przykład zastosowania algorytmu

Przygotowano macierz czasów trwania robót (odnowienie powłok malarskich) dla czterech budynków mieszkalnych. Zbiór robót wytypowanych podczas przeglądu obiektów obejmuje naprawę tynków wewnętrznych, zewnętrznych, malowanie, naprawę elewacji. Czasy zapisano w macierzy

$$T = \begin{vmatrix} 9 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 4 & 10 & 4 \\ 12 & 9 & 1 & 6 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{vmatrix}$$

W wyniku zastosowanego algorytmu wyznaczono charakterystyki czasowe robót budowlanych.

Tabela 4.1. Charakterystyki czasowe robót budowlanych

Obiekty	Diagonały									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0	9	15	25						
	9	6	7	4						
	9	15	22	29						
II			22	29	33	52				
			7	4	10	4				
			29	33	44	56				
III					44	56	65	76		
					12	9	11	6		
					56	65	76	82		
IV							76	82	86	91
							6	4	5	3
							82	86	91	94

Cyfry w polach oznaczają kolejno:

- termin rozpoczęcia roboty,
- czas jej trwania,
- termin zakończenia roboty.

5. Metody organizacji robót budowlanych o równoległej strukturze wewnętrznej

Zgodnie z klasyfikacją metod organizacji robót budowlanych [1–3, 81] podczas równoległego wykonywania robót jednego rodzaju na różnych frontach otrzymujemy metodę równoległego wykonania. Można jednak, z uwagi na możliwość tworzenia grup robót wykonywanych równoległe i niezależnie, wyszczególnić trzy odmiany:

- bez uwzględnienia jednoczesności wykonywania robót różnego rodzaju,
- z jednoczesnym prowadzeniem części robót różnego rodzaju,
- z jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju.

Oddziaływanie sprzężeń czasowych – sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi, a szczególnie zerowych sprzężeń diagonalnych (i odwrotnych) – na roboty budowlane umożliwia formowanie ich równoległej struktury wewnętrznej. Zagadnienie powiązania ze sobą kompleksów robót realizowanych różnymi metodami organizacji jest podstawowym problemem z praktyki wykonawczej.

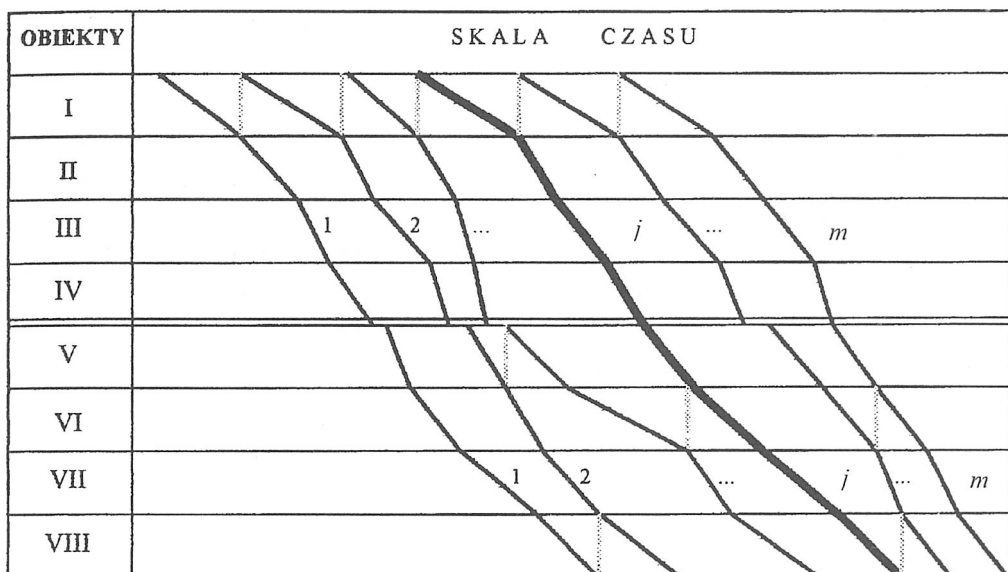
W procesie planowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych pojawiają się problemy harmonizacji robót z uwzględnieniem pewnych ograniczeń technologicznych i organizacyjnych. Powszechnym ograniczeniem jest na przykład konieczność uwzględnienia ciągłości pracy maszyny wiodącej (np. żurawia wieżowego), mającym wpływ na potokowy charakter procesów budowlanych.

Modelując potok o strukturze równoległej możemy wyróżnić następujące przypadki:

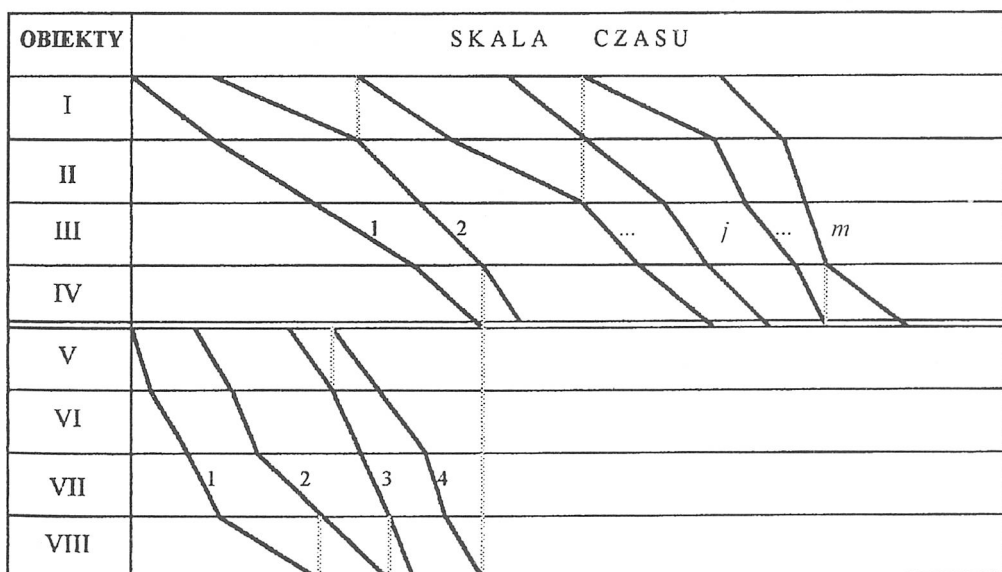
- zagadnienie modelowania potoku z zachowaniem ciągłości procesów wiodących,
- zagadnienie synchronizacji przy wzajemnej organizacyjnej zależności kompleksów robót.

Pierwszy z wymienionych problemów opracowany został w pracy [50], drugi natomiast jest przedstawiony w niniejszym rozdziale.

Zagadnienie to pojawiło się podczas planowania realizacji kompleksu obiektów budownictwa przemysłowego. Ilustracją tego zagadnienia może być przykład praktyczny, w którym trzy zespoły obiektów były realizowane z udziałem dwóch żurawi wieżowych, poruszających się po jednym torowisku. Dwa obiekty powinny być realizowane równoległe, przy czym zakończenie drugiego powinno nastąpić w ściśle określonym czasie, uzależnionym od wykonania robót montażowych na pierwszym obiekcie. Wynikało to z konieczności przejazdu żurawia wieżowego z drugiego obiektu do trzeciego zespołu obiektów. Problem ten pojawił się na skutek ograniczonej wielkości miejsca realizacji robót (zakład w ruchu), tj. możliwości usytuowania jednego torowiska, oraz dostępności środków (przedsiębiorstwo dysponuje dwoma żurawiami wieżowymi).



Rys. 5.1. Kompleks robót o strukturze równoległej z zachowaniem ciągłości procesów wiodących
 Fig. 5.1. Work complex of parallel structure preserving continuity of leading processes



Rys. 5.2. Kompleks robót o strukturze równoległej
 z uwzględnieniem wzajemnej organizacyjnej zależności grup robót
 Fig. 5.2. Work complex of parallel structure, with mutual organization dependence
 between groups being taken into account

5.1. Harmonogramowanie równoległych kompleksów robót

Ogólne sformułowanie problemu

Zagadnienie synchronizacji równoległych kompleksów przy ich organizacyjnej zależności polega na określeniu takiego przydziału grup roboczych (firm) wraz z ich technicznym wyposażeniem, aby zminimalizować łączny czas wykonania kompleksu, przy spełnieniu ograniczeń:

- każdy proces może być realizowany przez specjalizowaną brygadę (firmę),
- na froncie roboczym nie może być wykonywany jednocześnie więcej niż jeden proces,

• muszą być spełnione ograniczenia zasobowe.

Należy znaleźć wartości zmiennych:

$$t_z, \quad t_j^x, \quad t_j^y, \quad j = N_k \quad \text{oraz} \quad u_j^k, \quad j \in N_k,$$

które minimalizują funkcję celu $t_z \rightarrow \min$,
gdzie:

t_z – czas zakończenia wszystkich robót,

t_j^z – czas rozpoczęcia j -tej roboty, $j \in M$,

t_j^y – czas zakończenia j -tej roboty, $j \in N$,

c_j – czas wykonania j -tej roboty $c_j > 0$,

u_j^k – ilość zasobów (liczba brygad roboczych) przydzielona do wykonania roboty j ,

Należy uwzględnić ograniczenia:

$$t_j^y - t_j^x \geq \Sigma c_j,$$

$$t_j^x \geq t_j^y,$$

$$t_j^x \geq t_0,$$

t_0 – czas rozpoczęcia robót ($t_0 = 0$),

$$t_z \geq t_i^y, \quad i \in N,$$

$$t_0, t_2, t_j^x, t_j^y \geq 0, \quad j \in N,$$

$$C_{jw} = f_j^k(u_j^k), \quad j \in N_k,$$

f_j^k – funkcja ilości środków,

$$\alpha_j^k \leq u_j^k \leq \beta_j^k, \quad j = N_k, \quad k \in Q_1.$$

Do wykonania określonego procesu należy dysponować grupą roboczą składającą się z α_j^k pracowników, nie więcej jednak niż β_j^k .

Ponadto, należy tak dobrać ilość środków realizacji w modelowanym równoległym potoku P_{k+1} , aby kompleks robót wykonać w zadanym terminie

$$T_{k+1} \rightarrow T_k,$$

T_{k+1} – termin wykonania kompleksu robót w równoległym potoku $k+1$,

T_k – termin wykonania grupy robót potoku k .

Schemat rozwiązywania zagadnienia

Jest to problem dotyczący sterowania procesem realizacji obiektów budowlanych. Racjonalne sterowanie polega na określeniu terminów rozpoczęcia t_j^x oraz zakończenia t_j^y robót. Wielkością sterującą jest wektor, którego składowe określają czasy trwania robót c_{jw} , kolejność ich wykonania, przydział brygad roboczych u_j^k . Racjonalne sterowanie w omawianym przypadku będzie miało charakter zamknięty, dotyczyć bowiem będzie modelowania kompleksu robót przed momentem ich rozpoczęcia. Polegało będzie ono na doborze środków realizacji (brygad z ich wyposażeniem) i zadań, aby zrealizować kompleks obiektów potoku P_{k+1} w zależności od terminu realizacji częściowego potoku z kompleksu P_k .

Procedura sterowania procesem realizacji może mieć następujący przebieg (w ogólnym zarysie).

Etap 1 – sprawdzenie, czy czas wykonania kompleksu t_z^{k+1} odpowiada planowanemu k_j^k dla zadanych ograniczeń. Jeżeli $t_z^{k+1} \leq t_z^k$, to przejść do kroku 4.

Etap 2 – ustalić wektor sterowania uwzględniający nowe warunki realizacji robót (czasy trwania pozostałych robót), dodatkowo niezbędne środki realizacji.

Etap 3 – realizacja algorytmów optymalizacyjnych modelowania minimalnoczasowego potoków i sprawdzenie warunku ich zależności równoległej, tj. czy $t_z^{k+1} \leq t_{zj}^k$.

Etap 4 – opracować charakterystyki czasowe modelowania potoku.

Etap 5 – zakończyć proces sterowania.

Jest to problem optymalizacji dyskretniej, polegający na utworzeniu zbioru sterowań dopuszczalnych. Wynikają one z wielkości zbioru zasobów u . Tworzony jest więc zbiór modeli realizacyjnych kompleksu, przez zmianę elementów wektora sterowania

$$\bigwedge_{j \in M} \bigwedge_{i \in M} [X_{ij}(t) = f[U_{ij}^1(t), U_{ij}^2(t), \dots, U_{ij}^q(t)]]$$

gdzie:

$X_{ij}(t)$ – stan j -tej roboty na i -tym obiekcie w chwili t ,

$U_{ij}(t)$ – ilość środków realizacji przydzielona do wykonania roboty j na obiekcie i .

Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia jest dość złożone ze względu na to, że należy każdorazowo dokonać harmonizacji potoku, tzn. uwzględnić występujące ograniczenia technologiczne i organizacyjne, zachowując przy tym jego strukturę.

Algorytm harmonizacji

Etap 1 – dokonać harmonizacji potoku P_k , ustalić racjonalną kolejność realizacji obiektów i metodę organizacji robót.

Etap 2 – wyznaczyć terminy t_j^x rozpoczęcia robót pierwszego częściowego potoku P_k .

Etap 3 – dokonać harmonizacji potoku P_{k+1} , ustalić racjonalną kolejność realizacji obiektów oraz metodę organizacji robót.

Etap 4 – sprawdzić, czy $t_{k+1}^y \leq t_k^y$, jeżeli nie, to przejść do kroku 5, jeżeli tak, to przejść do kroku 7.

Etap 5 – dokonać korekty elementów macierzy wejściowej, zwiększając ilość środków realizacji (brygad roboczych), skracając czasy wykonania poszczególnych robót na obiektach.

Etap 6 – sprawdzić warunek według zależności analizowanej w kroku 4.

Etap 7 – wyznaczyć charakterystyki czasowe złożonych potoków.

Harmonizowanie równoległych kompleksów robót, z uwzględnieniem przyjętych ograniczeń, wymaga szeregu iteracji, pozwalających znaleźć poszukiwane rozwiązanie. Dobór środków odbywa się w sposób dyskretny, bowiem funkcja rozdziału jest nieciągła, skokowa.

W praktyce pozwala to na całkowite zbadanie zbioru sterowań. O efekcie decyduje w zasadzie ilość środków zgromadzonych na drodze krytycznej, tzn. należy znaleźć min t_z , przy ograniczeniach:

$$\Sigma Y_j(t) f_j(U_j) \leq t_z,$$

$$U_j \leq U^k,$$

$$t_u \geq 0,$$

gdzie y_j – zmienna binarna

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{– gdy łuk o obciążeniu } C_j, j = 1, 2, \dots, m, \\ 0 & \text{– w przeciwnym razie.} \end{cases}$$

Przedstawiono algorytm synchronizacji równoległych kompleksów robót przy ich wzajemnej organizacyjnej zależności. Zagadnienie to pojawia się dość często w praktyce budowlanej, podczas realizacji np. robót montażowych, w których bierze udział limitujący czynnik (np. żuraw wieżowy).

5.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych

5.2.1. Charakterystyka metody

Uwzględniając oddziaływanie sprzężeń diagonalnych i odwrotnych do nich na grupę robót związanych zależnościami technologicznymi, możemy je synchronizować, zapewniając równoległe ich wykonanie. Dotyczy to zależności pomiędzy najwcześniejszymi i najpóźniejszymi terminami rozpoczęcia i zakończenia robót.

W metodzie tej [8, 81, 83] roboty jednego stopnia tworzą diagonalę, których czas trwania jest równy czasom trwania robót krytycznych. Choć w diagonalę może występować kilka robót krytycznych (z jednakowym czasem trwania), to określając czas trwania kompleksu robót bierze się pod uwagę tylko jedną robotę krytyczną.

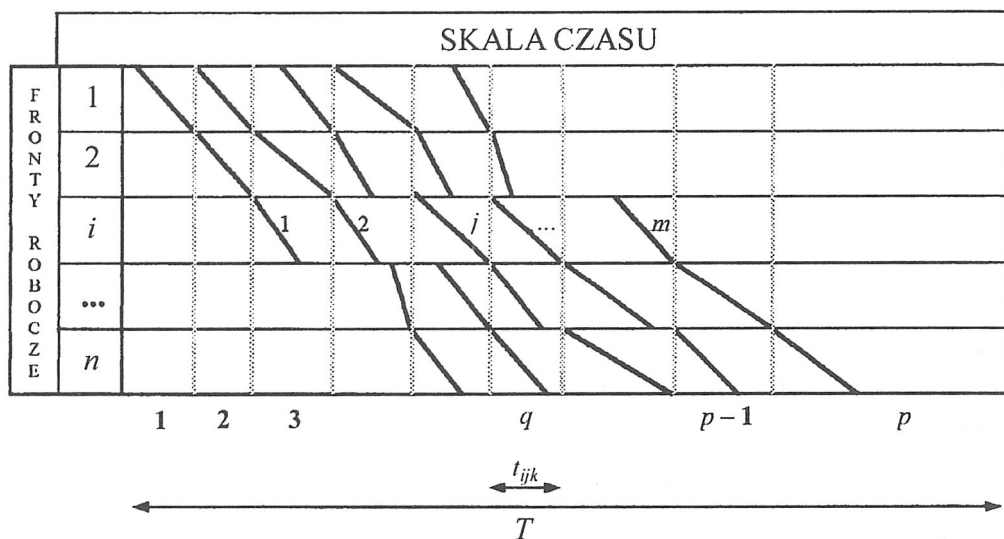
Po wprowadzeniu oznaczeń pokazanych na rysunku 5.3 możemy czas trwania wykonania kompleksu robót przedstawić w postaci

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

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. Pozwalają one na nakładanie warunku równoległości dotyczącego poszczególnych robót budowlanych. Uwzględniając wzajemne zależności pomiędzy momentami rozpoczęcia i zakończenia we wczesnych i późnych terminach, możemy wyróżnić metodę organizacji robót budowlanych, wraz z jej wariantami, charakteryzującą się jednoczesnym oddziaływaniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych.



Rys. 5.3. Cyklogram z robotami krytycznymi wyznaczonymi przy uwzględnieniu sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych
 Fig. 5.3. Cyclogram with critical works determined on the basis of diagonal and reverse diagonal couplings

W rozwiązywanym zagadnieniu można wyodrębnić trzy zasadnicze etapy. W etapie pierwszym (tab. 5.1) buduje się pierwszą serię pośrednich macierzy, w których ustala się kolejno wszystkie wiersze wyjściowej macierzy w miejsce pierwszego wiersza. 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 5.1. Etap I – macierz z ustalonymi kolejno wierszami w miejsce pierwszego wiersza

Fronty robocze	U	Rodzaje robót							
		1	2	...	j	...	...	m-1	m
	t _{k,1}	t _{k,2}	ETAP I	wiersz	ustalony	(U)	t _{k,m-1}	t _{k,m}	
	2	t _{2,1}	t _{2,2}				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. 5.2) buduje się serie macierzy, w zależności od liczby wierszy wyjściowej macierzy ustala się 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 wykazanych jako perspektywiczne na pierwszych etapach i kolejno poprzedzających fazach. Następny wiersz, po ustalonych jako perspektywiczne, 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 (GMM) określone na drugim etapie będą większe lub równe GMM otrzymanym na poprzednim etapie, to od tego momentu musi się również i te gałęzie z poprzedniego etapu uważać za perspektywiczne. Dopiero gdy rozpatrzymy wszystkie konkurencyjne macierze, wskazując, które gałęzie drzewa wariantów należy rozwijać, możemy przejść do ostatniego etapu rozwiązania.

Tabela 5.2. Etap II – macierz budowana w fazach pośrednich

		Rodzaje robót							
		1	2	...	j	...	...	$m-1$	m
Fronty robocze	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.

Trzeci etap rozwiązania nie wprowadza macierzy pośrednich, a formowane macierze są wariantami finalnymi macierzy, 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 na poprzednich etapach rozwiązania jako perspektywiczne. W jednej gałęzi dendrytu rozwiniętej do końca mamy tylko dwie możliwe kombinacje. Liczba macierzy finalnych, które należy rozwiązać, jest 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, ogólnych rezerw czasu oraz minimalnego czasu realizacji całego kompleksu.

Przyjmując oznaczenia podane w macierzy (tab. 5.2), możemy wymienione wielkości wyznaczyć z następujących zależności:

1. 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 przy wyznaczaniu najwcześniejszych terminów rozpoczęcia robót j frontu 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 następującym częściowym potoku i równocześnie w bezpośrednio poprzedzającym częściowym kompleksie frontu $i-1$ robót $j+1$. Najwcześniejsze terminy zakończenia robót j frontu i wyznacza się przez zsumowanie najwcześniejszych terminów rozpoczęcia tych robót oraz czasów trwania ich realizacji.

2. Najpóźniejsze terminy zakończenia robót j frontu i wyznacza się z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych od robót w bezpośrednio poprzedzającym częściowym kompleksie i równocześnie w bezpośrednio następującym częściowym potoku frontu $i-1$ roboty $j+1$ oraz odwrotnych sprzężeń diagonalnych od robót w bezpośrednio następującym częściowym kompleksie i równocześnie w bezpośrednio poprzedzającym częściowym potoku frontu $i+1$ roboty $j-1$

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

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

3. Sprężenia między środkami realizacji dla najwcześniejszych terminów wyznacza się jako różnicę pomiędzy najwcześniejszymi terminami zakończenia robót poprzedzających dane roboty j frontu $i-1$, w częściowym potoku i najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia danych robót j frontu i

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

4. Podobnie, sprężenia między frontami dla najwcześniejszych terminów wyznacza się jako różnicę między najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia danych robót j frontu i oraz najwcześniejszymi terminami zakończenia robót poprzedzających je w częściowym kompleksie frontu i roboty $j-1$

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

5. Dla najpóźniejszych terminów sprzężenia między środkami realizacji wyznacza się z zależności

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

6. Podobnie, sprężenia między frontami roboczymi dla najpóźniejszych terminów wykonania robót wyznacza się ze wzoru

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

7. Ogólne rezerwy czasu stanowią różnicę pomiędzy najpóźniejszymi i najwcześniejszymi terminami rozpoczęcia robót, a także pomiędzy najpóźniejszymi i najwcześniejszymi terminami zakończenia robót

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

5.2.2. Warianty metody

Analizując wzajemne oddziaływanie wymienionych sprzężeń czasowych, możemy zauważyć, że nakładają one na roboty znajdujące się wewnątrz kompleksu 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 kolejnych i równoległych.

Wariant 1 – łączący terminy rozpoczęcia robót w najwcześniejszych terminach

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} \quad (5.1)$$

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

Definicja

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

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

Wzór (5.1) nakłada praktyczny warunek wykonawczy, polegający na konieczności jednoczesnego rozpoczęcia kolejnych technologii 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 równoległe prowadzone. Na skutek oddziaływania zerowych sprzężeń są nimi ze sobą związane, tworząc grupę równoległe wykonywanych robót.

Wariant 2 – łączący terminy rozpoczęcia robót w najpóźniejszych terminach

$$t_{ii}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad (5.2)$$

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

Definicja

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

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

Wzór (5.2) zapewnia równoczesność „późnego rozpoczęcia” robót $j-1$, j oraz robót $j+1$. Są one realizowane sekwencyjnie i uzależnione od siebie porządkiem 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 terminy zakończenia robót w najwcześniejszych terminach

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

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

Definicja

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

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

Wzór (5.3) 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 organizacyj-

nie. Procesy technologiczne są uporządkowane sekwencyjnie, tj. $t_{j-1} \prec t_j \prec t_{j+1}$. Jest to przypadek praktyczny, występujący podczas realizacji różnych technologicznie robót na różnych obiektach lub ich częściach.

Wariant 4 – łączący terminy zakończenia robót w późnych terminach

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

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

Definicja

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

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

Wzór (5.4) 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, gdzie roboty te są prowadzone w ostatniej 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 o różnych technologiach, 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.

5.3. Harmonogramowanie równoległych grup robót budowlanych w kompleksie

Harmonogramowanie jest traktowane w dyscyplinach związanych z zarządzaniem produkcją jako zagadnienie kolejności lub inaczej jako szeregowanie zadań. Najprostsze realizowane modele stosowane w praktyce pomijają to zagadnienie. Wynika to często z ograniczeń technologicznych (typowa sekwencja robót budowlanych) lub dyrektywnych ustaleń inwestorów.

Algorytm harmonogramowania robót budowlanych z zastosowaniem elementów metod równoległo-potokowych [40, 41, 51] dotyczy zagadnienia równoległości grupy robót budowlanych w kompleksie, z uwzględnieniem różnych wielkości frontów robót. W procesie synchronizacji robót stosowano metody organizacji z uwzględnieniem sprzężeń czasowych [1–3, 81].

Podstawowe założenia

Dany jest zbiór obiektów budowlanych (frontów roboczych) F , planowanych do realizacji

$$F = \{F_i\},$$

gdzie $i = 1, \dots, N$,

na których należy wykonać ciąg procesów technologicznych tworzących zbiór R .

$$R = \{R_j\},$$

gdzie $j = 1, \dots, M$.

Procesy ze zbioru R należy wykonać w ustalonym początku technologicznym

$$R_1 < R_2 < \dots < R_M.$$

Poszczególne procesy będą realizowane przez specjalizowane brygady tworzące zbiór B

$$B = \{B_j\},$$

gdzie $j = 1, \dots, M$.

W zbiorze procesów B można wyróżnić procesy tworzące podzbiór R_1 , dla których, ze względów konstrukcyjno-technologiczno-organizacyjnych, frontem roboczym jest cały obiekt, oraz procesy tworzące podzbiór R_2 , dla których frontami roboczymi są mniejsze działki wydzielone na obiektach F_i .

Na etapie realizacji procesów ze zbioru R_2 każdy obiekt F_i jest zbiorem kilku działek roboczych d_f

$$R = R_1 + R_2,$$

$$R_1 = \{R_j\},$$

gdzie $j = 1, \dots, l$,

$$R_2 = \{R_j\},$$

gdzie $j = l + 1, \dots, M$,

$$F_i = \{d_f\},$$

gdzie $f = 1, \dots, g$.

Uwzględniając niejednorodny dla wszystkich realizowanych procesów podział kompleksu obiektów na fronty robocze, należy określić racjonalną kolejność prowadzenia robót, zapewniającą bezkolizyjną pracę brygad roboczych.

Algorytm macierzowego wyznaczania kolejności realizacji robót

Zaproponowano następujące rozwiązanie przedstawionego problemu:

1. Pionowy podział realizowanego kompleksu procesów R na grupy częściowych podprocesów R_1 i R_2 , realizowanych na jednorodnych frontach roboczych (obiektach i działkach).

2. Poziomy podział procesów ze zbioru R_2 na poszczególne fronty robocze F_i .

3. Ustalenie racjonalnej kolejności realizacji frontów roboczych w wydzielonych częściowych podkompleksach K i P_i , gdzie $i = 1, \dots, n$.

4. Wzajemna synchronizacja wydzielonych częściowych podkompleksów.

Na rysunku 5.4 przedstawiono schemat algorytmu podziału kompleksu robót na częściowe podkompleksy K i P_i , natomiast na rysunku 5.5 konstrukcję macierzy czasów trwania czynności, uwzględniającą podział kompleksu robót na częściowe podkompleksy.

Po ustaleniu racjonalnej kolejności realizacji frontów w podkompleksie K oraz racjonalnej kolejności realizacji działek roboczych w podkompleksach P_i należy dokonać ich wzajemnej synchronizacji. Przyjęto założenie, że podkompleksy P_i będą realizowane w kolejności odpowiadającej realizacji frontów w podkompleksie K .

Na rysunku 5.6 przedstawiono cyklogram dwóch wzajemnie zsynchronizowanych grup robót tworzących podzbiór R_2 realizowanych na sąsiednich frontach F_i i F_{i-1} . Okres rozwinięcia frontu F_i względem frontu F_{i-1} obliczono, posługując się okresami zanikania i rozwijania kolejnych robót na sąsiadujących ze sobą frontach

$$t_{i,j}^z = t_{i,j}^{pz} - t_{i,j-1}^{pz},$$

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

gdzie:

$t_{i,j}^z$ – okres zanikania procesu j względem $j-1$ na froncie i ,

$t_{i,j}^r$ – okres rozwijania procesu j względem $j-1$ na froncie i ,

$t_{i,j}^{pz}$ – późny termin zakończenia roboty j na froncie i ,

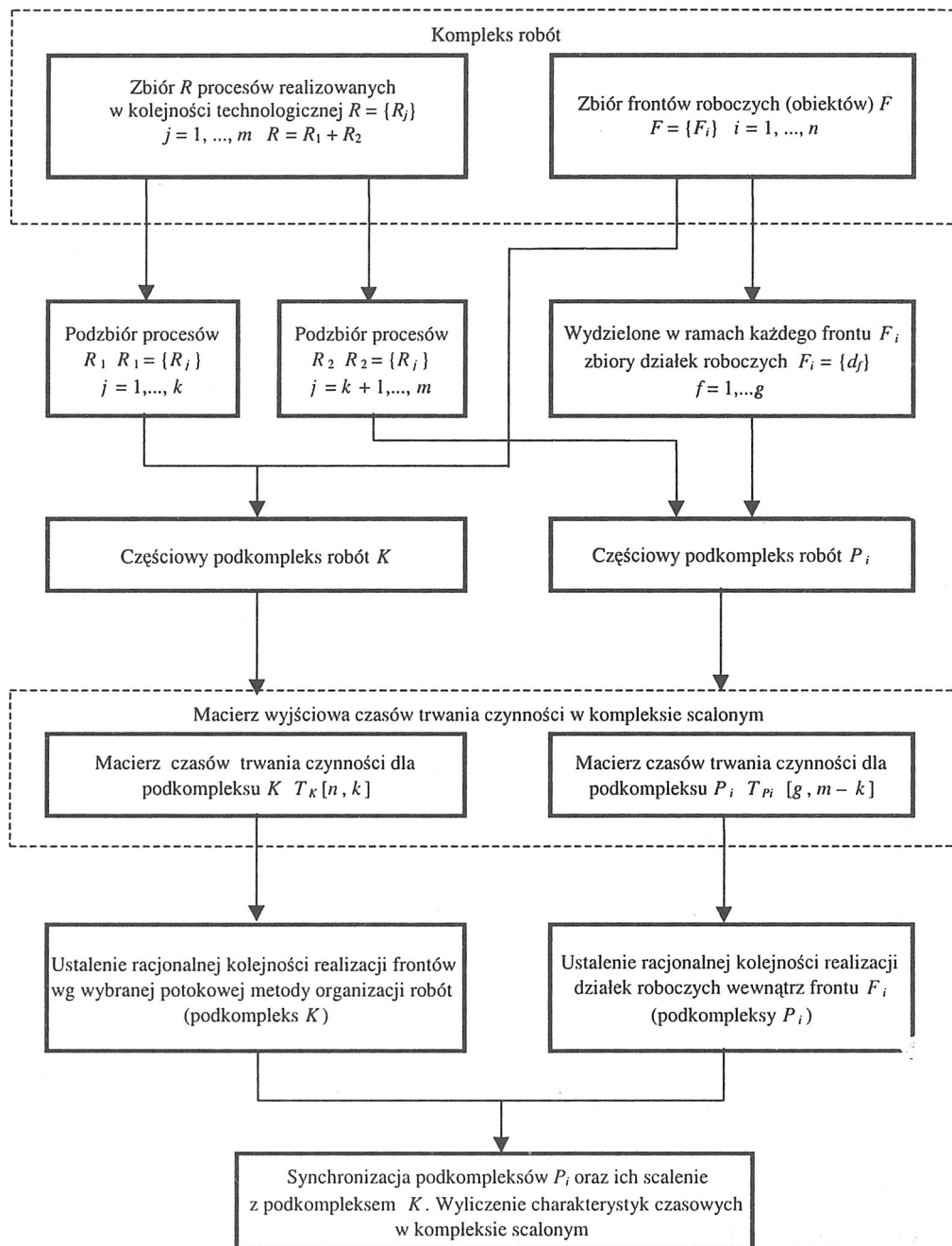
$t_{i,j}^{wr}$ – wczesny termin rozpoczęcia roboty j na froncie i .

$$T_i^r = \max_d \left[\sum_{j=1}^d t_{i-1,j}^z - \sum_{j=1}^d t_{i,j}^r : d = 1, 2, \dots, n \right],$$

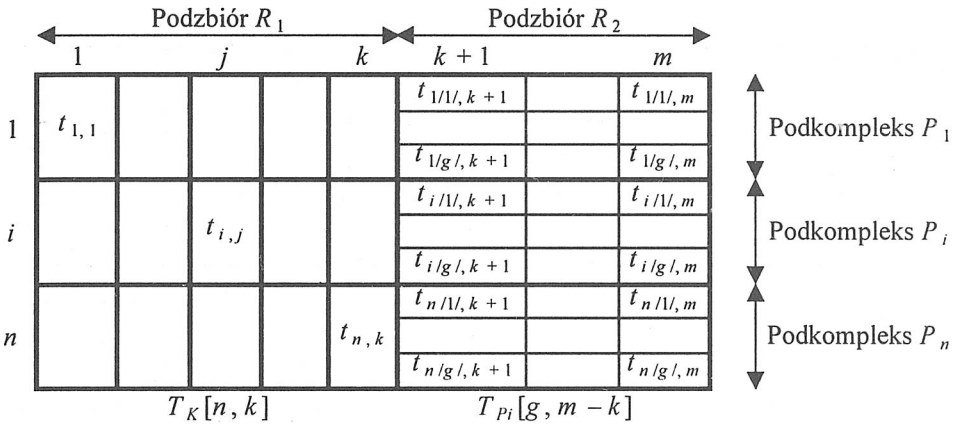
gdzie T_i^r – okres rozwinięcia frontu i względem frontu $i+1$,

Otrzymane wartości T_i^r są podstawą uaktualnienia charakterystyk czasowych robót ze zbioru R_2 realizowanych na frontach F_i (w kolejności jak dla podkompleksu K).

W celu powiązania scalonych podkompleksów P_i z podkompleksem K (rys. 5.4) należy obliczyć okres rozwinięcia potoku $k+1$ względem potoku k .



Rys. 5.4. Schemat algorytmu podziału kompleksu robót na częściowe podkompleksy
Fig. 5.4. Scheme of the algorithm for work complex division into partial subcomplexes



Rys. 5.5. Konstrukcja macierzy czasów trwania czynności
Fig. 5.5. Construction of the operation duration matrix

Wielkościami pomocniczymi są: późne i wczesne terminy rozpoczęcia i zakończenia robót na poszczególnych frontach w granicznych potokach k i $k+1$, okresy zanikania roboty k na poszczególnych frontach oraz okresy rozwijania roboty $k+1$ na poszczególnych frontach:

$$t_{i,k}^z = t_{i,k}^{pz} - t_{i-1,k}^{pz},$$

$$t_{i,k+1}^r = t_{i,k+1}^{wr} - t_{i-1,k+1}^{wr},$$

$$T_{k+1}^r = \max_d \left[\sum_{i=1}^d t_{i,k}^z - \sum_{i=1}^{d-1} t_{i,k+1}^r \right],$$

gdzie:

$d = 1, \dots, n$,

$t_{i,k}^{pz}$ – późny termin zakończenia roboty k na froncie i ,

$t_{i,k+1}^{wr}$ – wczesny termin rozpoczęcia roboty $k+1$ na froncie i ,

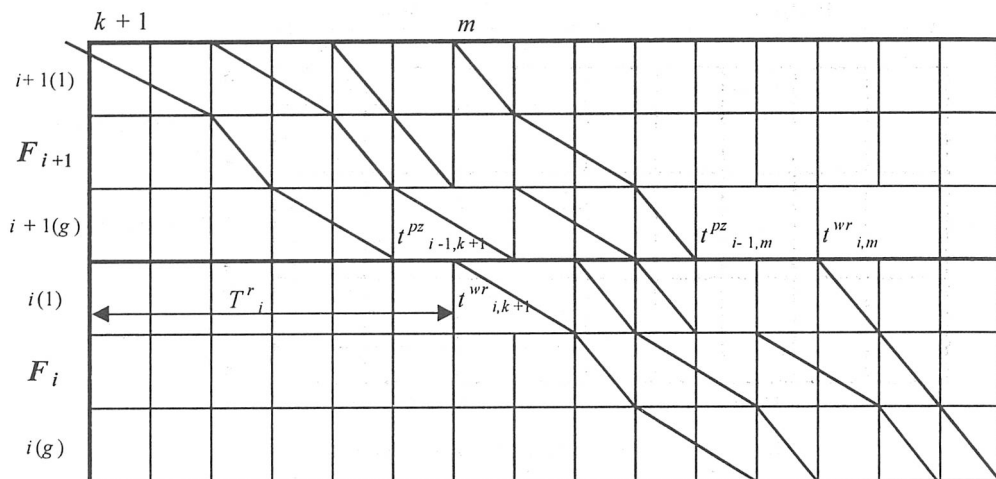
$t_{i,k}^z$ – okres zanikania roboty k na froncie i ,

$t_{i,k+1}^z$ – okres rozwijania roboty $k+1$ na froncie i ,

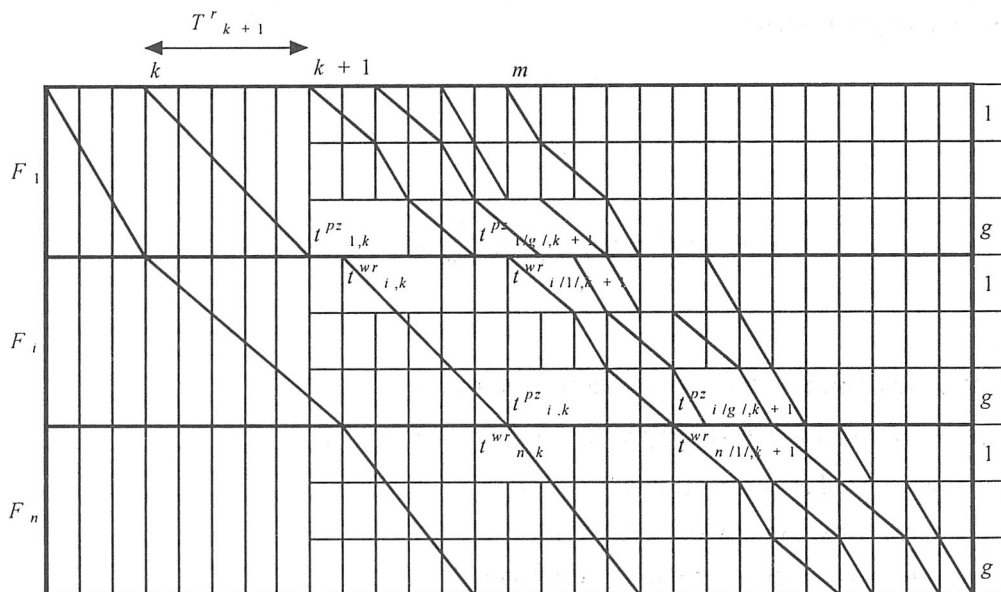
T_{k+1}^r – okres rozwinięcia potoku $k+1$ względem k .

Otrzymana wartość T_{k+1}^r jest podstawą uaktualnienia charakterystyk czasowych robót realizowanych w zbiorze R_2 .

Uwzględniając występujące w praktyce budowlanej ograniczenia technologiczne i organizacyjne, przedstawiono algorytm harmonogramowania robót, który zapewnia optymalizację minimalnoczasową. Dotyczy on zagadnienia planowania robót na różnych wielkościach frontów robót, z uwzględnieniem macierzowego zapisu danych. Pozwala



Rys. 5.6. Synchronizacja grup robót R_2 realizowanych na frontach F_{i-1} i F_i
 Fig. 5.6. Synchronization of the work groups R_2 carried out on fronts F_{i-1} and F_i



Rys. 5.7. Scalenie podzbioru robót R_2 z podzbiorem robót R_1
 Fig. 5.7. Integration of the subset of works R_2 with work subset R_1

na synchronizację robót różnego rodzaju, które mogą być realizowane na większej liczbie działek roboczych, powstałych z podziału frontu robót na mniejsze zadania, po wyeliminowaniu przerw (zapasu czasu) w ich wykorzystaniu [52].

6. Metody organizacji robót budowlanych o równoległo-potokowej strukturze wewnętrznej

Zgodnie z klasyfikacją metod organizacji robót budowlanych [1–3, 81, 83] można wyodrębnić grupę metod organizacji, charakteryzującą się właściwością polegającą na równoległym prowadzeniu robót jednego rodzaju (równoległych częściowych potoków w kompleksie). Podstawowym założeniem w metodach równoległo-potokowych jest zasada, że każda z firm (grup roboczych) porusza się po swoich działkach roboczych, po indywidualnej drodze, różnej od dróg przemieszczenia się innych. Zasada ta obejmuje zarówno jednakowe, jak i różne procesy technologiczne, wydzielone w fazie planowania realizacji obiektu budowlanego. Zagadnienie to zostało zasygnalizowane w pracy [50], a następnie kontynuowane [80].

Metody równoległo-potokowe są rozwinięciem podstawowych metod potokowych [1–3, 81, 83] stosowanych do planowania przebiegu robót budowlanych. Z uwzględnieniem występujących w praktyce ograniczeń technologicznych i organizacyjnych opracowano nowe metody organizacji robót, umożliwiające ich synchronizację oraz ustalenie kolejności wykonywania. Opracowano algorytmy szeregowania zadań, z przyjętym minimalnoczasowym kryterium optymalizacji.

W grupie potokowych metod organizacji wyróżnia się następujące metody równoległo-potokowe:

- metodę z ciągłym wykorzystaniem środków realizacji [40],
- metodę z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych [41],
- metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi [51],
- metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i sprzężeniami diagonalnymi,
- metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi, odwrotnych sprzężeń diagonalnych.

W pracy zaprezentowano założenia metody równoległo-potokowej z ciągłym wykorzystaniem środków realizacji oraz metody z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych. Zostały one również omówione w pracach [40, 41]. Przedstawienie tylko niektórych metod wynika z potrzeby nakreślenia obszaru oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty budowlane i kierunku możliwych dalszych badań.

6.1. Metoda organizacji równoległych robót jednego rodzaju

Poszukując rozwiązania zagadnienia przydziału frontów roboczych firmom budowlanym¹ (grupom roboczym), wykorzystano procedury iteracyjne, umożliwiające

¹ Z uwagi na uwzględnienie praktyki realizacyjnej przyjmuje się adekwatnie udział specjalistycznych lub ogólnobudowlanych firm wykonawczych lub brygad roboczych (grup roboczych) w procesie in-

w kolejnych krokach algorytmu badanie możliwych w praktyce zestawień front–brygada, z wyborem układu dającym najmniejszą wartość czasu realizacji robót na froncie. Zmiana intensywności wykonania robót na frontach, wywołana czynnikami losowymi, obniża poziom niezawodności modelu realizacyjnego. Uwzględnienie tego aspektu jest możliwe dzięki wprowadzeniu do modelu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa czasów realizacji robót, uzyskanych na podstawie badań statystycznych.

Czas wykonania robót T przez firmy budowlane (brygady jednej specjalności) na danym obiekcie lub kompleksie zależy od czasów wykonania robót na frontach obiektu przez poszczególne brygady, przy założeniu pracy jednej brygady (firmy) na jednym froncie

$$T = \max \left\langle t_{nj}^{pz(B_1)}, t_{nj}^{pz(B_2)}, \dots, t_{nj}^{pz(B_k)}, \dots, t_{nj}^{pz(B_s)} \right\rangle,$$

$k = 1, 2, \dots, s,$

gdzie $t_{nj}^{pz(B_k)}$ – najpóźniejszy termin zakończenia procesu j na froncie n przez brygadę (firmę) B_k ,

$$p_{nj}^{pz(B_k)} = \sum_{i=1}^n t_{ik}^{(B_k)} + t_{ij}^{wr(B_k)},$$

gdzie:

$\sum_{i=1}^n t_{ij}^{(B_k)}$ – suma czasów wykonania robót procesu j przez brygadę B_k na n frontach,

$t_{ij}^{wr(B_k)}$ – najwcześniejszy termin rozpoczęcia procesu j przez brygadę B_k na pierwszym $i = 1$ froncie.

Bazą umożliwiającą symulację układów front–brygada jest macierz wejściowa czasów trwania robót.

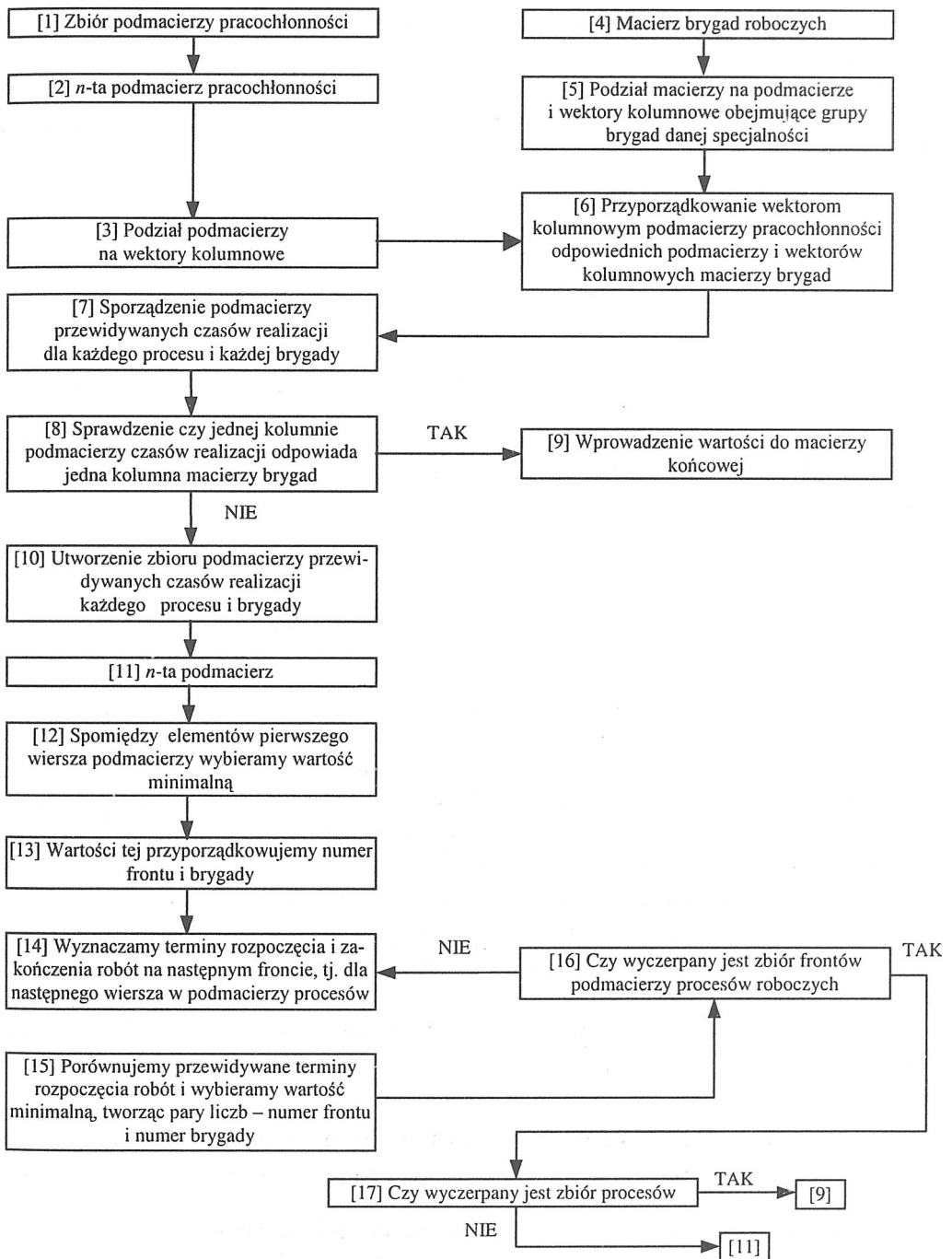
Etap 1 – spośród zbioru elementów pierwszego wiersza podmacierzy, obejmującej czasy wykonania robót pierwszego procesu, wybieramy wartość najmniejszą

$$\varphi_{\min} = \min_{i=1} \left\langle t_{ij}^{wz(B_1)}, t_{ij}^{wz(S_1)}, \dots, t_{ij}^{wz(B_k)}, \dots, t_{ij}^{wz(B_s)} \right\rangle.$$

Wartości tej odpowiada numer brygady wykonującej proces j oraz numer frontu roboczego

$$\varphi_{\min} = t_{ij}^{wz(B_k)} \rightarrow \langle 1, k \rangle.$$

występnym. W opisie mogą występować zamiennie pojęcia „brygady robocze”, firmy wykonawcze, „grupy robocze”.



Rys. 6.1. Schemat algorytmu planowania pracy grup roboczych
 Fig. 6.1. Scheme of the algorithm for planning the duties of work groups

Tworzymy równocześnie zbiór par (numer frontu i brygady), umożliwiający budowę harmonogramu.

Etap 2 – wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót danego procesu na drugim froncie, uwzględniając czas wykonania robót na pierwszym froncie przez ustaloną brygadę (firmę)

$$t_{2j}^{wr} = t_{ij}^{wz},$$

$$t_{2j}^{wr(B_1)} = t_{2j}^{wr(B_2)} = \dots = t_{2j}^{wr(S_s)} = 0,$$

$$t_{wj}^{wr(B_k)} = t_{1j}^{B_k}.$$

Następnie porównujemy przewidywane terminy rozpoczęcia robót na drugim froncie, wybierając wartość najmniejszą, której odpowiada termin rozpoczęcia roboty przez brygadę na danym froncie

$$\varphi_{\min} = \min_{i=2} \left\langle t_{2j}^{wr(B_1)}, t_{2j}^{wr(B_2)}, \dots, t_{2j}^{wr(B_k)}, \dots, t_{2j}^{wr(B_s)} \right\rangle,$$

$$\varphi_{\min} = t_{2j}^{wr(B_k)} \rightarrow \langle 2, k \rangle.$$

Etap 3, 4, ..., n – powtarzając procedurę jak w kroku 2, do chwili wyczerpania się zbioru frontów roboczych, przyporządkowujemy elementom zbioru brygad elementy zbioru frontów, zapewniając najkrótszy czas wykonania danego rodzaju robót.

W przypadku pozostałych zbiorów grup roboczych (firm wykonawczych), wykonujących kolejne procesy i zbiorów frontów roboczych, należy powtórzyć wszystkie operacje według przedstawionego algorytmu.

Prezentowany algorytm umożliwia planowanie pracy brygad roboczych w potoku formowanym metodą organizacji robót, z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, bez uwzględnienia zagadnienia kolejności. Transponując macierz wejściową i wykorzystując przedstawiony algorytm, można przydzielić brygadam fronty robocze metodą organizacji robót, z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi.

6.2. Planowanie ciągłej pracy grup roboczych w procesie realizacji kompleksu robót

Przystępując do wyznaczania terminów rozpoczęcia i zakończenia robót przez brygady (firmy), należy wyznaczyć w pierwszej kolejności terminy rozwinięcia częściowych potoków $t_{rj}^{B_k}$ lub $t_{ri}^{B_k}$, a następnie określić wartości pozostałych charakterystyk czasowych robót w częściowych potokach lub kompleksach.

Wartości $t_{rj}^{B_k}$ dla poszczególnych procesów i brygad można wyznaczyć z uwzględnieniem algorytmu przydziału frontów roboczych brygadam.

W metodzie potokowej organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji podczas wyznaczania okresu rozwinięcia danego częściowego potoku należy utworzyć zbiór frontów roboczych, na których są wykonywane roboty danego rodzaju przez daną brygadę. Następnie, korzystając z tabeli przydziału frontów, znajdujemy terminy zakończenia robót na tych frontach, w poprzedzającym procesie w ciągu technologicznym.

Na podstawie tych wartości możemy wyznaczyć okres rozwinięcia danego częściowego potoku

$$t_{rj}^{B_k} = \max_i \left\langle t_{i,j-1}^{pz(B_{k-1})} - \sum_{i=2}^{n-1} t_{ij}^{B_k} \right\rangle,$$

gdzie:

$t_{i,j-1}^{pz(B_{k-1})}$ – termin zakończenia roboty przez brygadę $k-1$ na froncie i w poprzedzającym procesie $j-1$,

$\sum_{i=2}^{n-1} t_{ij}^{B_k}$ – suma czasów wykonania robót przez brygadę k na przydzielonych frontach.

Postępowanie według tej procedury należy powtarzać do wyczerpania się zbioru brygad (firm). Terminy rozpoczęcia i zakończenia robót wyznaczamy z zależności

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{B_k} + \sum_{i=1}^n t_{i-1,j}^{B_k},$$

w której $\sum_{i=1}^n t_{i-1,j}^{B_k}$ – suma czasów wykonania robót procesu j przez brygadę k na frontach $i-1$,

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{wr} + t_{ij}^{B_k},$$

gdzie $t_{ij}^{B_k}$ – czas wykonania roboty procesu j na froncie i przez grupę wykonawczą (firmę wykonawczą).

W celu wyznaczania charakterystyk czasowych modelowanego potoku, w metodzie potokowej organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi można zastosować przedstawiony algorytm, z tym jednak zastrzeżeniem, że należy na wstępie transportować macierz-tabelę wyjściową. Algorytm ten zapewnia planowanie zatrudnienia firm wykonawczych (grup roboczych) bez uwzględnienia zagadnienia kolejności w modelu organizacyjnym.

Zastosowanie algorytmu do planowania realizacji kompleksu robót budowlanych

Planuje się realizację czterech obiektów budowlanych. Roboty budowlane scalono w cztery ciągi organizacyjne, uwzględniając jednorodny charakter procesów technologicznych. Realizacja pierwszego i czwartego rodzaju robót będzie się odbywać dwoma częściowymi, szczegółowymi potokami. Dane do planowania realizacji przedstawione są w tabeli-macierzy. Elementami macierzy są czasy wykonania robót na obiektach.

Tabela-macierz czasów wykonania robót

OBIEKTY	CZĘŚCIOWE POTOKI					
	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
1		0 20 20	20 32 52	52 9 61		61 11 72
2	42 10 52		52 20 72	72 7 79	79 12 91	
3		57 15 72	72 25 07	97 4 101		101 18 119
4	89 8 97		97 18 115	115 12 127	127 20 147	

Dla zadanej kolejności realizacji robót przewidywany czas wykonania wynosi 147 jednostek.

Etap I

	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
1		0 20 20	20 32 52	52 9 61		61 11 72
	42 10 52		51 20 72	72 7 79	79 12 91	
						72 18 90
					91 20 105	

GMM = 105

	1_1	1_2	2	3	4_1	4_2
1		0 20 20	20 32 52	52 9 61		61 11 72
	44 8 52		52 18 70	70 12 82	82 20 102	
						72 18 90
					102 12 114	

GMM = 114

	1_1	1_2	2	3	4_1	4_2
2	0 10 10		10 20 30	30 7 37	37 12 49	
		15 15 30	30 25 55	55 4 59		59 18 77
					49 20 69	
						77 11 88

GMM = 88

	1_1	1_2	2	3	4_1	4_2
3	0 10 10		10 20 30	30 7 37	37 12 49	
		10 20 30	30 32 62	62 9 71		71 11 82
					49 20 69	
						82 18 100

GMM = 100

	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
3		0 15 15	15 25 40	40 4 44		44 18 62
	32 8 40		40 18 58	58 12 70	70 20 162	
						62 11 73
					90 12 102	

GMM = 102

	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
3		0 15 15	15 25 40	40 4 44		44 18 62
	30 10 40		40 20 60	60 7 67	67 12 79	
						62 11 73
					79 20 99	

GMM = 99

	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
4	0 8 8		8 18 26	26 12 38	38 20 58	
		6 20 26	26 32 58	58 9 67		67 11 78
					58 12 70	
						78 18 96

GMM = 96

	l_1	l_2	2	3	4_1	4_2
4	0 8 8		8 18 26	26 12 38	38 20 58	
		11 15 26	26 25 51	51 4 55		55 18 73
					58 12 70	
						73 11 84

GMM = 84

Wyznaczając w podobny sposób wartości węzłów drzewa na niższych poziomach, znajdujemy kolejność obiektów, tj. 4–3–2–1. Czas realizacji zespołu obiektów został skrócony z 147 jednostek do 123.

7. Zastosowanie systemów komputerowych w metodach organizacji uwzględniających sprzężenia czasowe

Rozwiązywanie zagadnień związanych z planowaniem przebiegu robót budowlanych z zastosowaniem sprzężeń czasowych umożliwiają, opracowane z udziałem autora, systemy komputerowe. W ślad za rozwojem metod organizacji robót budowlanych, korzystających z różnych zestawień 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 racjonalna kolejność prowadzenia robót jest możliwa do ustalenia przez zmianę kolejności ich prowadzenia 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, jednakże są od nich mniej dokładne.

Założenia te były podstawą 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 dokonywanie obliczeń dla pięciu podstawowych metod organizacji ze sprzężeniami czasowymi. System ten zapewniał uwzględnienie problemu kolejności dla każdej z metod, na podstawie własnego algorytmu optymalizacyjnego, pod nazwami OPT1, OPT2 i OPT3. Obliczanie charakterystyk czasowych robót, tj. najwcześniejsze i najpóźniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia robót, wykonuje się za pomocą programów PRO1, PRO2, PRO3. Zbiór ten jest ze sobą związany, tworząc system OPTY.

Program ten był stosowany w praktyce podczas opracowywania wielu projektów organizacji robót budowlanych oraz w dydaktyce w ramach ćwiczeń projektowych.

Zastosowanie systemu komputerowego OPTY wymagało przygotowania danych wejściowych w postaci macierzy czasów trwania robót budowlanych na

działkach roboczych. Ich ustalenie wymagało prowadzenia 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, we wczesnych i późnych terminach robót. Były one podstawą do opracowania dokumentacji graficznej: cyklogramów i sieci zależności.

Szczegółowy opis programu, schematy blokowe oraz program źródłowy systemu OPTY, przedstawione zostały w rozprawie doktorskiej autora.

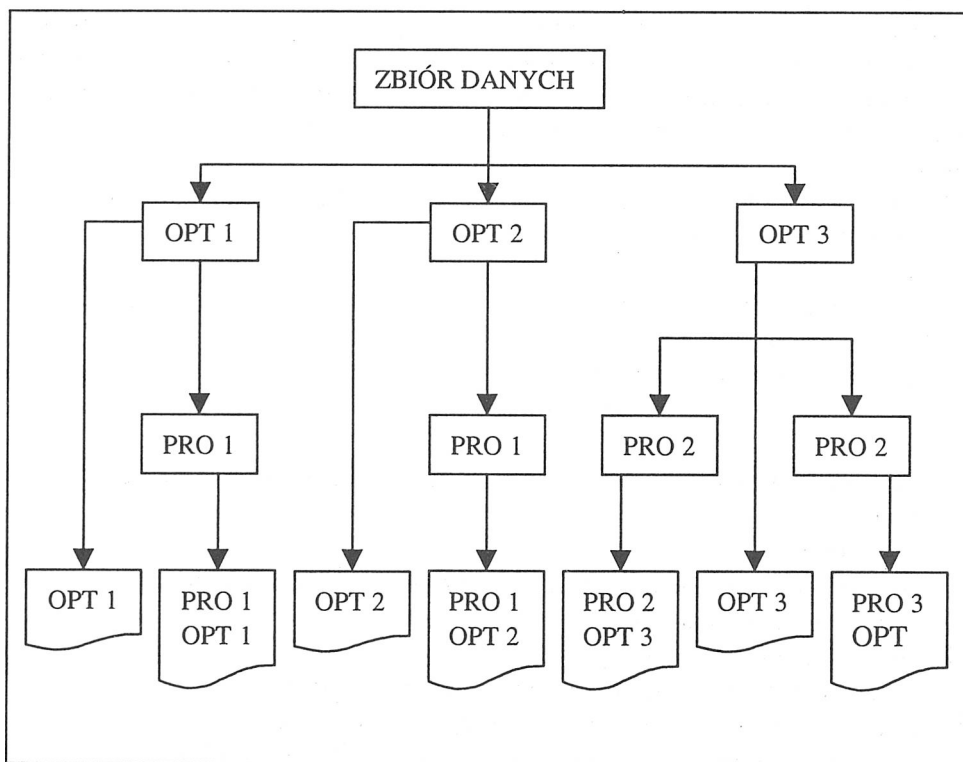
Dane wejściowe powinny zawierać:

- liczbę serii danych,
- liczbę wierszy i kolumn macierzy,
- macierze czasów wykonywania robót.

Na schematach blokowych występują następujące oznaczenia literowe:

N – liczba wierszy macierzy T ,
 M – liczba kolumn macierzy T ,
 $T(I, J)$ – element macierzy, czas trwania j -tej roboty na i -tym froncie,
 TRR – termin rozpoczęcia roboty,
 TZR – termin zakończenia roboty,
 $MIN(TZR)$ – minimalna wartość terminu zakończenia roboty,
 $MIN(TRR)$ – minimalna wartość terminu rozpoczęcia roboty,
 $J(T_1)$ – macierz kolumnowa utworzona z elementów kolumny J dla T_1 ,
 T_1 – macierz nr 1,
 T_2 – macierz nr 2,
 $J+1(T_2)$ – macierz kolumnowa utworzona z elementów kolumny $J+1$ dla T_2 ,
 $T(R)$ – macierz robocza,
 MW – macierz wskaźników,
 $U(I)$ – wartość pomocnicza,
 $MAX U$ – maksymalna wartość pomocnicza,
 $T_2(T_1)$ – wektor zanikania macierzy T_1 ,
 $TR(T_2)$ – wektor rozwinięcia macierzy T_2 ,
 $TRJ(T_2)$ – okres rozwinięcia częściowego procesu J macierzy T_2 ,
 MW – macierz wyjściowa,
 $TZ MW$ – wektory zanikania macierzy wejściowych MW ,
 $TR MW$ – wektory rozwinięcia macierzy wejściowych MW ,
 IZ – macierz indeksów zestawień,
 $T(A)$ – wskaźnik pomocniczy,
 $MIN T(A)$ – najmniejsza liczba w zbiorze wskaźników,
 IZ – indeksy zestawień,
 T – czas wykonywania robót w potoku.

Schemat systemu OPTY



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). Z uwagi na zróżnicowany zakres działań jednostek organizacyjnych (kierownictw grup robót) opracowano algorytm planowania pracy grup roboczych, umożliwiający racjonalny rozdział zadań dla każdego rodzaju robót (dekarско-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.

Dalej przedstawiono przykładowe okna ekranu z programu BRYGADY.

Okna z programu BRYGADY:

IDENTYFIKACJA BRYGAD	
Identyfikator brygady: 1	
Nazwisko brygadzysty: NASIONEK	
Norma: 100,0 [%]	
F1 – pomoc Następnym Poprzedni Aktualizacja Dopisz Usuń Koniec	

Brygady Przydzielanie Zestawienia Opcje Koniec	
Identyfikacja brygad remontowych	
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru F1 – pomoc F2 – instrukcja	

PRZYDZIELANIE ZADAŃ rec. 1/61	
Identyfikator zadania	1
Zleceniodawca	DZBM Stare Miasto
Lokalizacja	Skargi 7-11
Opis zadania	
Czas trwania realizacji (normatywny)	17 [dni]
Zajętość frontu 1	Data przydzielenia 88.04.01
Procent wykonania 0	Dzień rozpoczęcia 1 Data rozpoczęcia 88.04.01
Identyfikator brygady 16	Nazwisko brygadzysty Stadnicki Norma 100,0 [%] Czas wykonania zadania 17 [dni]
F1 – pomoc Następnym Poprzedni Aktualizacja Dopisz Usuń Opcje Koniec	

System komputerowy POTOKI

Kolejnym etapem w rozbudowie komputerowego wspomaganie projektowania procesu realizacji obiektów budowlanych z zastosowaniem 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.

Poniżej przedstawiono przykładowe okna z programu POTOKI.

Okna z programu POTOKI:

objaśnienia Dane Kolejność Charakterystyki Zakończenie				
WYBIERZ Z POWYŻSZEGO MENU przy pomocy następujących klawiszy				
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru				

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 przy pomocy następujących klawiszy				
↵ – potwierdzenie wyboru ↓↑→ – zmiana wyboru Esc – zaniechanie wyboru				

System komputerowy CHARPOTO

Opracowana została wersja programu POTOKI umożliwiająca 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.

Okna 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

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 ...

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 opracowany został komputerowy system planowania pracy brygad kompleksowych dla struktury organizacyjnej DZBM oraz jednostek niższego szczebla zarządzania, tj. Rejonów Obsługi Mieszkańców.

Proces realizacji kompleksu robót remontowych traktowany był 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 szeregu zadań cząstkowych:

- opracowania sposobu modelowania potoku z wykorzystaniem 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 (obecnie ZGK).

Poniżej przedstawiono przykładowe okna z programu ZADANIA.

Okna z programu ZADANIA:

1 – Wpisywanie danych
2 – Obliczenia
3 – Poprawianie danych
4 – Lista zespołów
5 – Lista zawodów
0 – Koniec
Wybór ... 0

INFORMACJE O ZADANIACH zapis 1[1]

Identyfikator zadania	1
Zleceniodawca	???
Lokalizacja	Miarki 4
Opis zadania	???
Czas trwania realizacji (normatywny)	330 [dni]
Czy front wolny? (T/N) T Procent wykonania 0	Data przydzielenia 99.01.14 Dzień rozpoczęcia 0 Data rozpoczęcia 99.09.09
Identyfikator brygady 0	Nazwisko brygadzysty 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):

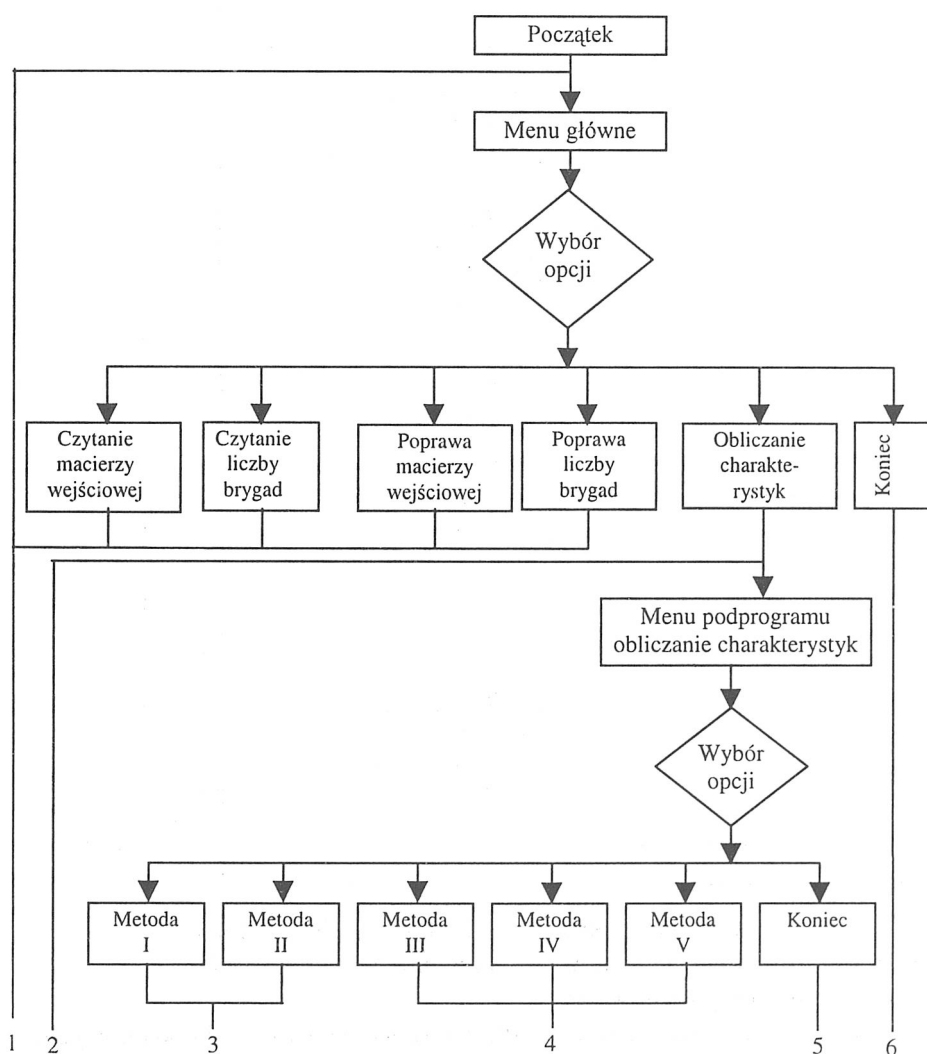
Podaj czas trwania realizacji w dniach, przy założeniu, że zadanie będzie realizowane przez brygadę wzorcową.

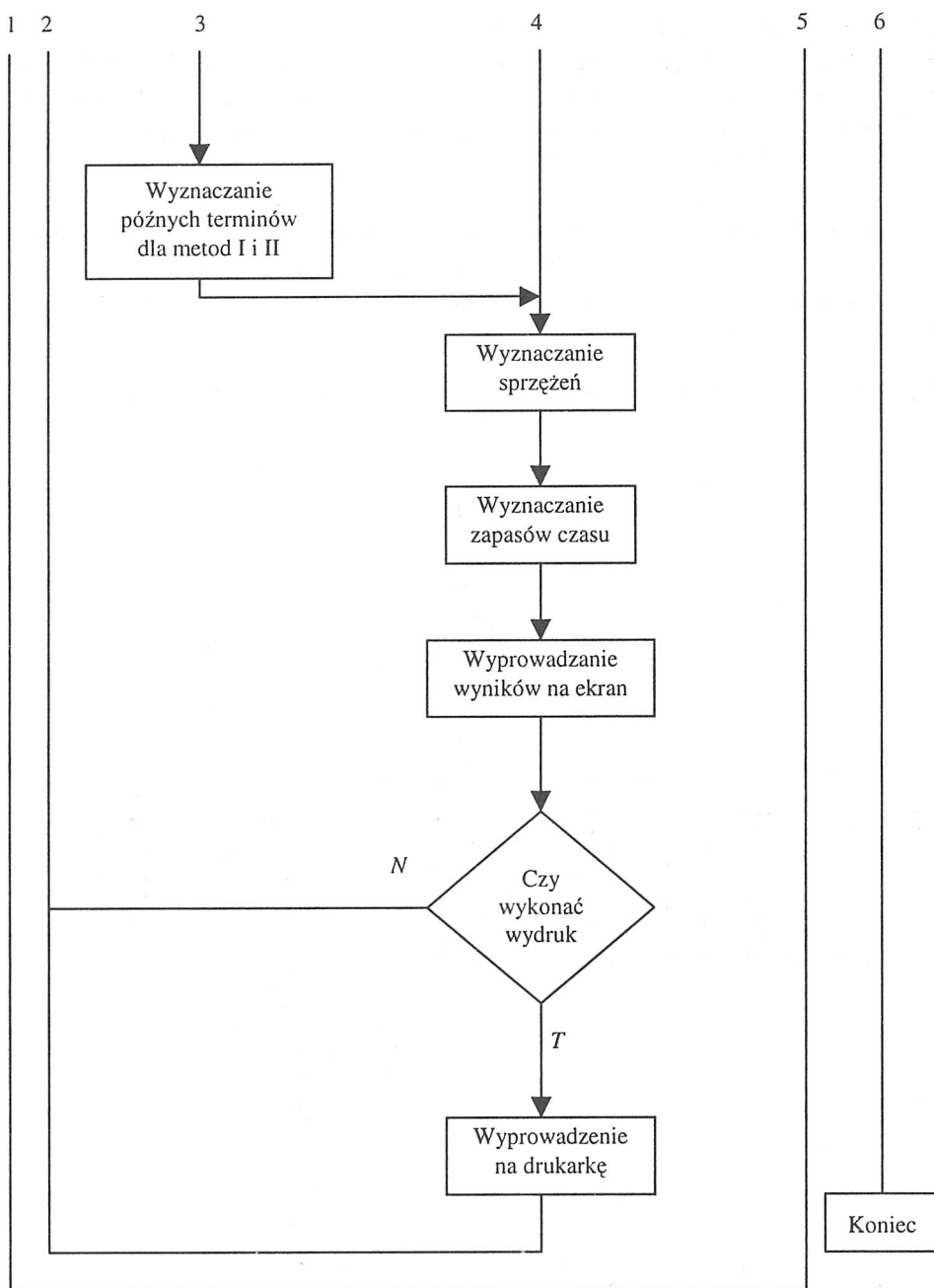
– Naciśnij dowolny klawisz –

System komputerowy ZESPOŁY EXE

Wraz z pogłębianiem problematyki dotyczącej metod równoległo-potokowych pojawiła się konieczność oprogramowania opracowanych algorytmów. Dla 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, opracowane zostały programy komputerowe, umożliwiające ich stosowanie w praktyce.

Schemat blokowy programu ZESPOŁY do wyznaczania charakterystyk czasowych:





Pojawiła się konieczność oprogramowania następujących zagadnień;

- procedura wyznaczania elementów macierzy pracochłonności robót,
- wyznaczanie macierzy wyjściowej,
- wyznaczanie charakterystyk czasowych dla zbioru metod równoległo-potokowych.

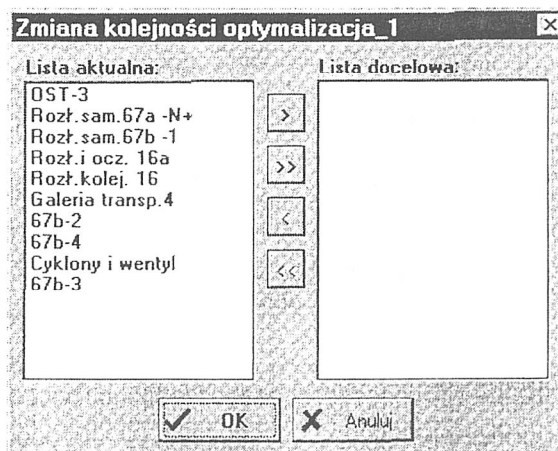
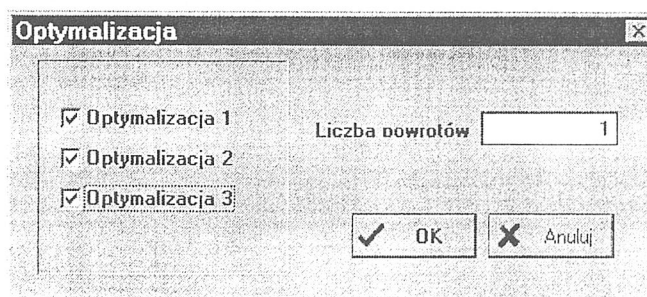
W skład niezbędnych programów i zbiorów wchodzi:

- 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 97

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 kolejności m.in. metodę podziału i ograniczeń oraz algorytmy umożliwiające określenie podstawowych parametrów robót budowlanych – najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, wartości sprzężeń czasowych. Do pracy z programem wymagany jest komputer IBM/PC minimum 486, z systemem operacyjnym Windows 3.11 lub nowszym (np. Windows 95).

Przykładowe okna z programu ORGANIZATOR 97 (wg [83]):



Nazwy robót	Rozł.kolej. 1	Rozł.i ocz. 1	Galeria trans	OST-3	Cykony i we	Rozł.sam.67	Rozł.sam.67	67b-2
Ziemne	0	6	7	2	0	1	1	4
Żelbetowe -fund.	0	36	9	25	5	77	77	11
Zasypanie ścian	0	1	4	1	0	0	0	2
Rozbiórkowe	31	0	0	0	0	0	0	0
Montażowe	49	34	39	7	18	45	46	28
Malowanie konstr.	9	6	7	3	8	13	13	9
Konstrukcja żelb.	55	0	0	11	31	27	27	0
Murowe	20	6	0	14	4	12	12	0
Żelbetowe dachu	0	24	0	5	0	0	0	0
Dekarskie, lynk.	43	13	31	13	24	59	59	25
Malarskie	37	0	2	5	3	4	4	2

Opcje
 Drukuj
 Wyjdź

Skład brygady dla kompleksu: MS		
Nazwa roboty	Ilość prac	Opis składu
Ziemne	4	4R
Żelbetowe -fund.	6	2R+4B
Zasypanie ścian	4	4R
Rozbiórkowe	5	5R
Montażowe	12	6R+6M
Malowanie konstr.	6	6M
Konstrukcja żelb.	8	4R+4B
Murowe	6	5M+R
Żelbetowe dachu	5	4B+R
Dekarskie, lynk.	8	4R+4T
Malarskie	6	6M

Drukuj
 Anuluj
 OK

System komputerowy ORGANIZATOR 99

Ostatnim, opracowanym programem jest Organizator 99, zapewniający wielowariantowe planowanie realizacji robót z wykorzystaniem metod organizacji uwzględniających kombinacje sprzężeń czasowych. Charakteryzuje się on możliwością zastosowania wielu zestawień sprzężeń czasowych zidentyfikowanych i analizowanych w licznych opracowaniach autora rozprawy. System ten, stanowiący rozwinięcie programu Organizator 97, rozszerza możliwości decyzyjne menedżera procesu realizacyjnego, zapewniając możliwość tworzenia nowych wariantów wykonawczych. Mogą one powstawać przez uwzględnienie różnych zestawień sprzężeń czasowych, odwzorowujących ograniczenia technologiczne, organizacyjne i wpływ zmieniających się warunków otoczenia. Program ten pozwoli zbadać praktyczną przydatność niektórych kombinacji sprzężeń czasowych, eliminując ze zbioru te, które nie mają znaczenia w praktyce wykonawczej.

Przykładowe okna z programu ORGANIZATOR 99:

Czasy realizacji robót na kolejnych frontach w kompleksie: EMIT

Nazwy robót	Fronty			
	bazar	spawalnia	hala transform.	część socjalna
ułoż. blachy	4	0	13	4
ułoż. izol. term	3	1	10	3
odwod. GEBERIT	1	1	4	0
dośw. mont. pods	2	2	10	0
dośw. mont. pasm	1	1	5	0
obróbki z papy	3	3	11	2
obróbki z blachy	2	2	4	3

Kolejność prowadzenia robót w kompleksie: EMIT kolejność optymalizacja_1

Nr	Front
1	spawalnia
2	część socjalna
3	hala transform.
4	bazar

Kolejność prowadzenia robót w kompleksie: EMIT
kolejność optymalizacja_2

Nr	Front
1	spawalnia
2	hala transform.
3	bazar
4	część socjalna

Kolejność prowadzenia robót w kompleksie: EMIT
kolejność optymalizacja_3

Nr	Front
1	spawalnia
2	hala transform.
3	bazar
4	część socjalna

Kolejność prowadzenia robót w kompleksie: EMIT
kolejność wpisanie

Nr	Front
1	bazar
2	spawalnia
3	hala transform.
4	część socjalna

Zakończenie

Rozprawa stanowi podsumowanie badań nad problematyką sprzężeń czasowych w modelach organizacyjnych, a zwłaszcza metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju i metody kolejnego wykonania bez uwzględniania jednoczesności prowadzenia robót. Zawiera elementy umożliwiające tworzenie nowych metod organizacji robót budowlanych. Określa kierunki badań nad tematyką metod organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń czasowych.

W pracy przedstawiono warianty metod organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. Zanalizowano skutki praktycznego ich oddziaływania na roboty budowlane i podkreślono ich wpływ na budowę modeli organizacyjnych o strukturze szeregowej i równoległej. Scharakteryzowano nowego rodzaju sprzężenia przekątne, które są czynnikiem umożliwiającym w sposób czynny odwzorowanie zależności technologicznych i organizacyjnych robót poprzedzających w porządku technologicznym, tworząc sekwencje robót jednego rodzaju. Ponadto zbadano warianty oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty uwzględniające kombinacje charakterystyk czasowych (tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót). Stworzono na tej podstawie grupę metod organizacji charakteryzującą się nowym jakościowo rodzajem zależności – sprzężeniami przekątnymi.

Autor określił możliwości wariantowania robót budowlanych tworzących wewnętrzną strukturę szeregową. Oddziaływanie niektórych sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych jest czynnikiem umożliwiającym tworzenie wewnętrznych szeregowych struktur. Wyodrębniono sprzężenia wiążące roboty o różnych charakterystykach czasowych, które umożliwiają tworzenie grupy metod kolejnego wykonania. Ponadto przedstawiono algorytmy, które umożliwiają formowanie kompleksów robót, w grupach z innymi metodami organizacji robót budowlanych z zastosowaniem różnych rodzajów sprzężeń czasowych w różnych ich zestawieniach. Równoczesne zastosowanie sprzężeń przekątnych i zerowych sprzężeń diagonalnych umożliwia wyodrębnienie sześciu wariantów metod organizacji robót zapewniających szeregowo-potokową strukturę kompleksu robót budowlanych. Przedstawiono sześć wariantów oddziaływania sprzężeń przekątnych na roboty budowlane, które umożliwiają ich powiązanie, zapewniając właściwy technologicznie ciąg robót różnego rodzaju. Ponadto zaprezentowano algorytm synchronizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych i zerowych sprzężeń diagonalnych, zapewniających warunek sekwencyjnego prowadzenia robót jednego rodzaju na sąsiednich obiektach (frontach, działkach roboczych).

Omówiono zagadnienia związane z metodami organizacji robót o równoległej strukturze wewnętrznej. Oddziaływanie sprzężeń czasowych pozwala na tworzenie równoległych zależności między grupami lub pojedynczymi robotami. Mogą one po-

wstawać bez uwzględnienia jednoczesności wykonywania robót różnego rodzaju, z jednoczesnym prowadzeniem części robót różnego rodzaju oraz z jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju.

Przedstawiono zagadnienia synchronizacji kompleksu robót z zachowaniem ciągłości procesów wiodących oraz przy wzajemnej organizacyjnej zależności grup robót. Problem ten szczegółowo omówiono wraz z algorytmem umożliwiającym wyznaczenie charakterystyk czasowych poszczególnych robót.

Zaprezentowano algorytm synchronizacji równoległych grup robót budowlanych w kompleksie. Przedstawiono zagadnienie kolejności, z wykorzystaniem zapisu macierzowego. Omówiono procedurę wyznaczania charakterystyk czasowych robót dla różnych wielkości frontów robót.

Badając możliwości oddziaływania sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych zidentyfikowano cztery warianty metody organizacji robót budowlanych, zapewniające równoległość robót. Dotyczy to równoległe prowadzonych robót o różnych technologiach wykonywanych na różnych obiektach (frontach roboczych, działkach).

Przedstawiono również grupę metod organizacji robót charakteryzującą się właściwością polegającą na równoległym prowadzeniu robót jednego rodzaju. Dla pełnego obrazu możliwości organizacyjnych omówiono charakterystyki metod oraz algorytmy harmonogramowania robót z uwzględnieniem metod równoległo-potokowych z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi i ich kombinacjami. Nakreślono obszary oddziaływania tych sprzężeń.

Każda nowo zaprezentowana metodyka została zweryfikowana na przykładach liczbowych, dotyczących realizacji robót budowlanych. Weryfikują one przedstawione w rozprawie nowe metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe.

W rozprawie został więc osiągnięty, założony na wstępie, cel badań – doskonalenie wyodrębnionej grupy metod organizacji robót budowlanych, a w szczególności metod kolejnego wykonania, bez uwzględniania jednoczesności robót oraz metod równoległego wykonania z równoległym prowadzeniem robót jednego rodzaju lub jednoczesnym prowadzeniem robót różnego rodzaju, z uwzględnieniem sprzężeń czasowych.

Literatura

- [1] Afanasev V.A., *Algoritmy formirovaniya rasčeta i optimizacii metod organizacii rabot*. Leningrad, Učebnoe pasobie, 1980.
- [2] Afanasev V.A., *Modeli organizacii rabot LISI*. Sbornik trudov, nr 6, Leningrad, 1977.
- [3] Afanasev V.A., *Potočnaja organizacija stroitelstva*. Leningrad, Strojizdat, 1977.
- [4] Afanasev V.A., *Učet zatrat vremeni na pereboizirovanie stroitelnykh organizacii pri formirovani i optimalizacii kompleksov potokov*. Aktualnye problemy sovetskogo stroitelstva. Sankt-Petersburg, 1994.
- [5] Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Formirowanie kompleksnykh 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*. Leningrad, LISI, 1988.
- [7] Afanasev V.A., Afanasev A.V., *Paralelno-potočnaja organizacija stroitelstva*. Leningrad, LISI, 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 razvite teorii potočnoj organizacii rabot*. Na strojkach Rossii, nr 8, Leningrad, 1978.
- [10] Afanasev V.A., Afanasev A.V., Valejeva V.K., Vlasov V.N., *Novye raznovidnosti potočnoj organizacii stroitelstva*. Sankt-Petersburg, 1991.
- [11] Antoszkiewicz J., *Metody heurystyczne*. Warszawa, PWE, 1982.
- [12] Acker, D.D., *Skill in Communication*. Fort Belvoir, VA: Defense System Management College. Chap. 1.2 and 8, 1980.
- [13] Biernacki J., Cyunel B., *Metody sieciowe w budownictwie*. Warszawa, Arkady, 1989.
- [14] Biliński T., Czachorowski J., *Bauen und Baurecht in Polen. Hinweise für Investoren Deutsch-Polnische Wirtschaftsförderungs-gesellschaft AG*. Szczecin, 1995.
- [15] Biliński T., Czachorowski J., *Proces budowlany wg stanu prawnego w dniu 1 stycznia 1995*. Wrocław, Wyd. CUTOB PZITB, 1995.
- [16] Blum E., *Betriebs-Organisation: Methoden und Techniken*, Verlag Wiesbaden, 1991.
- [17] Budzyński S., Chorobiński A., *Metoda podziału i ograniczeń w projektowaniu zakładów przemysłowych*. Warszawa, PWN, 1967.
- [18] Bennet J., *International construction project management*. New York, Wiley, 1991.
- [19] Bernecker G., *Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen*. Verlag TUV Rheinland, 1984.
- [20] Brandenberger J., E. Ruosch, *Projektmanagement im Bauwesen*. Verlag Wiesbaden, 1991.
- [21] Clough R.H., Sears G.A., *Construction project management*. 3ed., New York, Wiley, 1991.
- [22] Coffman E.G., *Teoria szeregowania zadań*. Warszawa, WNT, 1980.
- [23] Czapliński K., *Beziehungen zwischen Konstruktiver und Technologischer Projektierung*. VII. IKIB, Leipzig, 1984.
- [24] Czapliński K., *Realizacja obiektów budowlanych*. Wrocław, Wyd. PWr., 1990.

- [25] Czapliński K., Hejducki Z., Mrozowicz J., *Modelieren des Flusses mit Dauerbetrieb der Brigaden in Diagonalen (mit Null-Stufenkopplungen)*. Leipzig, Industrialisierung, 1984.
- [26] Czapliński K., Mrozowicz J., Musiał W., *Podstawy metodologii projektowania w budownictwie*. Wrocław, Wyd. PWr., 1980.
- [27] Czapliński K., Mrozowicz J., *Realizacja obiektów budowlanych. Podstawy teoretyczne*. Wrocław, Wyd. PWr., 1983.
- [28] Cooper D.F., Chapman C.B., *Risk Analysis for Large Projects*. Chichester, Wiley, 1987.
- [29] Cleland D.I., King, W.R. (Eds.). *Project Management Handbook*. 2nd ed. New York, Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [30] Cavendish P., Martin D.M., *Negotiating and Contracting for Project Management*. 1982.
- [31] Dyżewski A., *Technologia i organizacja budowy*. Warszawa, Arkady, 1990.
- [32] Dinsmore P.C., *Human factors in Project Management*. Rev, edit. New York, 1990.
- [33] Fleischmann H.D., *Bauorganisation Ablaufplanung Baustelleneinrichtung, Betriebsorganisation, Arbeitsorganisation*. Dusseldorf, Wernerverlag, 1983.
- [34] Frame, J.D., *Managing projects in organisations*. ED San Francisco, 1987.
- [35] Grabowski J., *Uogólnione zagadnienia optymalizacji kolejności operacji w dyskretnych systemach produkcyjnych*. Prace Nauk. Inst. Cybernetyki 50, Monografie 7, Wyd. PWr., 1979.
- [36] Grudzewski W. (praca zbiorowa), *Badania operacyjne w organizacji i zarządzaniu*. Warszawa, PWN, 1985.
- [37] Gusakov A.A., *Modelirovanie i primenenie vychislitelnoj tehniki v stroitelnom proizvodstvie*. Moskwa, Strojizdat, 1979.
- [38] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonizacja kompleksów robót o złożonej strukturze wewnętrznej*. Przegląd budowlany nr 5, 1989.
- [39] 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.
- [40] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 109, 1992.
- [41] 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, 1994.
- [42] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Komputerowo wspomagane projektowanie ciągłej pracy brygad roboczych w nierytmicznych procesach*. Przegląd Budowlany nr 4, 1984.
- [43] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Problemy harmonogramowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, z. 75, 1984.
- [44] Hejducki Z., Mrozowicz J., *The Problems of Row Structure Flow Modeling*. International Sympozjum. Sankt-Petersburg, 1995.
- [45] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Ustalenie kolejności w zbiorze potoków obejmujących kompleks obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 85, 1986.
- [46] 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.

- [47] Hejducki Z., Mrozowicz J., Sawicki M., *Wybrane sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Konferencja TNIPB, Wrocław-Polanica, 1996.
- [48] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienie wykorzystania zasobów w procesie planowania realizacji kompleksu obiektów*. Problemy Rozwoju Budownictwa nr 2, 1984.
- [49] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Zagadnienia synchronizacji kompleksów robót budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 95, 1988.
- [50] Hejducki Z., *Próba zastosowania potokowych metod organizacji robót do planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych*. Praca doktorska. Wrocław, 1985.
- [51] Hejducki Z., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 125, 1998.
- [52] Hejducki Z., Hoła B., Mrozowicz J., *Harmonogramowanie robót budowlanych o równoległej strukturze wewnętrznej*. Konferencja naukowa, Sekcja organizacji i zarządzania KILIW PAN, kwiecień 1998.
- [53] Hennings V., Peter G., *Bauplanung mit MS-Project 4.0*. Verlag TUV Rheinland, 1994
- [54] Jaworski K.M., *Projektowanie realizacji budowy według kryterium niezawodności. Teoria i metoda*. Budownictwo z. 66, Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1980.
- [55] Jaworski K.M., Marcinkowski R., *Harmonizacja niejednorodnych procesów technologicznych w planowaniu przedsięwzięć budowlanych*. Przegląd Budowlany nr 12, 1990.
- [56] Jaworski K.M., Lenkiewicz W., *Organizacja i planowanie budowy*. T. 1, *Wiadomości ogólne*. Warszawa, Wyd. Polit. Warszawskiej, 1992.
- [57] Jerzak M., *Organizacja i ekonomika wykonawstwa budowlano-montażowego*. Warszawa, PWN, 1990.
- [58] Johnson S.M., *Optimal Two-and Three-stage production schedules with set-up times included*. Naval Res. Quart, Vol. 1, 1954.
- [59] Kapliński O., *Informatyka stosowana w inżynierii produkcji budowanej*. Poznań, Wyd. Polit. Poznańskiej, 1996.
- [60] 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.
- [61] Kapliński O., Kamiński R., Pawlak G., *Komputer IBM PC w przedsiębiorstwie budowlanym i na budowie*. Poznań, TNOiK, 1991.
- [62] Kapliński O., Stefanski A., *Metody sieciowe w organizacji i planowaniu budowy*. Poznań, Wyd. Polit. Poznańskiej, 1978.
- [63] Kapliński O., *Modelling of Construction Processes*. PAN, Studia z zakresu inżynierii nr 43, Warszawa, 1997.
- [64] Kasprowicz T., *Dwukryterialna optymalizacja organizacji robót inżynierijsko-budowlanych*. Archiwum Inżynierii Lądowej, t. XXXVII z. 3–4/1991.
- [65] Kasprowicz T., *Harmonogramowanie robót inżynierijsko budowlanych z terminowym zapotrzebowaniem niezależnych brygad roboczych*. Biuletyn WAT nr 2(498), Warszawa, 1994.
- [66] Kosecki A., *Stochastyczne modele sieciowe przy planowaniu zadań budowlanych*. Zeszyt Naukowy nr 2, Kraków, Polit. Krakowska, 1989.
- [67] Kostrzewski M., *Organizacja zarządzania budowa wielkich kompleksów produkcyjnych*. Warszawa, UW, 1987.
- [68] Kowalowski H. i in., *Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych*. Warszawa, WNT, 1984.

- [69] Kerzner H., *Project Management: a system approach to planning, scheduling and controlling*. 4th ed. New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [70] Kessler H., Winkelhofer G.A., *Projektmanagement*. Verlag TUV Rheinland, 1997.
- [71] Lenkiewicz W., (praca zbiorowa) *Organizacja i planowanie budowy*. Warszawa, PWN, 1985.
- [72] Lenkiewicz W., Michnowski Z., *Elementy inżynierii systemów*. Warszawa, Wyd. Polit. Warszawskiej, 1980.
- [73] Lomnicki Z.A., A „Branch-and-Bound” Algorithm for the Exact Solution of the Tree-machine Scheduling Problem. *Operational Research Quartely*, Vol. 11, No. 6, 1965.
- [74] Liberzon V., *Russian Approach to Project Management Software: Spider Project Package*. International Symposium, Sankt-Petersburg, 1995.
- [75] Marcinkowski R., *Harmonogramowanie zadań inżynieryjno-budowlanych według wybranych kryteriów decyzyjnych*. Rozprawa doktorska. Warszawa, WAT, 1990.
- [76] Marcinkowski R., *Metody harmonogramowania przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych*. Warszawa, WAT, 1995.
- [77] Michnowski Z., *Organizacja i planowanie budowy*. T. 2, Warszawa, Wyd. Polit. Warszawskiej, 1980.
- [78] Miłosz M., Sobotka A., *Organizacja i zarządzanie w budownictwie*. Cz. 4. *Modelowanie symulacyjne procesów budowlanych*. Lublin, Polit. Lubelska, 1993.
- [79] Mitten L.G., „Branch-and-Bound” Methods. *General Formulation and Properties*. *Operation Research* No. 18, Wiley, 1970.
- [80] Mohamad Maher Jaudi, *Równoległo-potokowe metody organizacji procesów budowlanych*. Praca doktorska. Wrocław, 1990.
- [81] Mrozowicz J., *Metody potokowe organizacji procesów budowlanych o charakterze deterministycznym*. Prace naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie 14, Wrocław, 1982.
- [82] Mrozowicz J., Hejducki Z., *Równoległo-potokowa metoda organizacji z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych*. XXXIX konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica, 1993.
- [83] Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe*. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 1997.
- [84] Martin T.M., Teagarden C.C., Lamberth C.F., *Contract Administration for the Project Manager*. 1983.
- [85] Martino Joseph P., *Research and development project selection*. Van Nostrand Reinhold, 1995.
- [86] Meredith J.R., Mantel S.J., *Project Management – A Managenal Approach*. New York, Wiley, 1985.
- [87] *Management in Construction Project. Construction Risk Management*. *Proc. Inst. (1). Eng. Part 1*, 1985.
- [88] Nowicki K., *Organizacja i ekonomika budowy*. Wrocław, Wyd. PWr., 1992.
- [89] Portugal V.M., *Isledovanie assimptotičeskovo povenia zadači Dzonsona*. *Kibernetika*, nr 11, 1971.
- [90] Praca zbiorowa (pod red. Z. Michnowskiego), *Podstawy organizacji zarządzania i technologii w budownictwie*. Warszawa, Arkady, 1985.
- [91] *Project Management Body of Knowledge (PM Book)*, *Project Management Institute*. Drexel Hill, Pensylvania, 1987.

- [92] *Projektmanagement beim Bauen...*/VDI-Gesellschaft Bautechnik, 1992.
- [93] Peurifoy R.L., W.B. Ledbetter, C.J. Schexnayder, *Construction planning, equipment, and methods*. New York, Wiley, 1996.
- [94] Rowiński L., *Organizacja i zarządzanie*. Gliwice, Wyd. Polit. Śląskiej, 1992.
- [95] Rowiński L., *Organizacja produkcji budowlanej*. Warszawa, Arkady, 1982.
- [96] Rösch, Volkmann, *Bau-Projektmanagement*. Verlag TUV Rheinland, 1994.
- [97] Sawicki M., *Sprzężenia czasowe jako podstawa nowych metod organizacji robót*. Praca doktorska. Wrocław, 1997.
- [98] Sysło M., Narsing Deo, Kowalik J., *Algorytmy optymalizacji dyskretniej*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1995.
- [99] Stuckenbruck L.C., *The Implementation of Project Management: The Professional's Handbook*. Addison-Wesley Publishing Company. PMI. Drexel Hill (10th Pr.), 1992.
- [100] Stuckenbruck L.C., *The Implementation of Project Management*. Handbook, 2nd Ed., New York, Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [101] Schneider H., *Outsourcing von Gebäude- und Verwaltungsdiensten*. Verlag Wiesbaden, 1996.
- [102] Sommer H., *Projektmanagement im Hochbau*. Verlag Wiesbaden, 1994.
- [103] Steinberg C., *Projektmanagement in der Praxis*. Verlag TUV Rheinland, 1994.
- [104] Schwarze J., *Netzplantechnik*. Verlag Wiesbaden, 1994.
- [105] Schub A., Stark K., *Life cycle cost von Bauobjekten*. Verlag TUV Rheinland, 1985.
- [106] Turner J.R., *The Handbook of Project Based Management*. Maidenhead, Mc Grow-Hill, 1992.
- [107] Thomson P.A., *Engineering construction risks*. London, Thomas Telford, 1992.
- [108] Węglarz J., *Sterowanie w systemach typu kompleks operacji*. Warszawa, PWN, 1981.
- [109] Wischniewski E., *Aktives Projektmanagement für das Bauwesen*. Verlag Wiesbaden, 1997.
- [110] Voropaev V.I., *Modeli i metody kalendarnego planirovanija v avtomatizirovanyh sistemah upravlenija stroitelstvom*. Moskwa, Strojizdat, 1975.
- [111] Voropaev V.I. and Scheinberg, *Project Management as a Reform Tool*. PMI'93. in San Diego, Symposium PMI, Drexel Hill. Pennsylvania.

Time couplings incorporated in organizational methods of complex construction processes

The thesis addresses the problems of modelling construction works which have not been solved to date, with time couplings being taken into account. These refer to methods of accomplishing consecutive works without considering their concurrence, as well as parallel performance methods with works of one kind or various works being carried out in parallel. There are presented some issues which arise when one considers diagonal and inversely diagonal couplings, oblique couplings and their combinations, making up new models of work construction organization, as well as algorithms for work synchronization and practical numerical examples are given. Methods for organizing works of parallel structure have been developed, together with the algorithms for work scheduling, taking time couplings into account, which constitute parallel relationships between works and their complexes. The various effects of time couplings on works and their complexes ensuring a series structure are given. Time couplings constituting series relationships between works and groups of works have been identified. In order to get a more thorough picture of organizational possibilities expressed by means of time couplings, variants of both parallel and series stream methods have been presented. Each of the new methodologies presented has been verified by numerical examples relating to realization of construction works. They verify the new organizational methods incorporating time couplings.

Translated by Halina Marciniak

Spis rzeczy

Zestawienie oznaczeń	3
Wstęp	5
1. Podstawowe pojęcia	14
1.1. Metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe	15
1.2. Warianty podstawowych metod organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe	18
2. Rodzaje sprzężeń czasowych jako podstawa wariantów metod organizacji robót budowlanych	26
2.1. Sprzężenie czasowe i ich rodzaje	26
2.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem zerowych sprzężeń diagonalnych	27
2.3. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem zerowych, odwrotnych sprzężeń diagonalnych	35
2.4. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych	43
2.5. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem odwrotnych sprzężeń przekątnych	51
3. Metody organizacji robót budowlanych o szeregowej strukturze wewnętrznej	55
3.1. Synchronizacja robót budowlanych z zastosowaniem różnych metod organizacji w kompleksie	55
3.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych i zerowych odwrotnych diagonalnych	59
4. Metody organizacji robót budowlanych o szeregowo-potokowej strukturze wewnętrznej	68
4.1. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń przekątnych wiążących roboty różnych rodzajów	68
4.2. Metoda organizacji robót budowlanych ze sprzężeniami przekątnymi i zerowymi sprzężeniami diagonalnymi	73
5. Metody organizacji robót budowlanych o równoległej strukturze wewnętrznej	76
5.1. Harmonogramowanie równoległych kompleksów robót	78
5.2. Warianty metody organizacji robót budowlanych z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych	81
5.3. Harmonogramowanie równoległych grup robót budowlanych w kompleksie	87
6. Metody organizacji robót budowlanych o równoległo-potokowej strukturze wewnętrznej	93
6.1. Metoda organizacji równoległych robót jednego rodzaju	93
6.2. Planowanie ciągłej pracy grup roboczych w procesie realizacji kompleksu robót	96
7. Zastosowanie systemów komputerowych w metodach organizacji uwzględniających sprzężenia czasowe	102
Zakończenie	117
Literatura	119
Time couplings incorporated in organizational methods of complex construction processes	124

Contents

Notation	3
Introduction	5
1. Basic notions	14
1.1. Methods of construction work organization incorporating time couplings	15
1.2. Variants of the basic methods of construction work organization incorporating time couplings	18
2. Types of time couplings as the basis of the variants of construction work organization methods	26
2.1. Types of time couplings	26
2.2. Variants of the construction work organization method incorporating zero diagonal couplings	27
2.3. Variants of the construction work organization method incorporating zero, inverse diagonal couplings	35
2.4. Variants of the construction work organization method incorporating oblique couplings	43
2.5. Variants of the construction work organization method incorporating inverse oblique couplings	51
3. Construction work organization methods of series inner structure	55
3.1. Work synchronization using various organizational methods within a complex	55
3.2. Variants of the construction work organization method incorporating oblique and zero inverse diagonal couplings	59
4. Construction work organization methods of series-stream structure	68
4.1. Variants of the construction work organization method incorporating oblique couplings connecting various kinds of work	68
4.2. Constructions work organization method with oblique and zero diagonal couplings	73
5. Construction work organization methods of parallel inner structure	76
5.1. Scheduling of parallel work complexes	78
5.2. Variants of the construction work organization method incorporating diagonal and inverse diagonal couplings	81
5.3. Scheduling of parallel groups of work in a complex	87
6. Construction work organization methods of parallel-stream inner structure	93
6.1. Method of organizing parallel works of one kind	93
6.2. Planning continuous work for working groups	96
7. Application of computer programs for developing construction work organization methods incorporating time couplings	102
Conclusions	117
Bibliography	119
Time couplings incorporated in organizational methods of complex construction processes	124

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU BUDOWNICTWA
(wydane w latach 1994–2000)

- Nr 67, Monografie nr 30, M. Szechiński, *Deformacje zginanych elementów żelbetowych obciążonych długotrwale*, Wrocław 1996
- Nr 68, Konferencje nr 21, *Proceedings of the Third Interuniversity Research Conference*, Wrocław 1994
- Nr 69, Konferencje nr 22, *Materiały kompozytowe – właściwości, wytwarzanie, zastosowanie*. I Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1997
- Nr 70, Konferencje nr 23, *Budownictwo betonowe w energetyce*. I Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1998
- Nr 71, Konferencje nr 24, *Podstawy remontowe w budownictwie ogólnym*. VIII Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1998
- Nr 72, Monografie nr 31, H. Nowak, *Oddziaływanie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek*, Wrocław 1999
- Nr 73, Monografie nr 32, A. Ubysz, *Odształcenia plastyczne i gamonaprężenia w żelbetowych konstrukcjach prętowych*, Wrocław 1999
- Nr 74, Konferencje nr 25, *Problemy projektowania oraz optymalizacja rozwiązań materiałowych i technologii wykonywania obiektów w aspekcie trwałości i ochrony przed korozją*. XI Konferencja OKTRA '99, Wrocław 1999
- Nr 75, Konferencje nr 26, *Materiały kompozytowe – właściwości, wytwarzanie, zastosowanie*. II Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1999
- Nr 76, Monografie nr 33, J. Hoła, *Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskany*, Wrocław 2000
- Nr 78, Konferencje nr 27, *Problemy eksploatacji, remontów i wznoszenia budowlanych obiektów energetycznych*. II Konferencja naukowo-techniczna. Wrocław 2000



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

ISSN 0324-9875