

INSTYTUT BUDOWNICTWA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Raport Serii PRE Nr 5 /86

PRÓBA ZASTOSOWANIA POTOKOWYCH
METOD ORGANIZACJI ROBÓT DO
PLANOWANIA REALIZACJI WIELKICH
KOMPLEKSÓW BUDOWLANYCH

Zdzisław Hejducki

Praca doktorska

Promotor: Doc. dr hab. inż. Juliusz MROZOWICZ

Słowa kluczowe: potokowe metody organizacji, sprzężenia czasowe,
nierytmiczne potoki

Wrocław, 1985 r.

Mgr inż. Zdzisław HEJDUCKI

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Zakład Metod Projektowania i Realizacji Budowli

ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, bud. C-7, pok. 815, tel. 20-39-71

50-370 - Wrocław

Raport opracowano w ramach problemu badawczego: 02002.

Cel pracy: Rozprawa doktorska

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej dnia:

SPIS TREŚCI:

Str.

T E Z Y P R A C Y

Rozdział 1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ PRACY	5
1.1. Przedmiot i zakres pracy	7
1.2. Cel pracy	8
1.3. Problematyka pracy w świetle dostępnej literatury	9
Rozdział 2. OGÓLNE ZAŁOŻENIA I STRUKTURA SYSTEMU	15
Rozdział 3. BUDOWA MACIERZY CZASÓW WYKONANIA ROBÓT DLA KOMPLEKSU OBIEKTÓW	19
3.1. Technika wyznaczania czasów realizacji	19
3.2. Zmodyfikowany zapis macierzowy	24
Rozdział 4. POTOKOWE METODY ORGANIZACJI ROBÓT BUDOWLANYCH..	28
4.1. Podstawowe pojęcia	29
4.2. Charakterystyka znanych metod potokowej organizacji robót	30
4.3. Nowe warianty metod potokowej organizacji robót	35
4.4. Znaczenie sprzężeń tranzytowych (przekątniowych) w kompleksie robót	64
Rozdział 5. HARMONIZACJA POTOKÓW Z UWZGLĘDNIENIEM USTALONEJ ILOŚCI ZASOBÓW	70
5.1. Podstawy teoretyczne zagadnienia przedziału brygadm frontów roboczych	72
5.2. Planowanie ciągłej pracy brygad roboczych w procesie realizacji kompleksu obiektów	76
Rozdział 6. MODELOWANIE POTOKU O STRUKTURZE SZEREGOWEJ	78
6.1. Rozwiązanie problemu synchronizacji potoków.	78
6.2. Przykład zastosowania algorytmu	81
Rozdział 7. MODELOWANIE POTOKU O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ ...	83
7.1. Sformułowanie problemu	84
7.2. Rozwiązanie zagadnienia synchronizacji potoków	86
7.3. Przykład zastosowania algorytmu	88

Rozdział 8.	USTALENIE KOLEJNOŚCI W ZBIORZE POTOKÓW	90
8.1	Algorytm szeregowania w zbiorze potoków ...	90
8.2	Praktyczne wykorzystanie algorytmu	95
Rozdział 9.	SPOSÓB WYBORU POTOKOWEJ METODY ORGANIZACJI	
	ROBÓT	101
9.1	Podstawy teoretyczne zagadnienia wyboru	
	metody	101
9.2	Wyniki praktycznej weryfikacji	103
Rozdział 10.	PODSUMOWANIE	109
	LITERATURA	119
	Załącznik	
	Komputerowo-wspomagane modelowanie potoków ...	127

TEZY PRACY

Zwiększenie efektywności realizacji wielkich kompleksów budowlanych uzyskuje się przez:

- wprowadzenie nowych sprzężeń czasowych umożliwiających wariantowanie potokowych metod organizacji;
- uwzględnienie struktur równoległej i szeregowej potoku;
- wyznaczenie racjonalnej kolejności realizacji obiektów w kompleksie.

1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ

Planowanie realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych^{*/}, z uwagi na złożoność zagadnienia, wymaga ujęcia systemowego [13, 16, 17, 28]. Proces realizacji zespołu obiektów jest systemem zawierającym dużą liczbę elementów związanych i uzależnionych od siebie (brygad, maszyn, środków transportowych itp.). Harmonogramowanie procesu wznoszenia wielkich kompleksów obiektów staje się więc zagadnieniem o dużej złożoności obliczeniowej, szczególnie w przypadku rozwiązywania problemu szeregowania zadań [24] (ustalenie racjonalnej kolejności wykonywania robót na obiektach).

Prowadząc badania nad problematyką modelowania nierytmicznych potoków w budownictwie stwierdzono, że metody potokowej organizacji robót przedstawione w pracach [2, 3, 8, 71], jakkolwiek stanowią podstawową bazę teoretyczną, są narzędziem umożliwiającym rozwiązywanie zadań cząstkowych, znacznie ograniczając zakres ich praktycznego stosowania. Planowanie realizacji wielkiego kompleksu budowlanego np. osiedla mieszkaniowego, zakładu przemysłowego itp. napotyka trudności metodologiczne.

Podjęto próbę przedstawienia rozwiązania kompleksowego (rys. 1 umożliwiającego planowanie realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych z wykorzystaniem potokowych metod organizacji robót.

^{*/} Wielki kompleks obiektów budowlanych jest takim ich zbiorem, którego wzniesienie jest niezbędne do właściwej eksploatacji zespołu obiektów budowlanych np. osiedla mieszkaniowego, zakładu przemysłowego, itp. . Charakteryzując się znaczną liczbą robót budowlanych wykonywanych na wielu obiektach, powoduje on ogromne trudności metodologiczne w opracowaniu planów realizacyjnych, uwzględniających ograniczenia technologiczne, organizacyjne, racjonalną kolejność realizowanych obiektów i inne. Rozwiązanie np. zagadnień kolejnościowych dla $n > 20$ działek (obiektów) z uwzględnieniem znanych metod potokowej organizacji robót [2, 3, 8, 71], napotyka, jak wykazały przeprowadzone badania, trudności wynikające m.in. z ograniczonej pojemności pamięci operacyjnej komputera.

Zaproponowano system planowania realizacji kompleksu robót budowlanych, wyszczególniając podsystemy, w których dokonuje się harmonizacji elementów wg opracowanych algorytmów. Podstawowym celem działania jest taka organizacja wszystkich elementów systemu aby zapewnić minimalny czas realizacji wielkiego kompleksu obiektów.

Opracowując system planowania realizacji, przyjęto potok jako formę organizacji robót, budowany przy wykorzystaniu sprzężeń między poszczególnymi robotami [3]. Przedstawiono również możliwości tworzenia nowych metod drogą uwzględnienia kombinacji sprzężeń czasowych występujących między robotami w modelu organizacyjnym, nieuwzględnianych w dotychczasowych pracach.

Opracowywanie teoretycznych podstaw planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych wywołało potrzebę, odmiennego od dotychczasowych, podejścia do tego zagadnienia i znacznego pogłębienia wiedzy w tym zakresie. Rozszerzenie obszaru wiedzy dotyczącej sprzężeń czasowych dało naukowe podstawy do rozwoju teorii potoków. Praca nad zagadnieniem sprzężeń czasowych umożliwiła identyfikację nowych ich rodzajów oraz powstanie wariantów metod potokowej organizacji. Stwarza to organizatorom produkcji budowlanej nowe możliwości sterowania realizacją.

Zbadano szereg zagadnień związanych z modelowaniem złożonych potoków w budownictwie. Podjęto próbę opracowania teorii potoków o strukturze szeregowej i równoległej, rozwiązując również problem kolejnościowy dla zbioru potoków.

W rozprawę wykorzystano narzędzia z grupy aparatu fizycznego oraz pojęciowego. Dane liczbowe do weryfikacji algorytmów zebrano w warunkach naturalnych, na placach budów, wykorzystując obserwacje, dokumenty budowy oraz obowiązującą bazę normatywną (Katalogi Norm Pracy, Normy Zakładowe). Podstawowym narzędziem technicznym do prowadzenia obliczeń był komputer.

Narzędzia z grupy aparatu pojęciowego stanowią podstawę techniki naukowej zastosowanej w pracy. Posłużono się w niej metodami heurystyki, elementami rachunku macierzowego, logiki matematycznej, metodami kombinatoryki oraz programowaniem w języku Fortran. Ponadto z uwagi na złożoność obliczeniową zagadnień kolejnościowych wykorzystano metodę podziału i ograniczeń [21, 65]. Uzasadniając jej przydatność w rozwiązywaniu zagadnień kombinatorycznych można podać

jako przykład, że dla n obiektów, zbiór rozwiązań zawiera $n!$ elementów. Dla $n = 50$ (działek, obiektów) otrzymujemy liczbę $7 \cdot 10^{59}$ elementów [40]. Gdyby wykorzystać do wykonania przeglądu zupełnego możliwych kombinacji komputer, który w ciągu jednej sekundy sprawdzałby 10^5 elementów, obliczenia trwałyby 10^{57} lat. Stosując metodę podziału i ograniczeń możemy znacznie skrócić czas wykonywania obliczeń.

Metoda naukowa zastosowana w pracy obejmuje:

- badania wstępne i formułowanie problemu,
- budowę modelu systemu planowania realizacji kompleksu obiektów,
- opracowanie algorytmów rozwiązania,
- przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych,
- analizę wyników.

1.1 Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest problematyka technologiczno-organizacyjna realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych. Podjęto próbę opracowania systemu planowania realizacji zespołu obiektów.

Dla celów badawczych wyodrębniono zagadnienia związane z modelowaniem kompleksu robót budowlanych metodami potokowej organizacji robót, przyjmując następujące ograniczenia.

Dany jest zbiór obiektów budowlanych O planowanych do realizacji

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

na których przewidziano do wykonania częściowe procesy robocze R tworzące zbiór:

$$R = \{ R_1, R_2, \dots, R_m \},$$

przy czym należy je wykonywać w ustalonym porządku technologicznym:

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

Ustalono, że zadania inwestycyjne będą realizowały specjalizowane brygady, tworzące zbiór B .

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

Można sporządzić macierz T czasów wykonania robót R na obiektach O przez brygady B

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

gdzie: t_{ij} - czas wykonania roboty R_j , na obiekcie O_i .

W pracy wykorzystano wyniki badań czasów trwania realizacji robót budowlanych, zebrane podczas wznoszenia osiedli mieszkaniowych Szuwałowo-Ozierki w Leningradzie (ZSRR) i Zakrzów we Wrocławiu.

Przyjęto ponadto uogólnienia wynikające z dużej skali rozpatrywanego problemu. Na tym etapie rozważań pominięto wpływ czynników losowych oraz destabilizacyjne oddziaływanie otoczenia na model realizacyjny.

Swoim zakresem praca obejmuje następujące zagadnienia:

- opracowanie zapisu macierzowego uwzględniającego złożone przypadki praktyczne;
- identyfikację sprzężeń czasowych występujących między robotami i zbadanie możliwości tworzenia nowych wariantów potokowych metod organizacji;
- rozwiązanie zagadnienia formowania potoków z uwzględnieniem ustalonej ilości zasobów;
- opracowanie teorii potoków o strukturze szeregowej i równoległej oraz rozwiązanie problemu kolejnościowego dla zbioru potoków;
- określenie sposobu wyboru metody potokowej organizacji robót.

1.2 Cel pracy

Z uwagi na niedostateczny rozwój teorii potoków w budownictwie, ograniczający zakres ich praktycznego stosowania, w przypadku planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów, koniecznym stało się uzupełnienie tego niedostatku.

Celem pracy jest określenie i wzbogacenie obszaru wiedzy niezbędnego do racjonalnego harmonogramowania procesu realizacji wielkiego kompleksu obiektów budowlanych.

Liczne ograniczenia występujące w praktyce budowlanej jak np.: konieczność zapewnienia ciągłej pracy brygadom roboczym, zapewnienie nieprzerwanej pracy na obiektach, wykonanie zadania inwestycyjnego w określonym terminie, itp., narzucają potrzebę opracowania teoretycznych podstaw umożliwiających ich uwzględnienie. Niezbędnym staje się także wzbogacenie teorii potoków, aby można ją było stosować w praktyce budowlanej bez ograniczeń, uwzględniając pojawiające

się liczne przypadki szczególne, przyjmując jako podstawowe kryterium efektywności - minimum czasu wykonania zadania inwestycyjnego.

1.3 Problematyka pracy w świetle dostępnej literatury

Planowanie realizacji kompleksu robót przy zastosowaniu wykresów liniowych [1] było pierwszym sposobem modelowania procesów produkcyjnych, stosowanym do dziś. Podstawy teorii harmonogramów budowlanych zawarte są w pracy [31]. Szerokie wykorzystywanie harmonogramów liniowych wynika głównie z prostoty ich wykonania, przy zapewnieniu dość bogatej informacji dotyczącej planowanych do realizacji procesów budowlanych. Z uwagi na trudności w przedstawieniu powiązań występujących między robotami i w odwzorowaniu podziału obiektu na fronty robocze poszukiwano lepszych rozwiązań, udoskonalając harmonogramy liniowe [81]. Zastosowanie do planowania realizacji obiektów budowlanych wykresów o dwóch osiach współrzędnych umożliwiających odwzorowanie graficzne miejsca, czasu wykonania procesu roboczego i powiązań występujących między robotami, stało się niezbędne przy wprowadzaniu metod pracy równomiernej^{*/} w budownictwie [19, 20, 67]. Podstawy metody potokowej organizacji robót^{***}

^{*/} Jak zauważył w swej pracy autor [84] "potok na swej drodze płynie w sposób nierównomierny", co w przypadku powszechnej realizacji obiektów budowlanych o różnej pracochłonności robót, uzasadnia przyjęcie nazwy metoda potokowa. Tym bardziej, że w literaturze zagranicznej stosowana jest tradycyjna nazwa metody: metod potočno stroitelstva, der Taktstrassen. Przyjmując do rozważań pojęcie rytmu potoku, które oznacza czas pracy brygady na działce roboczej, możemy podzielić je na: rytmiczne (o jednakowych czasach wykonywania robót na działkach), wielorytmiczne (o jednakowych czasach w częściowych potokach^{**} / lecz równych pomiędzy nimi) oraz nierytmiczne (o różnych czasach prowadzenia robót na działkach). Nasuwa się twierdzenie, że metoda pracy równomiernej może być szczególnym przypadkiem metody potokowej.

^{***} Terminologię przyjęto za pracę [71].

zostały przedstawione i rozwinięte w pracach [32, 67, 83, 84].

Zagadnienia planowania realizacji obiektów budowlanych metodą pracy równomiernej (metodą potokową) pojawiły się w szeregu publikacjach [15, 60, 88, 92].

W pracach [82, 84] autor proponuje rozwiązanie powyższego zagadnienia przy wykorzystaniu metod graficznych, umożliwiających wyznaczenie okresów rozwinięcia^{MM/} częściowych potoków. Przedstawiono również zagadnienie realizacji obiektów przy równoczesnej pracy kilku brygad jednej specjalności.

Prezentowane sposoby planowania, wykorzystujące metody graficzne oraz drogę wielokrotnych prób zmierzających do znalezienia najlepszego wariantu, są pracochłonne i nie zapewniają dokładnego rozwiązania. W rozprawie przyjęto analityczny sposób wyznaczania okresów rozwinięcia częściowych potoków, ze pracami [2, 8, 20, 71], dokonując modyfikacji umożliwiających np. harmonizację potoków o strukturze równoległej. Rozwiązano również zagadnienie planowania ciągłej pracy wielu brygad jednej specjalności, minimalizując czas realizacji kompleksu robót, wykorzystując w opracowanym algorytmie ideę zawartą w pracy [38].

Zagadnienia formowania potoków w procesie planowania realizacji kompleksu obiektów przedstawiono między innymi w pracy [66]. Zaprezentowano metodykę wyznaczania charakterystyk złożonych potoków z uwzględnieniem powiązań technologicznych występujących między robotami. Podjęto próbę określenia optymalnej wielkości środków realizacji w modelowanym potoku przy zachowaniu warunku ciągłości pracy brygad. Przedstawiono założenia metody poszukiwania właściwej kolejności realizacji obiektów budowlanych występujących w kompleksie. W pracy tej przedstawiono elementy teorii potoków w budownictwie, wprowadzając dużą ilość nowych pojęć i różnorodnych zagadnień. Wynikało to z nieuwzględnienia metod potokowej organizacji porządkujących ograniczenia technologiczne i organizacyjne. Praca [66] nie rozwiązuje wielu zagadnień do końca, przedstawiając często tylko ich założenia. W rozprawie, która bazuje na metodach potokowych, wprowadzając nowe i wzbogacając dotychczas stosowane, przedstawiono własne sposoby pełnego rozwiązania szeregu problemów za-

^{MM/} Terminologię przyjęto za pracą [71].

wartych w omawianej pracy.

Praca [70] prezentuje sposób planowania rzeczowego produkcji budowlanej w ujęciu modelowym. Wprowadzone przez autora pojęcia: modelu selekcji i modelu struktury umożliwiają uwzględnienie w proponowanym zapisie macierzowym występujących ograniczeń. Wykorzystano w nim metodę pracy równomiernej oraz modele sieciowe jako podstawę budowanego modelu. Autor zwraca uwagę na niedoskonałość stosowanych w planowaniu realizacji osiedli mieszkaniowych sieci powiązań, uniemożliwiających, ze względu na ogromną pracochłonność, uzyskanie rozwiązań alternatywnych. Przedstawia koncepcję metody planowania, pozwalającej na wybór najwłaściwszego wariantu realizacyjnego, bez konieczności opracowywania modelu sieciowego dla każdego dopuszczalnego rozwiązania.

Jest to praca bliska swoją problematyką niniejszej rozprawie. Autor, dostrzegając niedostatki metod sieciowych próbuje wykorzystać klasyczną wiedzę o metodzie pracy równomiernej do planowania realizacji obiektów niejednorodnych. Przedstawiony sposób planowania wymaga dostosowania do opracowanego modelu organizacyjnego środków realizacji (brygad i ich technicznego wyposażenia).

W rozprawie, ilość i składy zawodowe brygad roboczych, jakimi dysponuje budowlana jednostka organizacyjna, uwzględnione zostały na etapie opracowywania danych wejściowych do systemu i na tej podstawie dokonuje się harmonizacji robót planowanych do wykonania na wielkim kompleksie obiektów.

W ostatnim ćwierćwieczu bardzo wiele prac poświęcono modelom sieciowym i na nich bazującym sposobom planowania robót budowlanych. Nie omawia się tu bogatego zestawienia publikacji zagranicznych i krajowych dotyczących tej problematyki, gdyż praca ta na nich nie bazuje a korzysta jedynie z niektórych elementów. Uwzględnia się ideę powiązań (technologicznych, czasowych, organizacyjnych) między robotami, pomocny jest również zapis macierzowy modelu realizacyjnego. Brano jest również pod uwagę jedno z podstawowych kryteriów efektywności: minimalizacja czasu realizacji zadania inwestycyjnego. W zbiorze publikacji poświęconych modelom sieciowym są również prace zawierające idee wyprzedzające prezentowane w rozprawie zagadnienia. Należą do nich np. problemy niezawodności projektów realizacji budowy [39, 53, 54, 55].

W pracy [92] jako jednej z pierwszych zaprezentowano macierzowy model kompleksu robót budowlanych i wprowadzono pojęcia sprzężeń czasowych: pionowych i diagonalnych. Uwzględniono zjawisko "krytycznego zbliżenia" częściowych potoków oraz zaproponowano wprowadzenie zapasu czasu dla kompensacji odchyłek od wielkości normatywnych w czasie wykonywania poszczególnych robót, wywoływanych czynnikami losowymi.

W rozprawie, analizując możliwości oddziaływania sprzężeń czasowych w modelu potoku i wykorzystując przyjęte w pracy [92] sprzężenia pionowe i skośnie wstępujące^{*} (stopniowe, diagonalne), wprowadzono nowe pojęcie: sprzężenia przekątne^{**} / tj. działające w kierunku głównej przekątnej w macierzy .

Zagadnienia wykorzystania sprzężeń czasowych w modelach realizacyjnych pojawiły się m.in. w pracy [94].

Na czas wykonania kompleksu robót ma również wpływ kolejność realizowanych obiektów. Problematykę szeregowania zadań podejmują m.in. prace [24, 40, 41]. W pracy [24] analizuje się możliwości "minimalizacji długości szeregowania zadań", minimalizacji czasu przepływu oraz szeregowania zadań z minimalizacją czasów wykonania operacji w systemach komputerowych. Problematyka sterowania produkcją rozumiana jako optymalny rozdział czasowy zadań na poszczególnych maszynach omawiana jest w pracy [40]. Podano algorytmy umożliwiające znalezienie, w zbiorze możliwych rozwiązań, rozwiązania optymalnego przy zastosowaniu minimalno-czasowego kryterium. Prezentowane algorytmy oparte na metodzie podziału i ograniczeń [65] nie posiadają wielomianowej złożoności obliczeniowej i zaliczone zostały do klasy problemów NP - zupełnych. Przykłady zastosowań podanych algorytmów świadczą o możliwości ich wykorzystania tylko w przypadkach szczególnych.

^{*}/ Propozycja nazwy sprzężeń K. Czaplińskiego.

^{**}/ Sprzężenia przekątne wiążą roboty danego rodzaju j na danym froncie i z robotami poprzedzającymi $j-1$, na froncie $i-1$.

Algorytm Lubeckiego przedstawiony w pracy [42] zapewnia ustalanie kolejności prowadzenia robót przy wykorzystaniu zasady minimalizacji sumy czasów oczekiwania frontów robót na poszczególne środki realizacji. Autor formułuje ogólny zarys metodyki postępowania, bez uwzględnienia roli sprzężeń czasowych w modelu.

Z zagadnieniami przedstawionymi w niniejszej pracy związana jest ściśle problematyka zawarta w publikacjach [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 71]. Autorzy prezentują potokowe metody organizacji robót budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe między robotami wykonywanymi na kolejnych frontach roboczych. Podano algorytmy formowania i wyznaczania charakterystyk czasowych nierytmicznych potoków, oraz sposoby ustalania kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach w celu znalezienia minimalnego czasu realizacji kompleksu robót.

Pierwsze wyniki badań dotyczące potokowych metod organizacji robót, w nowym ujęciu, zawierają prace [2, 3, 4]. Przedstawiona została klasyfikacja metod organizacji robót z uwzględnieniem roli sprzężeń czasowych, jako kryterium tworzenia metod organizacji robót. Autor podaje sposoby formowania potoków w budownictwie różnymi metodami organizacji robót, wyznaczania ich czasowych charakterystyk (terminów rozpoczęcia i zakończenia robót; wartości rezerw czasu), oraz przedstawia zarys metodyki wyboru metody organizacji robót. Następne prace [5, 6, 8, 9], rozwijają problematykę, wprowadzając zagadnienia związane z wyznaczeniem kolejności realizowanych obiektów budowlanych. Autorzy podają algorytmy optymalizacji minimalno-czasowej potoków, wykorzystując metodę podziału i ograniczeń oraz modyfikując algorytm Johnsona SM. Opracowane programy dla EBC umożliwiają wyznaczenie charakterystyk czasowych modelowanego potoku, obliczenie wskaźników decyzyjnych służących do wyboru metody organizacji robót oraz zapewniają przegląd możliwych kolejności realizowanych obiektów drogą badania możliwych przestawień frontów roboczych.

Praca [71] podaje podstawowe definicje umożliwiające rozwinięcie prezentowanych przez autora problemów. Podana klasyfikacja metod organizacji robót wraz z przyjętą terminologią stworzyły możliwość uporządkowania wiedzy w tej dziedzinie i jej dalszego rozwoju. Opra-

cowany zbiór programów dla EMC umożliwia dokonywanie obliczeń związanych z ustalaniem racjonalnej kolejności realizowanych obiektów oraz z wyznaczaniem charakterystyk czasowych modelowanego potoku. Praktyczne walory prezentowanej problematyki potwierdza zastosowanie metod potokowych do projektowania realizacji obiektów szpitala.

Prezentowane w wyżej wymienionych pracach zagadnienia, nie wyczerpują problematyki harmonizacji potoków w budownictwie. Są natomiast bazą, z pomocą której, przyjmując podstawowe pojęcia, pogłębić i wzbogacić wiedzę dotyczącą problematyki sprzężeń czasowych.

Prowadząc badania w zakresie teorii potoków w budownictwie, autor niniejszej rozprawy sygnalizował szereg opracowywanych zagadnień [10, 11, 12, 30, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]. W pracy [48] zaprezentował rysujące się możliwości tworzenia nowych metod potokowej organizacji robót oraz pierwsze wyniki z ich weryfikacji na przykładzie liczbowym [30]. Referat [44] zapowiadał możliwości modelowania złożonych potoków z uwzględnieniem szeregu technologicznych i organizacyjnych ograniczeń. Publikacje [45, 47, 51] zwracają uwagę na problemy wykorzystania zasobów (brygad roboczych) podczas planowania realizacji kompleksu obiektów z wykorzystaniem metod potokowych. Szereg zagadnień, w tym zmodyfikowany algorytm przeglądu przestrzeni rozwiązań, zostały przedstawione w publikacji [50]. Problemy oceny i wyboru metod potokowej organizacji robót przedstawione w [11, 13], zostały rozwinięte w rozprawie. Prace [10, 11, 12] są natomiast wynikiem współpracy z Katedrą Organizacji i Zarządzania Budownictwem Leningradzkiego Instytutu Budowlanego. Autor prowadził również badania nad znanymi metodami potokowej organizacji robót, przedstawiając ich wyniki w pracach [45, 46, 49].

2. OGÓLNE ZAŁOŻENIA I STRUKTURA SYSTEMU

Proces realizacji wielkiego kompleksu obiektów budowlanych traktowany jest jako zbiór robót budowlanych przewidywanych do wykonania przez brygady robocze. Potokowe metody organizacji robót określają rodzaj występujących między robotami sprzężeń czasowych, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami. Są one integralną częścią systemu planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych. Rozwiązanie szeregu zagadnień wymagało wydzielenia ich z szerokiej pojętej problematyki technologiczno-organizacyjnej.

Stworzono więc ogólny model, ujmujący podstawowe zagadnienia związane z tą problematyką. Zaproponowane całościowe ujęcie problemu wraz z opracowanymi oryginalnymi algorytmami służy do rozwiązania zagadnień praktycznych występujących w procesie realizacji zespołu obiektów budowlanych.

Kompleksowe rozwiązanie problemu harmonogramowania, zgodnie z przyjętym założeniem wymagało rozwiązania szeregu zadań cząstkowych. Należą do nich:

- opracowanie zapisu macierzowego, uwzględniającego przypadki niejednakowej ilości i wielkości obiektów (działań roboczych);
- zbadania możliwości tworzenia nowych potokowych metod organizacji robót;
- opracowanie algorytmu harmonizacji^{*/} częściowych potoków z uwzględnieniem ustalonej ilości zasobów (planowanie pracy kilku brygad jednej specjalności);
- opracowanie algorytmu synchronizacji potoków formowanych różnymi metodami potokowej organizacji robót oraz o różnej kolejności realizowanych obiektów;
- rozwiązanie zagadnienia modelowania potoku o strukturze równoległej z uwzględnieniem ciągłości pracy w procesach wiodących;
- opracowanie zagadnienia kolejnościowego dla zbioru potoków;
- opracowanie sposobu wyboru metody organizacji robót przy równoczesnym uwzględnieniu czasu realizacji i wskaźników jakości organizacji robót.

^{*/} Zgodnie z prawem harmonizacji [1].

Problemy te pojawiły się podczas przeprowadzanych badań na budowie kompleksu obiektów osiedla mieszkaniowego. Są one wynikiem systemowego traktowania procesu realizacji [13, 16, 17, 28]. Podjęto również próbę wyjścia poza ramy sześciu prezentowanych w literaturze metod potokowej organizacji, tworząc nowe metody z kombinacji sprzężeń czasowych.

Opis systemu

System harmonogramowania zawiera zbiór algorytmów z minimalno-czasowym kryterium efektywności. Należy je traktować jako składowe podsystemy realizujące wspólny cel - minimalizację czasu realizacji kompleksu obiektów. Są one uporządkowane wg struktury hierarchicznej, lecz mogą być w konkretnych warunkach realizacyjnych wykorzystywane indywidualnie.

Uwzględnia on możliwość deterministycznego jak i probabilistycznego traktowania procesu realizacji. Dotyczy to głównie określenia czasu trwania robót prowadzonych przez brygady robocze. Macierz czasów trwania robót może zawierać zarówno elementy wyznaczone na podstawie obowiązujących normatywów (normy czasu) jak i wyniki badań statystycznych nad wydajnością brygad, uwzględniających losowość procesów.

Występujące w praktyce budowlanej ograniczenia uwzględnia się w pierwszej fazie na etapie ustalania danych wejściowych.

Dane wejściowe:

1. Wektor planowanych do wykonania procesów roboczych $[R_j]$,
2. Zbiór przewidywanych do wzniesienia obiektów $\{Q_i\}$,
3. Macierz pracochłonności wykonania procesów na obiektach $P = [P_{ij}]$
4. Wielkość i rodzaj środków jakimi może dysponować realizator, tj. ilość brygad roboczych, specjalność zawodowa brygady, ilość pracowników, itp.,
5. Ograniczenia wykonawcze np.:
 - dyrektywny czas realizacji;
 - wagi wskaźników decyzyjnych;
 - wielkości zadań inwestycyjnych i ich ilość, realizowanych przez organizację budowlaną (przedsiębiorstwo, kierownictwo budowy, kierownictwo grupy robót, itp.).

Planowanie realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych, można przeprowadzić wg procedury przedstawionej na rys. 1. Prezentowany model graficzny systemu określa kolejność i powiązania między podsystemami oraz umożliwia sterowanie procesem planowania.

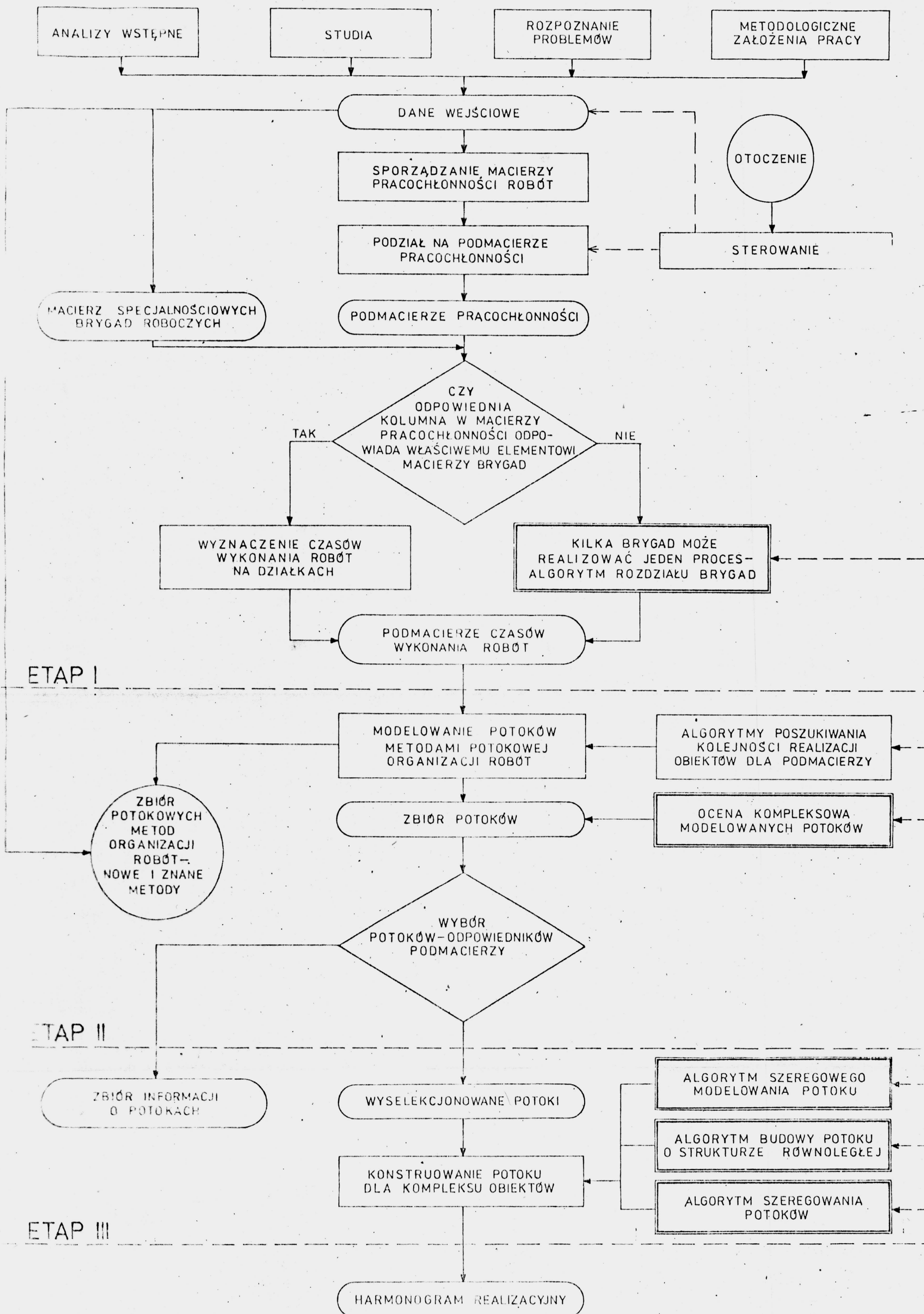
Pierwszy etap działania polega na utworzeniu zbioru podmacierzy czasów trwania robót, uwzględniających dobór składu brygad roboczych oraz ich rozdział na przewidywane do wykonania obiekty. Budowane podmacierze są modelami potoków nie uwzględniającymi sprzężeń czasowych, porządkujących planowane roboty w czasie i przestrzeni. Z zagadnieniem tym wiąże się również konieczność rozwiązania problemu alokacji zasobów np. brygad roboczych jednej specjalności. Opracowano algorytm przydziału brygadam frontów roboczych.

W drugim etapie przeprowadzone zostają działania związane z ustaleniem kolejności realizowanych obiektów z uwzględnieniem potokowych metod organizacji robót. Ustalenie kolejności wierszy w każdej podmacierzy daje możliwość porównania potoków formowanych różnymi metodami organizacji robót, oceny kompleksowej [4, 11] i wyboru z uwzględnieniem wag kryteriów elementarnych.

Ostatni etap polega na tworzeniu potoku obejmującego cały kompleks obiektów. Następuje łączenie podmacierzy potoków przy wykorzystaniu opracowanych i przedstawionych w pracy algorytmów, tworzących potok o strukturze: równoległej, szeregowej lub ich kombinacji. Opracowany algorytm szeregowania potoków rozwiązuje problem kolejnościowy dla kompleksu obiektów.

Wynikiem procedury optymalizacyjnej jest plan realizacji kompleksu obiektów określający powiązania w czasie i przestrzeni robót planowanych do wykonania, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania brygad roboczych w potoku.

Przedstawiony ogólny schemat procedury jest otwarty, umożliwia sterowanie procesem realizacyjnym i może być uzupełniony o nowe algorytmy uwzględniające szczególne przypadki praktyki budowlanej.



RYS.1 SCHEMAT BLOKOWY SYSTEMU PLANOWANIA REALIZACJI WIELKICH KOMPLEKSÓW BUDOWLANYCH.

3. BUDOWA MACIERZY CZASÓW WYKONANIA ROBÓT DLA KOMPLEKSU OBIEKTÓW

Planowanie procesu realizacji kompleksu obiektów budowlanych wymaga wykorzystania odpowiednich modeli. W praktyce najczęściej stosowane są modele graficzne (wykresy liniowe, linie cykliczne, sieci zależności), umożliwiające przeprowadzenie przez organizatora produkcji budowlanej harmonizacji przewidywanych do wykonania robót.

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

Wynik procesu ustalania kolejności robót na obiektach przy uwzględnieniu kryterium minimalno-czasowego uzależniony jest od prawidłowo zbudowanej macierzy wejściowej.

Macierz czasów realizacji robót na frontach przez brygady robocze $T = [t_{ij}]$ $i = 1, 2, \dots, n$ $j = 1, 2, \dots, m$, ma wymiar $n \times m$.

Elementami macierzy mogą być czasy wykonania robót na frontach wyznaczone na podstawie danych normatywnych lub po opracowaniu wyników badań statystycznych:

$$t_{ij} = f (P_{ij}, B_{ij}) \quad (1)$$

gdzie:

- t_{ij} - element macierzy,
- P_{ij} - prędkość robót j na obiekcie i ,
- B_{ij} - ilościowy skład brygady roboczej wykonującej j -ty proces na i -tym obiekcie.

3.1 Technika wyznaczania czasów realizacji

Na przebieg procesów budowlanych mają wpływ pojawiające się w czasie realizacji destabilizujące czynniki. Czasy wykonania robót na poszczególnych frontach mogą ulegać odchyłkom od wartości wyznaczonych na podstawie danych normowych. Ważnym więc zadaniem jest możliwie dokładne wyznaczenie czasów realizacji robót na frontach (t_{ij}) z uwzględnieniem losowego charakteru procesu realizacji.

Badania czasów wykonania robót na frontach wymagają zastosowania odpowiedniej skali dokładności oraz wypełnienia warunku reprezentatywności. W budownictwie, z uwagi na małą powtarzalność realizowanych obiektów, warunek reprezentatywności próby trudny jest do spełnienia. Istnieje również niebezpieczeństwo, że zbierając statystyczną informację o danym procesie uwzględnić będziemy błędy organizacyjne czy technologiczne.

W metodzie PERT (Program Evaluation and Review Technique) założono, że czas trwania czynności jest zmienną losową o rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa według funkcji beta [18]. Przyjmęto, że czas oczekiwany (t_e) wykonania zadania wyraża się zależnością:

$$t_e = \frac{t_a + 4 t_m + t_b}{6}, \quad (2)$$

gdzie: t_a - optymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania zadania,
 t_m - najbardziej prawdopodobny czas trwania roboty,
 t_b - pesymistyczna wartość szacunkowa czasu wykonania roboty.

Niedoskonałość metody tej polega na intuicyjnym określaniu optymistycznej, pesymistycznej i najbardziej prawdopodobnej wartości czasów trwania robót. Ma to bezpośredni wpływ na dokładność prowadzonych obliczeń. Ponadto, przyjęcie założenia, że zmienne losowe są od siebie niezależne jest zbyt dużym uproszczeniem wpływającym ujemnie na niezawodność opracowywanego harmonogramu.

Wykorzystując teorię zbiorów rozmytych [23] opracowano sposób wyznaczania terminu końcowego w sieci zależności, w której czasy wykonania robót są zbiorami rozmytymi.

Zbiór rozmyty D w przestrzeni X określa funkcja udziału:

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

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

W metodach analizy sieciowej np. GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), CYKLON (Cyclic Operations Network), w celu określenia czasów trwania robót, można stosować kilkanaście rodzajów rozkładów prawdopodobieństw [68]. W praktyce wykorzystuje się najczęściej tylko kilka z nich.

Wyniki badań elementów czasu pracy, przy pomocy obserwacji migawkowych, przedstawiono w pracy [78]. Badania nad wykorzystaniem czasu pracy grupy pracowników pozwalają oceniać zmienność wydajności brygad i straty z tej przyczyny wynikające. Prezentowana metodyka może służyć wyznaczaniu czasów trwania robót na obiektach, przy wykorzystaniu metody Monte Carlo.

Interesujące wyniki z badań nad ustalaniem czasów wykonania robót przez brygady przedstawione zostały w pracy [38]. Autor, przedstawia sposób wyznaczania czasów realizacji zadań na obiektach, przy zastosowaniu wskaźnika wykonania normy czasu (ψ), z uwzględnieniem korelacji między zdarzeniami, dla zadanej wielkości frontu roboczego. Sposób ten zaleca się stosować w przypadku planowania realizacji kompleksu obiektów.

Korzystając z doświadczeń i zaleceń Centralnego Instytutu Naukowo-Badawczego i Projektowo-Eksperymentalnego Systemów Automatyki Ministerstwa Budownictwa ZSRR (CNIPIASS) - opracowanie statystycznej informacji zaleca się przeprowadzać na podstawie codziennych (zmianowych) danych o ilościowym wykonaniu produkcji budowlanej w jednostkach rzeczowych, składzie brygad roboczych, zmianowości i o przyczynach przestoju w pracy.

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

$$\psi = \frac{V_1 H_1 + V_2 H_2 + \dots + V_m H_m}{t^{zm} \cdot \sum_{j=1}^K B_j \cdot ZM} \quad (3)$$

gdzie: $V_1, V_2, \dots, V_m$ - ilość wykonanych robót w jednostkach rzeczowych;

$H_1, H_2, \dots, H_m$ - normatywna prędkość robót,

t^{zm} - czas trwania zmiany roboczej,

B_j - liczba robotników w brygadzie,

ZM - liczba zmian roboczych,
 $k = 1, 2, \dots$, liczba brygad roboczych.

Wskaźniki wykonania normy czasu (Ψ) mają rozkład prawdopodobieństw odpowiadający funkcji beta [38], której parametry zależą od charakteru roboty:

$$P(\Psi) = \frac{G(\alpha + \beta + 2)}{G(\alpha + 1) G(\beta + 1) (\beta - \alpha)^{\alpha + \beta}} (\Psi - a)^{\alpha} (b - \Psi)^{\beta} \quad (4)$$

gdzie: $G(\Psi) = \int_0^{\infty} \Psi^{-1} e^{-t} dt$ - funkcja gamma,

α, β - parametry nieznane,

a, b - minimalna i maksymalna wartość Ψ .

Traktując wskaźnik Ψ jako zmieniającą się wartość w czasie, charakterystyki statystyczne: wartość oczekiwana $M_{\Psi}(t)$, gęstość rozkładu prawdopodobieństw $P(\Psi, t)$, dyspersja $\sigma^2(t)$, korelacja $K_{\Psi}(t_1, t_2)$ należy uznać jako funkcje:

$$M_{\Psi}(t) = \frac{\sum_{j=1}^m \Psi_j(t)}{m} \quad (5)$$

$\Psi_j(t)$ - wartość wskaźnika wykonania norm j -tej roboty w chwili t ,

m - liczba prób,

$$\sigma^2(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [\Psi_j(t) - \bar{M}_{\Psi}(t)]^2}{m - 1} \quad (6)$$

$$K_{\Psi}(t_1, t_2) = \frac{\sum_{j=1}^m \{[\Psi_j(t_1) - \bar{M}_{\Psi}(t_1)][\Psi_j(t_2) - \bar{M}_{\Psi}(t_2)]\}}{m - 1} \quad (7)$$

Wyznaczone statystyczne charakterystyki służą do określenia czasu wykonania zadanych wielkości robót, czyli czasu wykonania robót na froncie. Generując wartości losowe z zadany rozkładem prawdopodobieństw (np. metodą Neymana) z uwzględnieniem korelacji dziennych wydajności, można wyznaczyć:

$$\psi_j^*(t).$$

$$V_j = \psi_j^* \frac{t^{zm} B_j}{H_j} \quad (8)$$

gdzie: ψ_j^* - zmodyfikowany wskaźnik wykonania norm czasu j-tego dnia,

V_j - ilość robót wykonana j-tego dnia,

t^{zm} - czas trwania zmiany,

B_j - ilość robotników w brygadzie,

H_j - norma czasu zgodnie z KNP.

Przyjmując kolejno ze zbioru zmodyfikowanych wskaźników ψ_j^* ($j = 1, 2, \dots$) i wyznaczając dla każdej wartości ilość robót, otrzymujemy ciąg $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots$. Sumując kolejno uzyskujemy ciąg monotoniczny:

$$V'_1 = V_1;$$

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

$$\dots\dots\dots$$

$$V'_j = V_1 + V_2 + \dots + V_j \quad (9)$$

w którym znajdziemy taką V'_j , że w dniu $t = j$ będzie równa w przybliżeniu zadanej objętości robót V_0 ,

$$V_0 = \sum_{j=1}^t V_j \quad (10)$$

Modelowanie statystyczne procesu realizacji kompleksu obiektów umożliwia określenie sumy czynników losowych destabilizujących proces wznoszenia i ich prawdopodobieństwo występowania, co ma istotne znaczenie na etapie harmonogramowania, przy określeniu niezawodności procesu realizacji lub przy projektowaniu realizacji z zadaniem poziomem niezawodności.

Warunkiem wyznaczenia faktycznych czasów realizacji robót na obiektach jest przeprowadzenie obserwacji i zebranie danych statystycznych na obiektach reprezentatywnych i realizowanych poprawnie, zgodnie z zasadami sztuki budowlanej, bez przerw w pracy spowodowanych brakiem materiałów, itp.

Podstawowym więc problemem, który należy rozwiązać aby prawidłowo planować realizację kompleksu obiektów jest wyznaczenie elementów macierzy wejściowej. Brak aktualnej bazy normatywnej, norm pracy technicznie uzasadnionych, uniemożliwia opracowywanie realnych harmonogramów realizacyjnych. Zadanie to powinny jak najszybciej podjąć instytucje do tego powołane zarówno centralne, jak i działy normowania i płac przedsiębiorstw budowlanych.

3.2 Zmodyfikowany zapis macierzowy

Przystępując do formowania macierzy czasów wykonania robót na frontach należy utworzyć: zbiór działek roboczych $d_i = \{d_i\} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ oraz zbiór częściowych potoków $p_j = \{p_j\} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$.

Liczba działek roboczych oraz ich wielkość uzależniona jest od konstrukcji obiektów, przyjętej technologii robót, maszyn i urządzeń stosowanych podczas realizacji, składu osobowego i ilości brygad oraz wielkości zadania inwestycyjnego. Przyjmując zalecenia publikowane w wielu pracach związanych z tematyką [32, 38, 82, 84] oraz wykorzystując doświadczenia z praktyki przedsiębiorstw budowlanych, przyjęto przy podziale obiektów na fronty robocze, zasadę bezkolizyjnej pracy brygady na działce. Ma ona bezpośredni wpływ na ilość i wielkość frontów roboczych wyznaczanych na danym obiekcie.

Częściowe potoki p_j powstają w wyniku scalenia robót, przewidywanych do wykonania przez specjalizowane brygady, zgodnie z zasadami technologii i organizacji robót.

Zbiór działek roboczych $\{d_i\}$ oraz częściowych potoków $\{p_j\}$ można traktować jako zbiór argumentów i wartości funkcji, przyporządkowując elementom ze zbioru działek kolejno przewidywane do wykonania roboty ze zbioru częściowych potoków.

Wynikiem przyporządkowania jest macierz czasów wykonania robót na frontach roboczych $T = [t_{ij}]$. Elementy macierzy można wyznaczyć posługując się aktualną bazą normatywną lub traktując czasy wykonania robót jako zmienne losowe, sposobami przedstawionymi w p. 3.1.

Przystępując do budowy macierzy, najdogodniej jest podzielić daną operację na etapy. W etapie pierwszym sporządzamy serię wek-

torów kolumnowych, w których przyporządkowujemy danej robocie, wykonywanej przez specjalizowaną brygadę, działki, wyznaczając dla każdego elementu wektora czas wykonania.

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

Jak wykazały obserwacje procesu realizacji dokonane na licznych budowach w kraju i za granicą (ZSRR), ilości elementów w wektorach mogą być różne, na skutek niejednakowej wielkości działek roboczych oraz ich ilości w kompleksie. Roboty ziemne prowadzone są najczęściej na działce obejmującej rzut całego obiektu lub części oddzielonej przerwą dylatacyjną, natomiast np. roboty wykończeniowe wykonywane są zwykle na działce obejmującej w rzucie poziomym segment budynku i kondygnację w rzucie pionowym. Wynika stąd konieczność uporządkowania macierzy czasów wykonania robót, drogą wprowadzania tzw. "robot zerowych" (zerowych elementów w macierzy).

W etapie drugim budujemy macierz czasów wykonania robót przez specjalizowane brygady (T), łącząc wektory kolumnowe w ustalonym porządku, wynikającym z technologii prowadzonych robót.

Podczas budowy macierzy wejściowej, w szczególnych przypadkach uwzględniających zerowe elementy lub niejednakowe ilości elementów w kolumnach, mogą pojawiać się trudności w obliczaniu charakterystyk czasowych modelowanego potoku oraz w zastosowaniu przedstawionych w [2, 6, 8, 9, 71] algorytmów.

Rozwiązanie powyższego zagadnienia, w przypadku niejednakowej ilości elementów w podmacierzach kolumnowych możliwe jest:

- drogą zwiększenia wielkości działek, sumując czasy wykonania robót, do wielkości działki największej w obiekcie lub kompleksie;
- przez podział macierzy czasów wykonania robót na podmacierze o jednakowej ilości wierszy.

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

- z niezerowymi elementami w macierzy;
- z zerowymi elementami w macierzy.

W budownictwie mieszkaniowym np. macierz czasów wykonania robót przez specjalizowane brygady na danym obiekcie ma najczęściej postać:

macierz wejściowa:

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

W danej macierzy trzy pierwsze kolumny oznaczają, że roboty wykonywane są na działkach obejmujących cały obiekt. Pozostałe roboty tj. Nr 4, 5, ..., m wykonywane są na działkach (wiersze w macierzy) stanowiących część obiektu.

Stosowana dotychczas forma zapisu danych wejściowych [2, 6, 8, 9, 71], polegająca na wprowadzeniu elementów zerowych do macierzy w sposób przedstawiony powyżej może prowadzić do błędnych wyników.

Model ten służyć może jedynie do wyznaczania charakterystyk czasowych potoku uformowanego z wykorzystaniem potokowych metod organizacji robót.

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego dla kompleksu obiektów (niezależnych segmentów) możliwie jest drogą:

- podziału macierzy na podmacierze
lub
- ęcalania czasów wykonania robót, do wielkości działki największej (sumowania elementów w kolumnach macierzy do odpowiednio najmniejszej liczby elementów).

4. POTOKOWE METODY ORGANIZACJI ROBÓT BUDOWLANYCH

Organizacja zapewnia powiązanie w czasie i przestrzeni robót realizowanych przez specjalizowane brygady na działkach (obiektach). Powiązania występujące między robotami określają warunki technologiczne i organizacyjne jakie należy zapewnić przed rozpoczęciem realizacji danego procesu.

W pracy [70] prezentowane są dwie grupy powiązań: technologiczne i organizacyjne. Stanowią one podstawę do budowy modeli realizacji przedsięwzięć budowlanych.

Powiązania występujące między robotami można sformalizować matematycznie i przypisać im wartości liczbowe. W pracach [2, 3, 5, 8, 9, 71] postulowane jest wprowadzenie pojęcia "sprzężenia czasowe", czynnika umożliwiającego klasyfikację metod organizacji robót wg jednolitego kryterium. Wyszczególniono w nich następujące sprzężenia:

- między środkami realizacji (zasobami);
- między frontami roboczymi;
- stopniowe (skośne wstępujące^{*/}, diagonalne) ;
- odwrotne stopniowe (skośne^{*/}, odwrotne diagonalne).

W modelach organizacyjnych występują również sprzężenia tranzytowe (przekątniowe).

Uwzględnienie wyżej wymienionych sprzężeń czasowych, w modelach realizacyjnych, umożliwiło wyróżnienie następujących potokowych metod organizacji robót budowlanych:

- z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji (M1),
- z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi (M2),
- z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi (M3),
- z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami i sprzężeń stopniowych (M4),
- z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami i odwrotnych sprzężeń stopniowych (M5),
- z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych (M6).

^{*/} Propozycja nazwy K. Czeplińskiego.

4.1 Podstawowe pojęcia

Metody organizacji robót mogą charakteryzować się dwiema cechami: stopniem jednoczesności wykonania robót różnych rodzajów i stopniem równoległości wykonania robót jednego rodzaju. W przypadku, gdy roboty różnych rodzajów wykonywane są niejednocześnie oraz występuje brak równoległości w wykonaniu robót jednego rodzaju, mamy do czynienia z potokowymi metodami organizacji robót [71]. W pracach [32, 67, 81, 82, 84] autorzy posługiwali się również nazwami: metoda pracy równomiernej, rytmicznej, rytmiczno-równomiernej lub potokowa.

Roboty budowlane (częściowe procesy), wykonywane podczas realizacji obiektów budowlanych potokowymi metodami organizacji robót, tworzą potok charakteryzujący się okresami: rozwijania, ustabilizowanej pracy i zanikania [82]. Roboty jednego rodzaju (częściowe procesy), np. ziemne, betonowe, montażowe, które są wykonywane kolejno na działkach (frontach roboczych) tworzą częściowe potoki. Podobnie, zbiór robót różnych rodzajów niezbędnych do realizacji danego obiektu, określany jest też jako częściowy kompleks lub częściowy front [71]. Inaczej mówiąc, jest to proces budowlany w wyniku którego powstaje budowla.

W literaturze krajowej [32, 67, 81, 82, 84] 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 związane są 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 [3, 71]. W potokach rytmicznych czasy wykonania robót są jednakowe, w nierytmicznych różne, natomiast w wielorytmicznych są jednakowe w częściowych potokach, lecz różne pomiędzy nimi.

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

- sprzężenia między środkami realizacji wiążą roboty jednego rodzaju, występujące w częściowym potoku;

- sprzężenia między frontami roboczymi (działkami), wiązą występujące w ciągu technologicznym roboty różnych rodzajów, wykonywane na tej samej działce;
- sprzężenia stopniowe (skośnie wstępujące), wiązą roboty występujące w sąsiednich częściowych potokach, na danej i poprzedniej działce (froncie);
- sprzężenia odwrotne stopniowe (skośnie), wiązą roboty na danej działce roboczej, w danym częściowym potoku, z robotami na następnej działce, w poprzedzającym częściowym potoku;
- sprzężenia tranzytowe (przekątniowe), wiązą roboty danego rodzaju wykonywane na danej działce (froncie), z robotami poprzedzającymi w porządku technologicznym, prowadzonymi na poprzedniej działce.

4.2 Charakterystyka znanych metod potokowej organizacji robót

Potokowa metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji

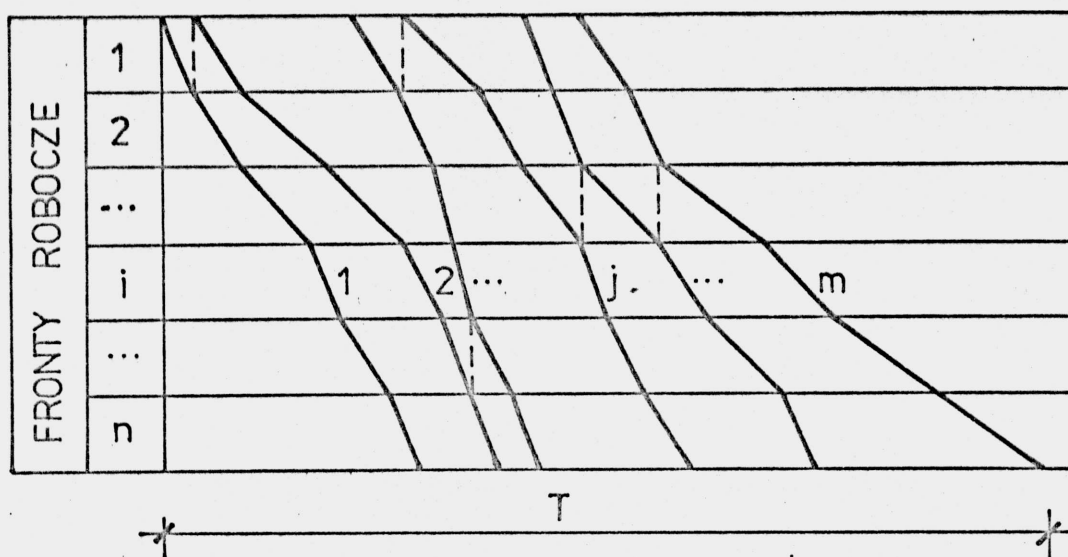
Metoda ta, zapewnia ciągłość pracy brygad roboczych, maszyn i urządzeń. Specjalizowane brygady przechodzą bez przerw, z działki na działkę, zachowując ciągłość pracy w częściowych potokach. Jest to często spotykane ograniczenie organizacyjne.

Modelowanie potoku powyższą metodą przeprowadza się w dwu etapach. Wyznacza się racjonalną kolejność wykonywania robót na działkach (obiektach), z uwzględnieniem minimalno-czasowego kryterium, a następnie oblicza się czasowe charakterystyki niezbędne do sporządzania modelu graficznego (wykresów Gantta, linii cyklicznych, sieci zależności).

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego można znaleźć wykorzystując zmodyfikowany algorytm Johnsona SM. 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 brygad roboczych, powoduje najczęściej przestoje frontów roboczych. Wyeliminować je można jedynie w przypadku modelowania potoków rytmicznych.

W potoku formawanym tym sposobem, wraz ze wzrostem ilości działek roboczych, zwiększa się okres rozwinięcia częściowych potoków, tj. czas jaki upływa pomiędzy wejściem na plac budowy kolejnych brygad roboczych. Może to powodować, jak wykazały przeprowadzone przez autora badania [45, 46], znaczne wydłużenie czasu realizacji zadania. Jest on z reguły dłuższy od czasu realizacji kompleksu obiektów, planowanych z wykorzystaniem metody, uwzględniającej równocześnie sprzężenia między środkami realizacji i frontami roboczymi [45].



Rys. 2 Schemat potoku z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji.

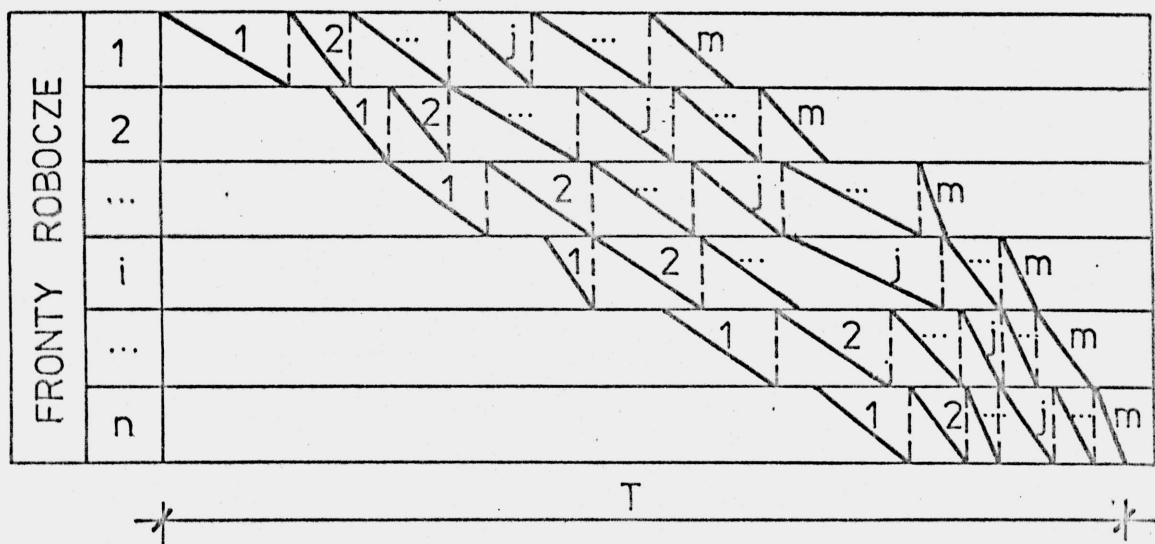
Potokowa metoda organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

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 poto-

ku (cyklogramy) możemy zauważyć, że na czas realizacji kompleksu robót nie ma wpływu środkowy blok procesów budowlanych. Zostało to wykorzystane w opracowanym algorytmie poszukiwania kolejności realizowanych obiektów, zapewniających najkrótszy czas realizacji. Im większa część robót zostaje "ukryta" pod pierwszym procesem, tym będzie mniejsza 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 dopuścimy przerwy w pracy brygad. Mogą one przechodzić z działki na działkę natychmiast po zejściu z niej poprzedzającej brygady. Warunek ten możliwy jest do wypełnienia, gdy dana brygada 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 [45].



Rys. 3 Schemat potoku z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi.

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

Najkrótszy czas realizacji kompleksu robót zapewnia powyższa metoda. Równoczesne uwzględnienie obu sprzężeń czasowych wywołuje w modelu potoku drogę krytyczną. Sumując czasy wykonania robót pojawiających się na ścieżce krytycznej, możemy wyznaczyć czas trwania robót (T).

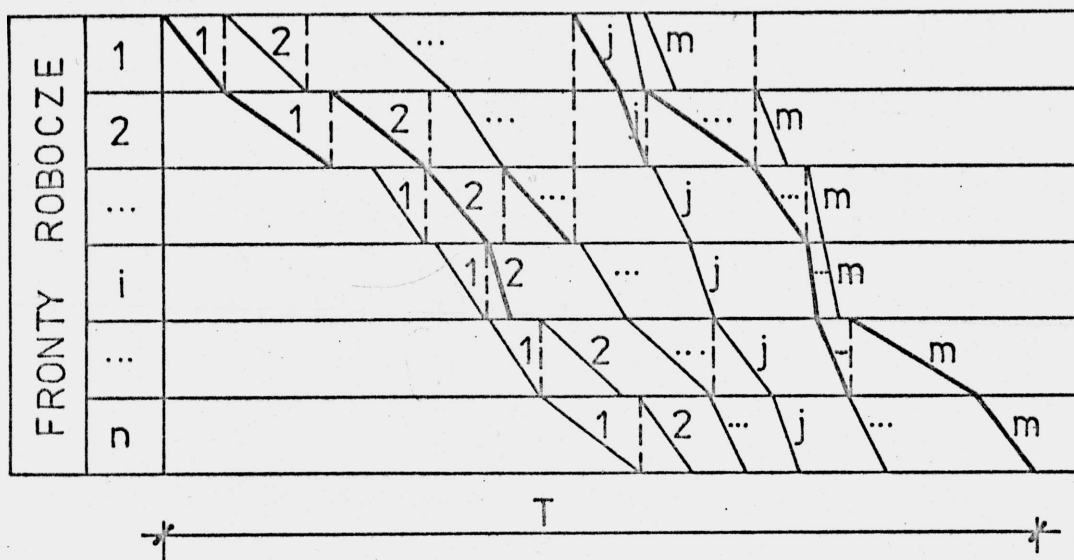
Zmieniając kolejność prowadzenia robót na frontach (obiektach) dokonujemy przestawień robót na drodze krytycznej, a tym samym ulega zmianie czas trwania realizacji.

Minimalny czas trwania realizacji kompleksu obiektów można osiągnąć, po ustaleniu takiej ich kolejności, gdy 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.

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego odbywa się z wykorzystaniem metody podziału i ograniczeń, która umożliwia ukierunkowane przeszukanie przestrzeni rozwiązań.

Po ustaleniu racjonalnej kolejności prowadzenia robót na działkach (obiektach), wyznacza się charakterystyki czasowe potoku, uwzględniając równocześnie dwa rodzaje sprzężeń: między środkami realizacji i frontami roboczymi.

W metodzie tej, dopuszcza się przerwy w pracy brygad, jak również przestoje frontów roboczych. Umożliwia to utworzenie takiej drogi krytycznej, która zapewnia najkrótszy czas realizacji zadania inwestycyjnego. Możliwość niezwłocznego wykorzystania brygad roboczych na zwalnianych działkach, bez ograniczeń dotyczących ciągłości ich pracy, znacznie skraca okres przestoju frontu lub oczekiwanie brygady na zatrudnienie. Osiągnięcie najkrótszego czasu realizacji kompleksu obiektów, prezentowaną metodą, powoduje jednak trudności w planowaniu równomiernego i ciągłego wykorzystania środków realizacji [45].



Rys. 4 Schemat potoku z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Potokowe metody organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi oraz sprzężeń stopniowych lub odwrotnych stopniowych

Algorytm poszukiwania kolejności realizowanych obiektów dla tych metod jest podobny do przedstawionego powyżej. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na sposobie modelowania potoku. Wyznacza się dla każdej z nich charakterystyki czasowe potoku, uwzględniając odpowiednio występujące sprzężenia.

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

Potokowa metoda organizacji robót z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych

W danej metodzie, roboty jednego stopnia^{K/} tworzą diagonalę, czas trwania których jest równy czasom trwania robót krytycznych [10, 12]. Zmiana kolejności prowadzenia robót na poszczególnych

^{K/} Robotami jednego stopnia nazywamy roboty, mające w macierzy jednokową sumę indeksów.

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

Podstawowe charakterystyki czasowe modelowanego potoku wyznacza się uwzględniając odpowiednio sprzężenia stopniowe i odwrotne stopniowe.

4.3 Nowe warianty potokowych metod organizacji robót

W pracach [2, 3, 6, 8, 9, 71] przedstawiono sześć potokowych metod organizacji robót, utworzonych przez usystematyzowanie występujących między robotami sprzężeń czasowych. Zaprezentowano w nich sposoby wyznaczania kolejności robót na działkach oraz obliczania charakterystyk czasowych (najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót w potoku). W nowych wariantach potokowych metod organizacji procedura ustalania charakterystyk czasowych jest podobna jak w [2, 3, 6, 8, 9, 71], dlatego jej się tu nie prezentuje.

Uwzględniając ograniczenia mogące wystąpić w praktyce budowlanej dostrzeżono, że prezentowana interpretacja pojęcia sprzężenia czasowego jest niepełna i ograniczona ona obszar zastosowania przedstawionych metod. Postuluje się rozszerzenie tego pojęcia i przyjęcie sprzężeń czasowych wyznaczonych z możliwych kombinacji najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót.

Tworząc model graficzny potoku np. sieć zależności można zauważyć, że w niektórych przypadkach, najwcześniejsza i najpóźniejsza terminy rozpoczęcia lub zakończenia robót mogą być jednakowe. Było to między innymi, punktem wyjścia do opracowania założeń metody z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji oraz metody z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi. Uznano, że sprzężenia powinny powiązać jedynie termin zakończenia roboty t_{ij} z rozpoczęciem roboty następnej w ustalonym porządku technologicznym $t_{i,j+1}$ lub z $t_{i+1,j}$.

Oznaczając sprzężenia - S, można wyznaczyć :

$$S = t_{i,j+1}^{wr} - t_{ij}^{wz} ; \quad (12)$$

oraz $S = t_{i+1,j}^{wr} - t_{ij}^{wz} , \quad (13)$

gdzie: t_{ij}^{wz} - najwcześniejszy termin zakończenia roboty j na obiekcie i,

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

Rozpatrując kombinacje sprzężeń czasowych w każdej prezentowanej metodzie potokowej organizacji robót, można wyszczególnić wiele wariantów, związanych ze sobą podstawowym założeniem metody.

W zbiorze wariantów metody z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji można przedstawić następujące przypadki:

- łącząc terminy rozpoczęcia robót w częściowym potoku,

$$t_{ij}^{wr} = t_{ij}^{pr} \quad i \quad t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{pz} , \quad (14)$$

więc: $t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j}^{wr} , \quad (15)$

gdzie: t_{ij}^{wr} - najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i;

t_{ij}^{pr} - najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i;

t_{ij}^{wz} - najwcześniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i;

t_{ij}^{pz} - najpóźniejszy termin zakończenia roboty j na froncie i;

- łącząc terminy zakończenia robót w częściowym potoku:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wz} \quad (16)$$

- łącząc terminy rozpoczęcia robót i ich zakończenia:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j}^{wz} \quad (17)$$

- łącząc terminy zakończenia robót i ich rozpoczęcia:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wr*} \quad (18)$$

Analizując wzór (14) możemy dostrzec, że w metodzie z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji zapewniamy ciągłość prowadzenia robót (niekoniecznie ciągłość pracy brygad). Przy tym założeniu nie uzyskamy rezerw czasu w częściowym potoku, a więc praktycznie najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia robót pokrywają się oraz najpóźniejsze i najwcześniejsze terminy zakończenia robót są sobie równe. Jest to konieczne stwierdzenie ograniczające ilość możliwych kombinacji oddziaływania sprzężeń.

Tabela 1

Warianty potokowej metody organizacji z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji

		S C H E M A T	
łączącymi terminy rozpoczęcia robót w częściowym potoku	$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j}^{wr}$ (15)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy zakończenia robót w częściowym potoku	$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wz}$ (16)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy rozpoczęcia robót i zakończenia	$t_{ij}^{wr} + t_{i+1,j}^{wz}$ (17)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy zakończenia robót i rozpoczęcia	$t_{ij}^{wz} = t_{i+1,j}^{wr}$ (18)	i-1	
		i	
		i+1	

*/ Przypadek prezentowany w literaturze.

Oznaczenia:



t_{ij} - czas trwania roboty j na działce i ;

wr - najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty;

pr - najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty;

wz - najwcześniejszy termin zakończenia roboty;

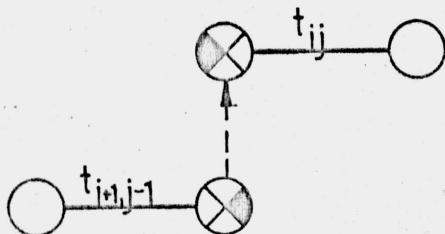
pz - najpóźniejszy termin zakończenia roboty;



- zaciemnione pole określa odpowiedni termin rozpoczęcia (zakończenia) roboty, która związana jest rozpatrywanym sprzężeniem,



- rozpatrywane sprzężenie,



Schemat ten oznacza, że najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty t_{ij} związany jest z najpóźniejszym terminem zakończenia roboty $t_{i+1,j-1}$.

Wzór (15) jest konsekwencją przyjęcia zdeterminowanych czasów rozpoczęcia i zakończenia robót. Dotyczy on jednego rodzaju robót j , wykonywanego na kolejnych frontach roboczych $i, i+1$. Wzór ten można interpretować jako nakaz jednoczesnego rozpoczęcia robót jednego rodzaju na kolejnych frontach $i, i+1$. Mogą to być np. dwie brygady jednej specjalności wykonujące roboty na dwóch frontach.

Interpretacja wzoru (16) może być identyczna, z tą jednak różnicą, że założony został warunek jednoczesności zakończenia robót jednego rodzaju przez brygady o jednej specjalności, na kolejnych frontach.

Wzór (17) narzuca konieczność powiązania terminów rozpoczęcia robót danego rodzaju na danym froncie z terminem ich zakończenia na sąsiednim froncie. Zależność (18) nakłada warunek odwrotny.

Autor, przytaczając te ograniczenia dostrzegł potrzebę wprowadzenia uogólnień i ujęcia występujących w praktyce budowlanej przypadków np.: pojawienia się dodatkowych brygad jednej specjalności i konieczności ich wykorzystania, konieczności równoczesnego zejścia brygad z obiektów itp.

W grupie wariantów metody z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi można uwzględnić sprzężenia łączące odpowiednio:

- terminy rozpoczęcia robót w częściowym kompleksie:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i,j+1}^{wr} \quad (19)$$

- terminy zakończenia robót w częściowym kompleksie:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i,j+1}^{wz} \quad (20)$$

- terminy rozpoczęcia robót i ich zakończenia:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i,j+1}^{wz} \quad (21)$$

- terminy zakończenia robót i ich rozpoczęcia:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i,j+1}^{wr*} \quad (22)$$

Tabela 2

Warianty potokowej metody organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

		S C H E M A T	
łączącymi terminy rozpoczęcia robót w częściowym kompleksie	$t_{ij}^{wr} = t_{i,j+1}^{wr}$ (19)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy zakończenia robót w częściowym kompleksie	$t_{ij}^{wz} = t_{i,j+1}^{wz}$ (20)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy rozpoczęcia i zakończenia	$t_{ij}^{wr} = t_{i,j+1}^{wz}$ (21)	i-1	
		i	
		i+1	
łączącymi terminy zakończenia robót i rozpoczęcia	$t_{ij}^{wz} = t_{i,j+1}^{wr}$ (22)	i-1	
		i	
		i+1	

Analizując wzór (19) zauważymy, że nałożony został warunek równoczesnego rozpoczęcia roboty j oraz $j+1$ na froncie i . W praktyce może zdarzyć się przypadek, kiedy zachodzi konieczność wykonania dwóch procesów j oraz $j+1$ na danym froncie roboczym, przez dwie brygady. Fakt ten wyraża analizowana zależność.

Wzór (20) nakłada warunek równoczesnego zakończenia robót j oraz $j+1$ na danym froncie roboczym. Równoczesne zajęcie z danego frontu roboczego, np. dwóch zespołów jednej brygady roboczej może wynikać z uwarunkowań organizacyjnych.

Zależność (21) zakłada wykonanie roboty $j+1$ przed robotą j na danym froncie roboczym i . Wzór ten może nie odgrywać roli w procesie modelowania kompleksu robót. Zjawisko to daje się jednak zaobserwować podczas analizy harmonogramów powykonawczych zrealizowanych obiektów budowlanych.

Przypadek opisany zależnością (22) określa warunki bezkolizyjnej pracy brygad roboczych na frontach. Po zakończeniu roboty j na danym froncie i natychmiast rozpoczyna się robota $j+1$. Zachowujemy tym sposobem ciągłość pracy na frontach roboczych. Logło to u podstaw modelowania potoku metodą z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi

W grupie wariantów metody z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi, rośnie ilość możliwych wariantów oddziaływania sprzężeń. Wynika to z potrzeby ujęcia występujących w modelu najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót. Tworząc zbiór metod możemy łączyć odpowiednio terminy rozpoczęcia robót, terminy zakończenia i kombinacje terminów rozpoczęcia i zakończenia robót.

Uzyskamy wówczas następujące przypadki:

- łącząc terminy rozpoczęcia robót,

$$\text{dla najwcześniejszych terminów: } t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wr}; t_{i,j-1}^{wr} \}; (23)$$

$$\text{dla najpóźniejszych terminów: } t_{ij}^{pr} = \min \{ t_{i+1,j}^{pr}; t_{i,j+1}^{pr} \}; (24)$$

- łącząc terminy zakończenia robót,

$$\text{dla najwcześniejszych terminów: } t_{ij}^{wz} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz}; t_{i,j-1}^{wz} \}; (25)$$

$$\text{dla najpóźniejszych terminów: } t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i+1,j}^{pz}; t_{i,j+1}^{pz} \}; (26)$$

Tabela 3

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

Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i-1 \\ i \end{matrix}$	
	(23)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & t_{i+1,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
	(24)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & t_{i+1,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
Łączących terminy zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i-1 \\ i \end{matrix}$	
	(25)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & t_{i+1,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
	(26)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & t_{i+1,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
Łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i-1 \\ i \end{matrix}$	
	(27)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i-1 \\ i \end{matrix}$	
	(28)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	$\begin{matrix} i \\ i+1 \end{matrix}$	

	(29)	Wr WZ $t_{i,j-1}$ pr pz Wr WZ $t_{i,j-1}$ pr pz Wr WZ $t_{i-1,j}$ pr pz Wr WZ t_{ij} pr pz	
	dla naj- później- szych (30)	Wr WZ t_{ij} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j}$ pr pz Wr WZ t_{ij+1} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j+1}$ pr pz	
	(31)	Wr WZ t_{ij} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j}$ pr pz Wr WZ t_{ij+1} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j+1}$ pr pz	
	(32)	Wr WZ t_{ij} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j}$ pr pz Wr WZ t_{ij+1} pr pz Wr WZ $t_{i+1,j+1}$ pr pz	

dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wz} \}; \quad (27)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wr} \}; \quad (28)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wr} ; t_{i,j-1}^{wz} \}; \quad (29)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} \}; \quad (30)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pr} \}; \quad (31)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pz} \}; \quad (32)$$

Zależność (23) nakłada warunek rozpoczęcia roboty j na froncie, nie wcześniej niż rozpocznie się robota j na poprzednim froncie $i-1$ oraz robota $j-1$ na tym samym froncie i . Działające sprzężenie może wynikać z uwarunkowań technologicznych lub organizacyjnych, np. konieczności podziału brygady roboczej na zespoły pracujące na sąsiednich frontach i oraz $i-1$, lub też konieczności pracy dwóch brygad różnych specjalności na danym froncie. Wzór (24) określa tę zasadę dla najpóźniejszych terminów rozpoczęcia robót.

Zależność (25) nakłada warunek zakończenia roboty j na froncie i , nie wcześniej niż zostanie zakończona robota $j-1$ na tym froncie oraz robota j na froncie poprzednim. Może to wynikać, w warunkach placu budowy, z konieczności równoczesnego zejścia brygad j (jednej specjalności) z frontów $i, i-1$, lub też z konieczności zakończenia dwóch rodzajów robót np. wykonania instalacji wod.-kan. i c.o. na jednym froncie (obiekcie).

Zależność (26) wiąże najpóźniejsze terminy zakończenia robót na następnym froncie $i+1$, przy wykonywaniu j -tej roboty lub na danym froncie roboty następnej, w porządku technologicznym, $j+1$. Warunek równoczesnego zakończenia robót, dla najpóźniejszych terminów, może wynikać z występujących ograniczeń organizacyjnych powstających np. na skutek potrzeby równoczesnego zakończenia pracy dwóch brygad j i $j+1$ pracujących na frontach i oraz $i+1$, w celu skierowania ich na inny obiekt.

Wzór (27) oznacza, że najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty na froncie i może rozpocząć się po najwcześniejszym zakończeniu roboty j na poprzednim froncie $i+1$ oraz po najwcześniejszym zakończeniu roboty $j-1$ na froncie i . Wymóg ten pojawia się np. w przypadku, gdy dysponujemy po jednej brygadzie danej specjalności i chcemy rozpocząć roboty na froncie natychmiast, gdy zwolni się front oraz brygada zakończy robotę na froncie poprzednim $i-1$. Może to spowodować przerwy w pracy brygady roboczej oczekującej na zwolnienie frontu lub oczekiwanie frontu na nadejście brygady. Oddziaływanie sprzężeń spowoduje jednak, mimo przerw w pracy brygady lub przestojów frontów, że termin realizacji kompleksu robót będzie najkrótszy ze wszystkich możliwych [45]. Zakładamy oczywiście niezmienną intensywność pracy brygad na fron-

tach i brak destabilizacyjnych oddziaływań otoczenia.

Wzór (28) zapewnia, że najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty j na froncie i może nastąpić, gdy zakończona zostanie robota j na froncie $i-1$, dla najwcześniejszych terminów oraz zostanie rozpoczęta robota $j-1$ na froncie. Brygada wykonująca robotę j na froncie $i-1$ przechodzi na front i , nie wcześniej niż rozpoczęcie się robota $j-1$ na danym froncie, wykonywana przez specjalizowaną brygadę $j-1$.

Przypadek (29) narzuca konieczność rozpoczęcia roboty j na froncie i , gdy zostanie zakończona robota $j-1$ na tym froncie oraz rozpoczęta robota j na poprzednim $i-1$. Warunek ten zapewnia zwolnienia się frontu i przed rozpoczęciem na nim robót, przy konieczności jednoczesnego rozpoczęcia j -tego rodzaju robót na dwu sąsiednich frontach. Może to być w szczególnym przypadku spowodowane np. potrzebą rozdzielania brygady wykonującej roboty j i skierowania jej na dwa fronty.

Zależność (30) nakłada warunek uzależniający termin zakończenia roboty j na froncie i od terminu rozpoczęcia roboty $j+1$ na tym froncie lub terminu rozpoczęcia j -tej roboty na froncie następnym $i+1$, dla najpóźniejszych terminów. Zapewnia on możliwość natychmiastowego rozpoczęcia robót $j+1$ na danym i -tym froncie, po zakończeniu na nim roboty j . Eliminujemy przestój frontu, lub brygada wykonująca j -ty rodzaj robót przechodzi bez przerw na następny front pracy $i+1$.

Wzór (31) narzuca konieczność rozpoczęcia roboty $j+1$ na danym froncie i po zakończeniu na nim roboty j lub nakazuje równocześnie zakończyć dany rodzaj robót j na frontach i oraz $i+1$. Warunek jednoczesnego zakończenia robót na sąsiednich frontach, może być spowodowany ograniczeniami organizacyjnymi, np. koniecznością przetrzucania brygad danej specjalności j pracujących na frontach i oraz $i+1$ na większy front, wymagający zwiększenia liczby pracowników, wykonujących na nim dany rodzaj robót.

Zależność (32) zapewnia rozpoczęcie robót j -tego rodzaju na froncie $i+1$ natychmiast po zakończeniu j -tej roboty na poprzednim froncie lub nakazuje równoczesne zakończenie robót j oraz $j+1$ na danym froncie i . Wzór ten wynika z konieczności uwzględnienia ograniczeń organizacyjnych, np. konieczności przyspieszenia robót

i potrzebie przemieszczenia brygad wykonujących robotę j oraz j+1 na inny front lub zapewnieniu ciągłości pracy brygadzie roboczej przy przejściu z frontu i na i+1.

Uwzględnienie w pozostałych metodach sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych wpływa na pojawienie się dodatkowych kombinacji. Przeglądając możliwe sprzężenia, z udziałem czterech

ich rodzajów (między środkami realizacji, frontami roboczymi, stopniowych i odwrotnych stopniowych), dla najpóźniejszych i najwcześniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, możemy stwierdzić, że wystąpi po kilkanaście wariantów powiązań.

W zbiorze wariantów metody z uwzględnieniem sprzężeń między środkami, frontami i sprzężeń stopniowych

a/ łączących terminy rozpoczęcia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wr} ; t_{i,j-1}^{wr} ; t_{i+1,j-1}^{wr} \} \quad (33)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = \min \{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i-1,j+1}^{pr} \} \quad (34)$$

b/ łączących terminy zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wz} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wz} ; t_{i+1,j-1}^{wz} \} \quad (35)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = \min \{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i-1,j+1}^{pz} \} \quad (36)$$

c/ łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wb} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wz} ; t_{i+1,j-1}^{wz} \} \quad (37)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wz} ; t_{i+1,j-1}^{wr} \} \quad (38)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wr} ; t_{i+1,j-1}^{wz} \} \quad (39)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \left\{ t_{i-1,j}^{wr} ; t_{i,j-1}^{wz} ; t_{i+1,j-1}^{wz} \right\} , \quad (40)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \left\{ t_{i-1,j}^{wr} ; t_{i,j-1}^{wr} ; t_{i+1,j-1}^{wz} \right\} , \quad (41)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \left\{ t_{i-1,j}^{wz} ; t_{i,j-1}^{wr} ; t_{i+1,j-1}^{wr} \right\} , \quad (42)$$

$$t_{ij}^{wr} = \max \left\{ t_{i-1,j}^{wr} ; t_{i,j-1}^{wz} ; t_{i+1,j-1}^{wr} \right\} . \quad (43)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i-1,j+1}^{pr} \right\} , \quad (44)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i-1,j+1}^{pr} \right\} , \quad (45)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i-1,j+1}^{pr} \right\} , \quad (46)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i-1,j+1}^{pz} \right\} , \quad (47)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i-1,j+1}^{pr} \right\} , \quad (48)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i-1,j+1}^{pz} \right\} , \quad (49)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i-1,j+1}^{pz} \right\} . \quad (50)$$

Tabela 4

Warianty potokowej metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami i sprzężeń stopniowych

Łączących terminy rozpoczęcia robót:	dla najwcześniejszych terminów	wr wz wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz $t_{i,j}$ pr pz wr wz wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz $t_{i,j}$ pr pz
--------------------------------------	--------------------------------	--

wr wz

wr

wz

$t_{i,j-1}$

pr pz

$t_{i,j}$

pr pz

Tabela 4 c.d.

Łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót	(37)	dla najwcześniejszych terminów	wr WZ $t_{i-1,j-1}$ pr wr WZ $t_{i,j-1}$ pr wr WZ $t_{i-1,j}$ pr wr WZ $t_{i,j}$ pr	
		(38)	wr WZ $t_{i-1,j-1}$ pr wr WZ $t_{i,j-1}$ pr wr WZ $t_{i-1,j}$ pr wr WZ $t_{i,j}$ pr	
		(39)	wr WZ $t_{i-1,j-1}$ pr wr WZ $t_{i,j-1}$ pr wr WZ $t_{i-1,j}$ pr wr WZ $t_{i,j}$ pr	
		(40)	wr WZ $t_{i-1,j-1}$ pr wr WZ $t_{i,j-1}$ pr wr WZ $t_{i-1,j}$ pr wr WZ $t_{i,j}$ pr	

Tabela 4 c.d.

	(41)	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz wr wz $t_{i,j}$ pr pz	
	(42)	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz wr wz $t_{i,j}$ pr pz	
	(43)	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz wr wz $t_{i,j}$ pr pz	

dla naj- później- szych terminów (44)	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
(45)	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
(46)	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
(47)	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	

Tabela 4 c.d.

	(48)	<table> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i-1,j}$</td><td>$t_{i-1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> </table>	wr	wz	wr	wz	$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	t_{ij}	t_{ij+1}			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
t_{ij}	t_{ij+1}																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				
	(49)	<table> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i-1,j}$</td><td>$t_{i-1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> </table>	wr	wz	wr	wz	$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	t_{ij}	t_{ij+1}			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
t_{ij}	t_{ij+1}																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				
	(50)	<table> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i-1,j}$</td><td>$t_{i-1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> <tr> <td>wr</td><td>wz</td><td>wr</td><td>wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>pr</td><td>pz</td><td>pr</td><td>pz</td></tr> </table>	wr	wz	wr	wz	$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	t_{ij}	t_{ij+1}			pr	pz	pr	pz	wr	wz	wr	wz	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$			pr	pz	pr	pz	
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
t_{ij}	t_{ij+1}																																						
pr	pz	pr	pz																																				
wr	wz	wr	wz																																				
$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																																						
pr	pz	pr	pz																																				

Tabela 5

Warianty potokowej metody organizacji robót z uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i odwrotnych sprzężeń stopniowych

Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j+1} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
	(51)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najpóźniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j+1} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
	(52)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
Łączących terminy zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j+1} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
	(53)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
Łączących terminy zakończenia robót	dla najpóźniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j+1} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
	(54)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
Łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i-1,j-1} & t_{i-1,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j+1} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	
	(55)	$\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & t_{i,j} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j} & t_{i,j+1} \\ \text{pr} & \text{pz} \end{matrix}$	

Tabela 5 c.d.

(56)	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz wr $\textcircled{\text{WZ}}$ $t_{i-1,j}$ pr pz wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz wr $\textcircled{\text{WZ}}$ $t_{i,j-1}$ pr pz wr $\textcircled{\text{WZ}}$ $t_{i,j}$ pr pz wr wz $t_{i,j+1}$ pr pz
------	--

Tabela 5 c.d.

(62)	<table> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j-1}$</td><td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> </table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr pz	pr pz	wr wz	wr wz	wr wz	$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$	pr pz	pr pz	pr pz	
wr wz	wr wz	wr wz																		
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
wr wz	wr wz	wr wz																		
$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
(63)	<table> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j-1}$</td><td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> </table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr pz	pr pz	wr wz	wr wz	wr wz	$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$	pr pz	pr pz	pr pz	
wr wz	wr wz	wr wz																		
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
wr wz	wr wz	wr wz																		
$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
(64)	<table> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j-1}$</td><td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> </table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr pz	pr pz	wr wz	wr wz	wr wz	$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$	pr pz	pr pz	pr pz	
wr wz	wr wz	wr wz																		
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
wr wz	wr wz	wr wz																		
$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
(65)	<table> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j-1}$</td><td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> </table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr pz	pr pz	wr wz	wr wz	wr wz	$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$	pr pz	pr pz	pr pz	
wr wz	wr wz	wr wz																		
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
wr wz	wr wz	wr wz																		
$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
(66)	<table> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> <tr> <td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr> <tr> <td>$t_{i+1,j-1}$</td><td>$t_{i+1,j}$</td><td>$t_{i+1,j+1}$</td></tr> <tr> <td>pr pz</td><td>pr pz</td><td>pr pz</td></tr> </table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr pz	pr pz	wr wz	wr wz	wr wz	$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$	pr pz	pr pz	pr pz	
wr wz	wr wz	wr wz																		
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}																		
pr pz	pr pz	pr pz																		
wr wz	wr wz	wr wz																		
$t_{i+1,j-1}$	$t_{i+1,j}$	$t_{i+1,j+1}$																		
pr pz	pr pz	pr pz																		

Tabela 5 c.d.

(67)	<table><tr><td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr><tr><td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr><tr><td>pr pz</td><td>pr (pz)</td><td>pr pz</td></tr></table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr (pz)	pr pz	
	wr wz	wr wz	wr wz								
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}									
pr pz	pr (pz)	pr pz									
(68)	<table><tr><td>wr wz</td><td>wr wz</td><td>wr wz</td></tr><tr><td>t_{ij-1}</td><td>t_{ij}</td><td>t_{ij+1}</td></tr><tr><td>pr pz</td><td>pr (pz)</td><td>pr (pz)</td></tr></table>	wr wz	wr wz	wr wz	t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}	pr pz	pr (pz)	pr (pz)	
wr wz	wr wz	wr wz									
t_{ij-1}	t_{ij}	t_{ij+1}									
pr pz	pr (pz)	pr (pz)									

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i+1,j-1}^{pr} \right\}, \quad (62)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+j,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i+1,j-1}^{pz} \right\}, \quad (63)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i+1,j-1}^{pr} \right\}, \quad (64)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i+1,j-1}^{pr} \right\}, \quad (65)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pr} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i+1,j-1}^{pz} \right\}, \quad (66)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pr} ; t_{i+1,j-1}^{pz} \right\}, \quad (67)$$

$$t_{ij}^{pz} = \min \left\{ t_{i+1,j}^{pz} ; t_{i,j+1}^{pz} ; t_{i+1,j-1}^{pr} \right\}, \quad (68)$$

W zbiorze wariantów metody z zerowymi sprzężeniami stopniowymi

łączącymi terminy rozpoczęcia robót,

dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr}, \quad (69)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} \quad (70)$$

- łączącymi terminy zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+j,j-1}^{wz} \quad (71)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} \quad (72)$$

- łączącymi terminy rozpoczęcia i zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz} \quad (73)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pz} \quad (74)$$

W zbiorze wariantów metody z zerowymi odwrotnymi sprzężeniami stopniowymi

- łączącymi terminy rozpoczęcia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wr} \quad (75)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad (76)$$

- łączącymi terminy zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów

$$t_{ij}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad (77)$$

Tabela 6

Warianty potokowej metody organizacji robót z zerowymi sprzężeniami stopniowymi

Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(69)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(70)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
Łączących terminy zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(71)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(72)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
Łączącymi terminy rozpoczęcia i zakończenia robót	dla najwcześniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(73)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	dla najpóźniejszych	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{ij} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	
	(74)	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j-1} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \text{wr} & \text{wz} \\ t_{i+1,j} & \\ \text{pr} & \text{pz} \end{array}$	

Tabela 7

Warianty potokowej metody organizacji z zerowymi, odwrotnymi sprzężeniami stopniowymi

Łączący- mi ter- miny rozpo- częcia robót	dla naj- wcześ- niej- szych (75)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	
	dla naj- później- szych (76)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	
Łączący- mi ter- miny zakoń- czenia robót	dla naj- wcześ- niej- szych (77)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	
	dla naj- później- szych (78)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	
Łączący- mi ter- miny rozpo- częcia i za- kończe- nia robót	dla naj- wcześ- niej- szych (79)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	
	dla naj- później- szych (80)	wr wz $t_{i,j}$ $t_{i,j+1}$ pr pz pr pz	

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = t_{i-1, j+1}^{pz} \quad (78)$$

- łączącymi terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wz} \quad (79)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1, j+1}^{pz} \quad (80)$$

W zbiorze wariantów metody z uwzględnieniem sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych^{*/}

- łączących terminy rozpoczęcia robót, dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1, j-1}^{wr} = t_{i-1, j+1}^{wr} \quad (81)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1, j-1}^{pr} = t_{i-1, j+1}^{pr} \quad (82)$$

- łączących terminy zakończenia robót, dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wz} = t_{i+1, j-1}^{wz} = t_{i-1, j+1}^{wz} \quad (83)$$

^{*}/ Przypadek prezentowany w [2, 3, 8, 9].

^{**}/ Metody opublikowane przez autora w pracach [10, 12].

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pz} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad * / \quad , \quad (84)$$

- łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad , \quad (85)$$

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wz} = t_{i-1,j+1}^{wr} \quad , \quad (86)$$

$$t_{ij}^{wr} = t_{i+1,j-1}^{wr} = t_{i-1,j+1}^{wz} \quad , \quad (87)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad , \quad (88)$$

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pz} = t_{i-1,j+1}^{pr} \quad , \quad (89)$$

$$t_{ij}^{pr} = t_{i+1,j-1}^{pr} = t_{i-1,j+1}^{pz} \quad , \quad (90)$$

* / Przypadek prezentowany w [2, 3, 8, 9].

Tabela 8

Warianty potokowej metody z uwzględnieniem sprzężeń stopniowych i odwrotnych stopniowych

Łączących terminy rozpoczęcia robót	(81)	dla najwcześniejszych	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
			wr wz t_{ij-1} pr pz	wr wz t_{ij} pr pz	wr wz t_{ij+1} pr pz	
			wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i,j}$ pr pz	wr wz $t_{i,j+1}$ pr pz	
	(82)	dla najpóźniejszych	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
			wr wz t_{ij-1} pr pz	wr wz t_{ij} pr pz	wr wz t_{ij+1} pr pz	
			wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i,j}$ pr pz	wr wz $t_{i,j+1}$ pr pz	
Łączących terminy zakończenia robót	(83)	dla najwcześniejszych	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
			wr wz t_{ij-1} pr pz	wr wz t_{ij} pr pz	wr wz t_{ij+1} pr pz	
			wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i,j}$ pr pz	wr wz $t_{i,j+1}$ pr pz	
	(84)	dla najpóźniejszych	wr wz $t_{i-1,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j}$ pr pz	wr wz $t_{i-1,j+1}$ pr pz	
			wr wz t_{ij-1} pr pz	wr wz t_{ij} pr pz	wr wz t_{ij+1} pr pz	
			wr wz $t_{i,j-1}$ pr pz	wr wz $t_{i,j}$ pr pz	wr wz $t_{i,j+1}$ pr pz	

Tabela 8 c.d.

Łączących terminy rozpoczęcia i zakończenia robót	dla najwcześniejszych	WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz	(85)	
		WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz	(86)	
		WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz	(87)	
		WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz	(88)	
		WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz		
		WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz		

Tabela 8 c.d.

	(89)	wr wz	wr wz	wr wz	
		$t_{i-1,j-1}$	$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$	
		pr pz	pr pz	(pr) pz	
	(90)	wr wz	wr wz	wr wz	
		$t_{i,j-1}$	t_{ij}	$t_{i,j+1}$	
		pr pz	(pr) pz	pr pz	
	(89)	wr wz	wz	wr wz	
		$t_{i-1,j-1}$	$t_{i-1,j}$	$t_{i-1,j+1}$	
		pr (pz)	pr pz	pr pz	
	(90)	wr wz	wr wz	wr wz	
		$t_{i,j-1}$	t_{ij}	$t_{i,j+1}$	
		(pr) pz	pr pz	pr pz	

4.4 Znaczenie sprzężeń tranzytowych (przekątniowych) w kompleksie robót

W kompleksie robót, oprócz sprzężeń przedstawionych w p. 4.3, występują również sprzężenia tranzytowe. Są one nieodłącznym elementem każdego tworzonego potoku. Posiadają kierunek prostopadły do kierunku działania sprzężeń stopniowych w macierzy.

Tabela 9.

sprzężenia między frontami roboczymi

sprzężenia między środkami realizacji	CZEŚCIOWE POTOKI [rodzaje robót]							
	RF	1	2	...	j	...		m
	1	t_{11}	t_{12}					t_{1m}
	2							
	i				t_{ij}			
	...							
	n	t_{n1}						t_{nm}

sprzężenia diagonalne
sprzężenia odwrotne diagonalne

Sprzężenia tranzytowe (przekątniowe) wiążą roboty danego rodzaju j na danym froncie i , z robotami poprzedzającymi w porządku technologicznym $j-1$, wykonywanymi na poprzednim froncie $i-1$.

Sprzężenia te mają najczęściej bierny wpływ na wartości charakterystyk czasowych robót w modelowanym potoku.

Uwzględnione są one bowiem w wartościach: $t_{i-1,j}^{wr}$ i $t_{i,j-1}^{wr}$ robót poprzedzających daną robotę j na froncie i w częściowym potoku oraz częściowym kompleksie. Z tej przyczyny występuje zależność:

$$t_{ij}^{wr} \geq t_{i-1,j-1}^{wz} \quad (91)$$

ponieważ:

$$t_{i-1,j-1}^{wz} \leq t_{i-1,j}^{wr} \quad (92)$$

i

$$t_{i-1,j-1}^{WZ} \leq t_{i,j-1}^{Wr} \quad (93)$$

więc:

$$\left. \begin{array}{l} t_{i-1,j}^{Wr} + t_{i-1,j} \\ t_{i,j-1}^{Wr} + t_{i,j-1} \end{array} \right\} \xrightarrow{\max} t_{ij}^{Wr} \quad (94)$$

Sprężenia tranzytowe (przekątniowe) przyjmują więc wartości $s_t \geq 0$.

Istnieją jednak przypadki, kiedy sprężenia tranzytowe mają bezpośredni wpływ na najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty t_{ij}^{Wr} . Czynna rola tych sprężeń ujawnia się najczęściej w potokowej metodzie organizacji, z robotami krytycznymi, przy uwzględnieniu sprężeń między środkami i frontami.

W przypadku, kiedy nie zachodzi konieczność wykonania niektórych robót np.

$$t_{i-1,j} = 0 \quad \text{oraz} \quad t_{i,j-1} = 0$$

Terminy rozpoczęcia roboty t_{ij}^{Wr} zależy wówczas od zakończenia roboty $t_{i-1,j-1}^{WZ}$.

Tabela 10

		P R O C E S Y		
		j-2	j-1	j
FRONTY ROBOCZE	i-2	$t_{i2,j2}$	$t_{i2,j1}$	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{i2,j} \quad \text{pz} \end{array}$
	i-1	$t_{i1,j2}$	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{i1,j1} \quad \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{i1,j} \quad \text{pz} \end{array}$
	i	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{ij2} \quad \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{ij1} \quad \text{pz} \end{array}$	$\begin{array}{l} \text{Wr} \quad \text{(WZ)} \\ \text{pr} \quad t_{ij} \quad \text{pz} \end{array}$

Ponieważ:

$$t_{i-1,j-1}^{WZ} \geq t_{i-2,j}^{WZ}, \quad (95)$$

oraz

$$t_{i-1,j-1}^{WZ} \geq t_{i,j-2}^{WZ}, \quad (96)$$

więc:

$$t_{ij}^{WR} = t_{i-1,j-1}^{WZ}, \quad (97)$$

ozn.

$$S_t = 0 \quad (98)$$

gdzie: S_t - sprzężenia tranzytowe (przekątniowe).

Analizując możliwości oddziaływania zerowych sprzężeń tranzytowych (przekątniowych) na roboty budowlane w potoku, można wyszczególnić szereg przypadków:

- łącząc terminy rozpoczęcia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{WR} = t_{i-1,j-1}^{WR}, \quad (99)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{PR} = t_{i-1,j-1}^{PR}, \quad (100)$$

- łącząc terminy zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{WZ} = t_{i-1,j-1}^{WZ}, \quad (101)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{PZ} = t_{i-1,j-1}^{PZ}, \quad (102)$$

- łącząc terminy rozpoczęcia i zakończenia robót,
dla najwcześniejszych terminów:

$$t_{ij}^{WR} = t_{i-1,j-1}^{WZ}, \quad (103)$$

dla najpóźniejszych terminów:

$$t_{ij}^{pr} = t_{i-1,j-1}^{pz} \quad (104)$$

Sprzężenia tranzytowe (przekątniowe) występujące między robotami mają najczęściej bierny wpływ na terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, przyjmując wartości $S_t > 0$. Istnieją jednak przypadki, kiedy zaczynają one mieć czynny wpływ na inne roboty. Zdarzenie to ma miejsce tylko wówczas, gdy w sąsiedztwie danej roboty występują roboty "zerowe".

Tabela 11

Możliwości oddziaływania zerowych sprzężeń tranzytowych przekątniowych na roboty budowlane

Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najwcześniejszych	WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	
	(99)	WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	
Łączących terminy zakończenia robót	dla najpóźniejszych	WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	
	(100)	WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	
Łączących terminy rozpoczęcia robót	dla najwcześniejszych	WR WZ $t_{i-1,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ $t_{i-1,j}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	
	(101)	WR WZ $t_{i,j-1}$ pr pz WR WZ t_{ij} pr pz	

Tabela 11 c.d.

	dla naj- później- szych	wr wz $t_{i,j-1}$ p (pz) wr wz $t_{i,j-1}$ pr (pz)	wr wz $t_{i,j}$ pr pz
--	-------------------------------	---	--

wr

wz

$t_{i,j}$

pr

(pz)

5. HARMONIZACJA POTOKÓW Z UWZGLĘDNIENIEM USTALONYCH ZASOBÓW (LICZBY BRYGAD ROBOCZYCH)

Masowy charakter budownictwa wymaga racjonalnego planowania wykorzystania posiadanych zasobów ludzkich i materiałowych. Przyjmując do rozważań stały skład jakościowy i ilościowy brygad roboczych, należy ze znacznym wyprzedzeniem planować ich wykorzystanie w procesie realizacyjnym, starając się zapewnić im zgodnie z ustaloną metodą organizacji warunki wykonawcze, np. ciągłość pracy.

Rozwiązanie powyższego zagadnienia wymaga budowy modelu z uwzględnieniem jego elementów.

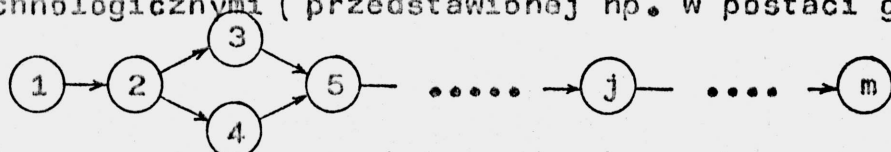
- zbioru frontów roboczych (obiektów):

$$d = \{ d_i \} \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

- zbioru przewidywanych do wykonania częściowych procesów roboczych:

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

- kolejności wykonania procesów roboczych uzależnionej względami technologicznymi (przedstawionej np. w postaci grafu czynności):



- zbioru specjalizowanych brygad roboczych:

$$B = \{ B_1 \} \vee \{ B_2 \} \vee \dots \vee \{ B_m \},$$

gdzie: B_m - zbiór brygad roboczych wykonujących częściowy proces m ,

- prędkości wykonania robót na poszczególnych frontach:

$$P = \{ P_{ij} \} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

- czasów wykonania robót przez specjalizowane brygady^{*/} na frontach roboczych

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

^{*/} Czas pracy brygady roboczej może być zmienną losową charakteryzującą się odpowiednią funkcją rozkładu prawdopodobieństw, wyznaczoną na podstawie danych statystycznych.

Rozwiązanie zagadnienia planowania pracy specjalizowanych brygad, metodami potokowej organizacji robót, w przypadku gdy jedna brygada realizuje jeden proces roboczy, zostało przedstawione w pracach [2, 6, 8, 9, 71]. W przypadku angażowania większej liczby brygad jednej specjalności, algorytmy umożliwiające planowanie ich pracy nie zostały dotychczas opracowane.

Istnieją próby zastosowania do modelowania pracy brygad roboczych teorii kolejek [61] i symulacji komputerowej [38]. Prezentowana w pracach metodyka pozwala na uwzględnienie stochastycznego charakteru przebiegu procesów budowlanych, natomiast nie uwzględnia metod potokowej organizacji robót, w modelowaniu przebiegu procesu.

Opracowywanie harmonogramów z uwzględnieniem ograniczonych zasobów zostało opisane m.in. w pracach [14, 62, 77, 85, 89]. Zagadnienia związane z usuwaniem ograniczeń materiałowych oraz wyrównywaniem zapotrzebowania na materiały, przedstawione są m.in. w pracach [22, 72]. Publikacje [34, 35] zawierają opis metody przepływów sieciowych, która pozwala na równoczesną analizę czasu i kosztu. Większość prac koncentruje się na zagadnieniach optymalnego wykorzystania zasobów, ustalonych na podstawie analizy sieci zależności.

W rozprawie, proponuje się odmienne spojrzenie na zagadnienie. Znając zasoby (liczbę brygad roboczych) organizacji wykonawczej, np. przedsiębiorstwa budowlanego, można określić terminy realizacji zadania inwestycyjnego wieloma metodami potokowej organizacji, ustalając najbardziej racjonalny sposób wykonania i kolejność realizacji oraz uwzględniając technologiczne i organizacyjne ograniczenia. W tym celu, opracowano algorytm planowania pracy wielu brygad jednej specjalności, uwzględniający specyfikę metod potokowej organizacji.

Podstawowe dane do budowy modelu można przedstawić w postaci tabeli - macierzy.

Tabela 12

P R O C E S Y R O B O C Z E							
	1	2	...	j	...		m
1	$t_{11}^{B_1}$						$t_{1m}^{B_m}$
2		$t_{22}^{B_2}$					
...				$t_{ij}^{B_j}$			
i							
...							
n	$t_{n1}^{B_1}$						$t_{nm}^{B_m}$

Elementami macierzy mogą być czasy wykonania poszczególnych procesów przez brygady robocze na obiektach (frontach) $t_{ij}^{B_k}$,

gdzie:

- k - numer brygady roboczej B wykonującej proces j,
- i - numer frontu roboczego (obektu),
- j - numer procesu roboczego.

Przystępując do planowania pracy brygad roboczych na obiekcie lub ich kompleksie, należy w pierwszej kolejności dokonać przydziału frontów roboczych brygadam a następnie wyznaczyć charakterystyki czasowe formowanego nierytmicznego potoku, metodami potokowej organizacji robót.

5.1 Podstawy teoretyczne zagadnienia przydziału brygadam frontów roboczych

W prezentowanym algorytmie, jako funkcję celu, przyjmuje się minimalizację czasu realizacji robót na obiekcie $T \rightarrow \min$.

Poszukując rozwiązania zagadnienia przydziału frontów roboczych brygadam, wykorzystano elementy techniki symulacji cyfrowej, umożliwiając 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 możliwe jest drogą wprowadzenia do modelu funkcji rozkładu prawdopodobieństw czasów realizacji robót, uzyskanych na podstawie badań statystycznych. Metodyka przedstawiona została w rozdziale 3.1.

Czas wykonania robót T przez brygady jednej specjalności na danym obiekcie lub kompleksie, zależy od czasów wykonania robót na frontach obiektu, przez poszczególne brygady, przy założeniu pracy jednej brygady na jednym froncie

$$T = \max \left\{ t_{nj}^{pz/B_1/}; t_{nj}^{pz/B_2/}; \dots t_{nj}^{pz/B_k/}; \dots t_{nj}^{pz/B_s/} \right\}, \quad (105)$$

$$k = 1, 2, \dots, s,$$

gdzie: $t_{nj}^{pz/B_k/}$ - najpóźniejszy termin zakończenia procesu j na froncie n przez brygadę k ,

$$t_{nj}^{pz/B_k/} = \sum_{i=1}^n t_{ij}^{B_k/} + t_{1j}^{wr/B_k/} \quad (106)$$

gdzie: $\sum_{i=1}^n t_{ij}^{B_k/}$ - suma czasów wykonania robót procesu j przez brygadę k na n frontach,

$t_{1j}^{wr/B_k/}$ - najwcześniejszy termin rozpoczęcia procesu j przez brygadę k na pierwszym $i=1$ froncie.

Bazą umożliwiającą przeprowadzenie symulacji układów front - brygada jest macierz wejściowa.

Krok 1 - spośród zbioru elementów pierwszego wiersza podmacierzy, obejmującej czasy wykonania robót pierwszego procesu, wybieramy wartość najmniejszą

$$\Phi_{\min} = \min_{i=1} \left\{ t_{ij}^{wz/B_1/}, t_{ij}^{wz/B_1/}, \dots, t_{ij}^{wz/B_k/}, \dots, t_{ij}^{wz/B_s/} \right\}. \quad (107)$$

Wartości tej odpowiada numer brygady wykonującej proces j oraz numer frontu roboczego

$$\Phi_{\min} = t_{ij}^{wz/B_k/} \longrightarrow \{1, k\}. \quad (108)$$

Tworzymy równocześnie zbór par (numer frontu i brygady), umożliwiającą budowę harmonogramu.

Krok 2 - wyznaczamy terminy rozpoczęcia i zakończenia robót danego procesu na drugim froncie, uwzględniając czas wykonania robót na pierwszym froncie przez ustaloną brygadę

$$t_{2j}^{wr} = t_{1j}^{wz}. \quad (109)$$

$$t_{2j}^{wr/B_1/} = t_{2j}^{wr/B_2/} = \dots = t_{2j}^{wr/B_s/} = 0, \quad (110)$$

$$t_{2j}^{wr/B_k/} = t_{1j}^{B_k}. \quad (111)$$

Następnie, porównujemy przewidywane terminy rozpoczęcia robót na drugim froncie, wybierając wartość najmniejszą, której odpowiada termin rozpoczęcia roboty przez brygadę na danym froncie

$$\Phi_{\min} = \min_{i=2} \left\{ t_{2j}^{wr/B_1/}, t_{2j}^{wr/B_2/}, \dots, t_{2j}^{wr/B_k/}, \dots, t_{2j}^{wr/B_s/} \right\} \quad (112)$$

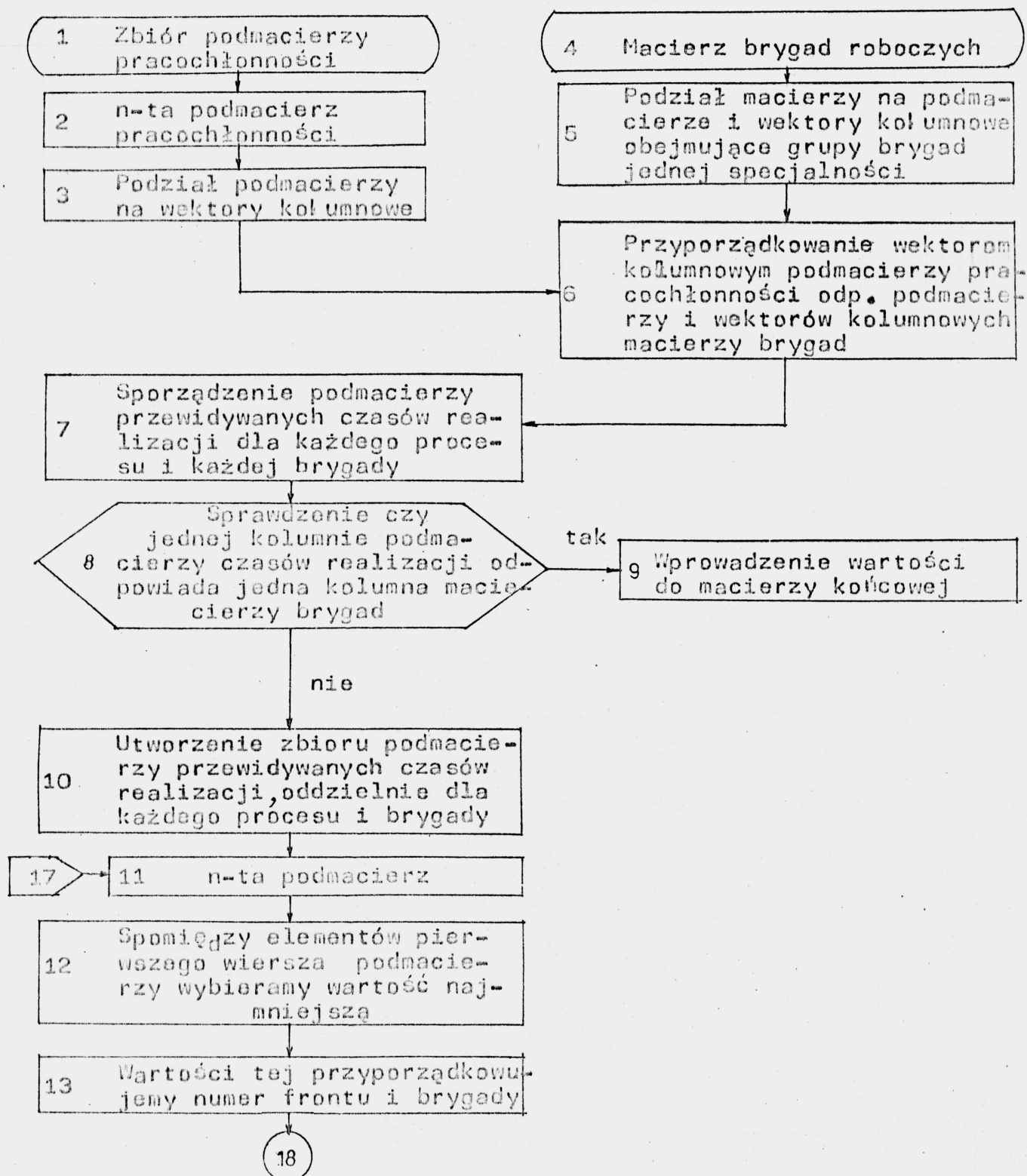
$$\Phi_{\min} = t_{2j}^{wr/B_k/} \longrightarrow \{2, k\}. \quad (113)$$

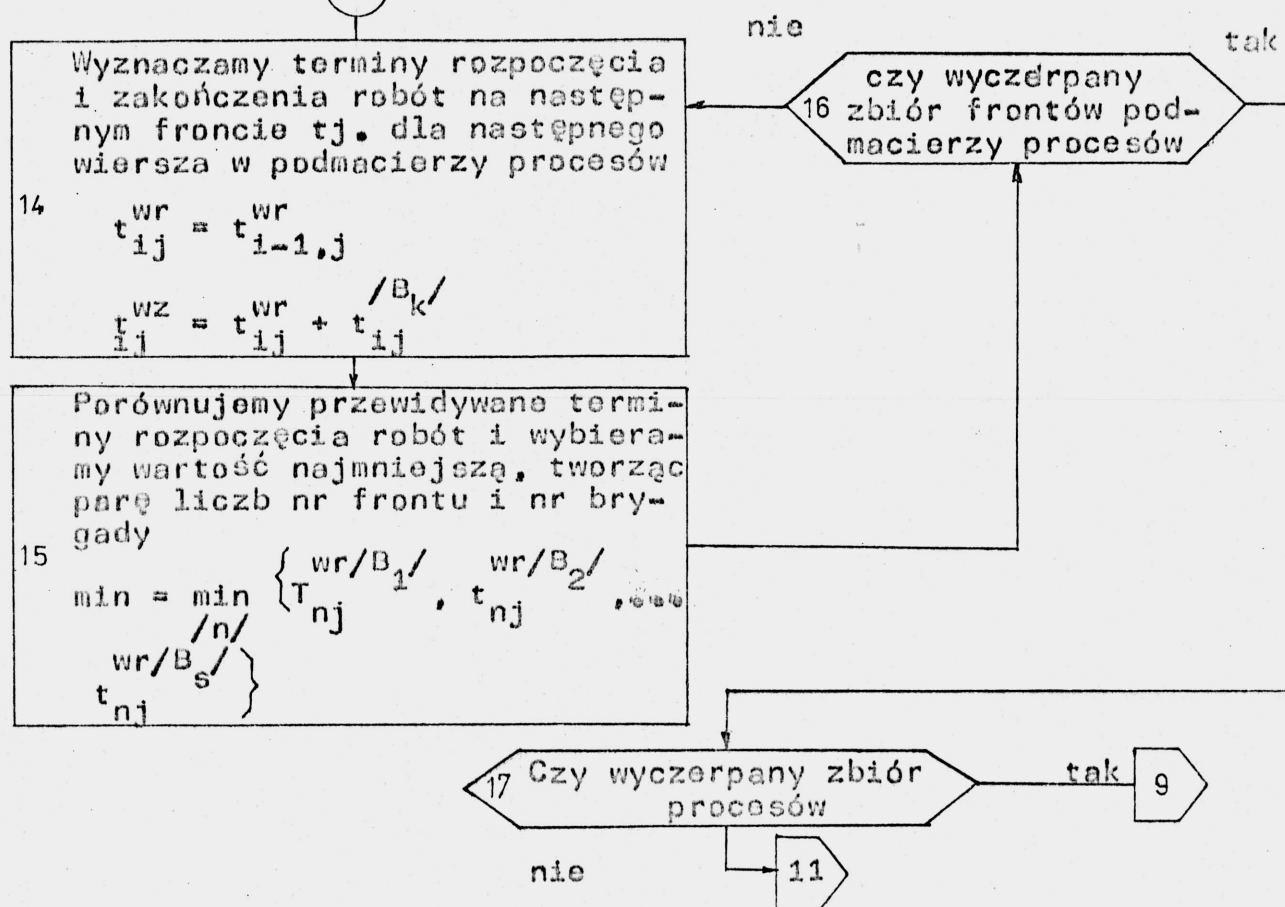
Krok 3, 4, ..., n. Powtarzając procedurę analogicznie jak w kroku 2, do momentu wyczerpania się zbioru frontów roboczych, dokonujemy przyporządkowania elementom zbioru brygad, elementów zbioru frontów, zapewniając najkrótszy czas wykonania danego rodzaju robót.

Dla pozostałych zbiorów brygad roboczych, 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. Transponując macierz wejściową i wykorzystując powyższy algorytm, można dokonać przydziału brygdom frontów roboczych w potoku, modelowanym metodą organizacji robót, z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi.





Rys. 5 Schemat algorytmu planowania pracy brygad jednej specjalności.

5.2 Planowanie ciągłej pracy brygad roboczych w procesie realizacji kompleksu obiektów

Przystępując do wyznaczania terminów rozpoczęcia i zakończenia robót przez brygady, 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.

Wyznaczenie wartości $t_{rj}^{B_k}$ dla poszczególnych procesów i brygad można przeprowadzić z uwzględnieniem algorytmu przydziału frontów roboczych brygadam p. 5.1.

W metodzie potokowej organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, wyznaczając okres rozwinięcia danego częściowego potoku, należy utworzyć zbiór frontów roboczych, na których wykonywane są roboty danego rodzaju przez daną brygadę.

Następnie, korzystając z tabeli przydziału frontów brygadam, znajdujemy terminy zakończenia robót na tych frontach, w poprzedzającym p-rocesie w ciągu technologicznym.

Posiadając te wartości możemy wyznaczyć okres rozwinięcia danego częściowego potoku:

$$t_{rj}^{B_k} = \max_i \left\{ t_{i,j-1}^{pz/B_{k-1}} - \sum_{i=2}^{n-1} t_{ij}^{B_k} \right\} \quad (114)$$

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 B_k na przydzielonych frontach.

Postępowanie wg powyższej procedury należy powtarzać do momentu wyczerpania się zbioru brygad. Terminy rozpoczęcia i zakończenia robót wyznaczamy z zależności:

$$t_{ij}^{wr} = t_{rj}^{B_k} + \sum_{i=1}^n t_{i-1,j}^{B_k} \quad (115)$$

gdzie: $\sum_{i=1}^n t_{i-1,j}^{B_k}$ - suma czasów wykonania robót procesu j przez brygadę k na frontach i-1,

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{wr} + t_{ij}^{B_k} \quad (116)$$

gdzie: $t_{ij}^{B_k}$ - czas wykonania roboty procesu j na froncie i przez brygadę k.

W celu wyznaczenia charakterystyk czasowych modelowanego potoku, dla metody potokowej organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi, można wykorzystać przedstawiony algorytm, z tym jednak zastrzeżeniem, że należy na wstępie transponować macierz - tabelę wejściową.

6. MODELOWANIE POTOKU O STRUKTURZE SZEREGOWEJ

Potokowe metody organizacji robót prezentowane^e w pracach [2, 6, 8, 9, 71], umożliwiają modelowanie potoku zgodnie z przyjętymi w nich ograniczeniami, dla niewielkich kompleksów budowlanych.

Zagadnienie jest bardziej złożone, gdy następuje "pionowy" podział potoku tzn. grupy częściowych procesów (częściowych potoków) planuje się realizować różnymi metodami potokowej organizacji robót, z uwagi np. na zmieniające się w czasie wykonania warunki realizacyjne oraz wielkość kompleksu.

Podstawowym problemem, który należy rozwiązać jest maksymalne zbliżenia obu części potoku, przy zachowaniu zasady bezkolizyjnej pracy brygad roboczych na frontach.

Rozwiązanie powyższego zagadnienia wymaga przyjęcia do rozważań modelu z uwzględnieniem jego parametrów, rozdział 5, w którym podstawowe dane wejściowe można przedstawić w postaci tabeli - macierzy. Macierz wejściowa powinna informować o ustalonej kolejności realizowanych obiektów.

6.1 Rozwiązanie problemu synchronizacji potoków (lub ich części)

Problem powiązania potoków lub ich części, formowanych różnymi metodami, rozwiązany został przy wykorzystaniu elementów techniki symulacji cyfrowej oraz metod heurystycznych. Zagadnienie to rozwiązano dla minimalno-czasowego kryterium, służącego do zapewnienia najkrótszych przerw w pracy brygad roboczych w strefie połączenia części potoków.

Krok 1.

Po ustaleniuⁿ/ częściowych potoków stanowiących strefę połączenia potoków, 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:

ⁿ/ Wybór potokowej metody organizacji robót można przeprowadzić przy wykorzystaniu metodyki przedstawionej w rozdziale 8.

$$t^k = \{t_{1m}^{pz}, t_{2m}^{pz}, \dots, t_{1m}^{pz}, \dots, t_{nm}^{pz}\}, \quad (117)$$

gdzie: k - numer potoku,
 t_{im}^{pz} - najpóźniejszy termin wykonania procesu m na i -tym
 froncie,
 n - liczba frontów roboczych,
 m - ostatni proces potoku k .

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

$$t^{k+1} = \{t_{1,m+1}; t_{2,m+1}, \dots, t_{1,m+1}, \dots, t_{n,m+1}\}. \quad (118)$$

Po przeprowadzonym procesie ustalania 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 następujące kroki algorytmu.

Krok 2

Wyznaczamy terminy zakończenia robót w pierwszym częściowym potoku drugiego potoku, z uwzględnieniem robót poprzedzających je². 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, dla zapewnienia ich bezkolizyjnej pracy (eliminacji zazębienia).

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_1, \dots, U_n\} \quad (119)$$

$$U_i = t_{im}^{pz} - \sum_{k=1}^p t_{i,m+1} \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots, p \quad (120)$$

$i \text{ p} = i-1$

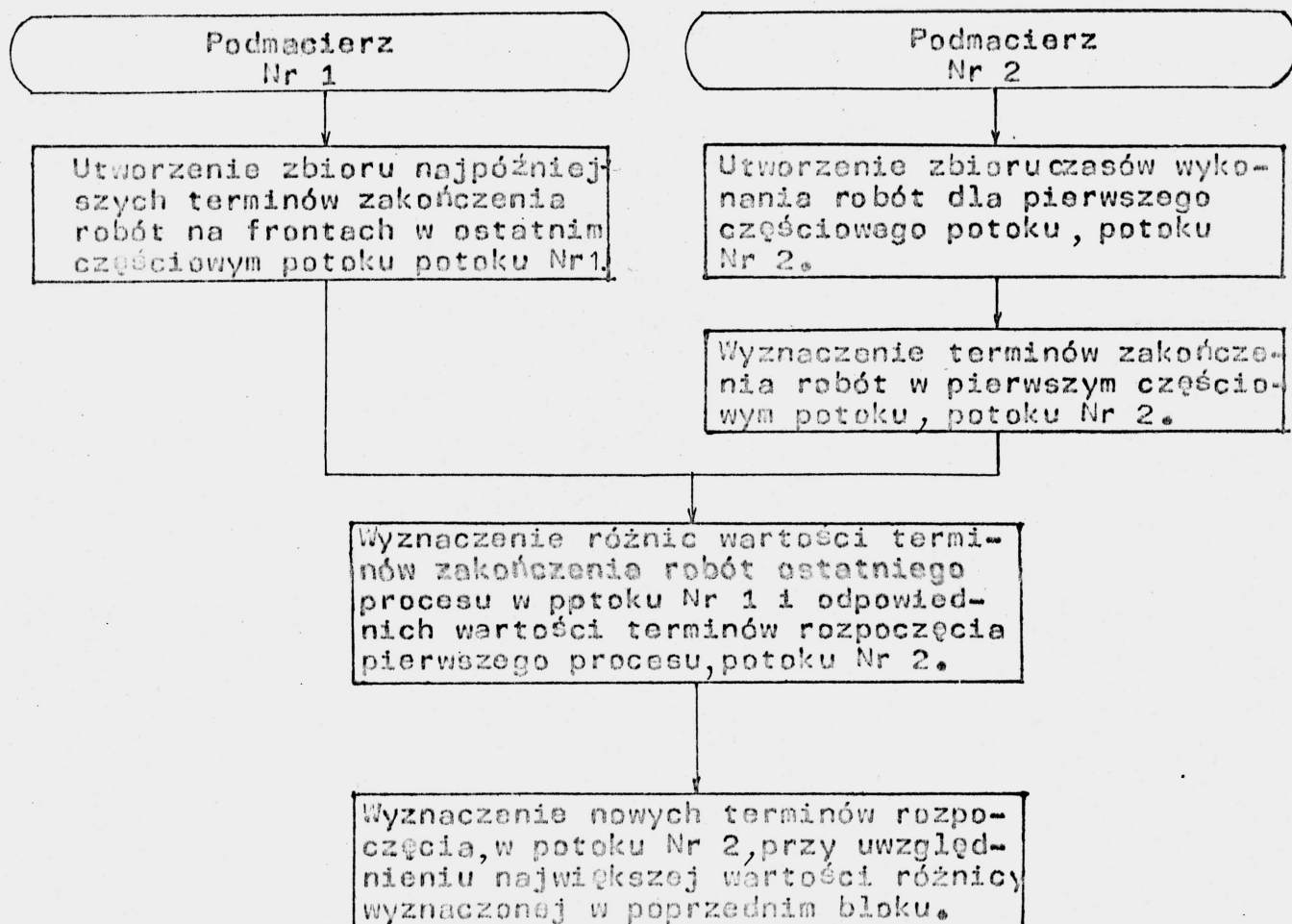
gdzie: $\sum_{k=1}^p t_{i,m+1}$ - suma czasów wykonania robót na poprzedzających działkach (obiektach) w ustalonym porządku.

Krok 3

Po ustaleniu niezbędnych wartości przerw w pracy brygad na odpowiednich działkach (obiektych) 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:

$$t_{1,m+1}^{wr} = U_i \quad (121)$$

$$t_{i,m+1}^{wr} = U_i + \sum_{k=1}^p t_{i,m+1} \quad (122)$$



Rys. 6 Schemat algorytmu synchronizacji potoków (lub ich części) formowanych różnymi metodami potokowej organizacji robót.

6.2 Przykład zastosowania algorytmu

Sporządzono macierz czasów wykonania robót na frontach T, którym odpowiadają budynki mieszkalne realizowane w systemie wielokopłytowym. Roboty budowlane scalono, tworząc osiem częściowych procesów (częściowych potoków), tj. zdjęcie humusu, roboty ziemne, fundamentowe, montaż, uzupełnienia, roboty tynkarskie, roboty malarskie, wykonanie podłóg i posadzek. Macierz opracowano dla zespołu budynków osiedla mieszkaniowego "Zakrzów" we Wrocławiu, wykorzystując obowiązujące normatywy oraz uwzględniając zasoby przedsiębiorstwa wykonawczego.

$$T = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \end{bmatrix}$$

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 przeprowadzonych na komputerze (załącznik tab. 18) otrzymano podmacierze z nową kolejnością realizowanych budynków

$$T_1 = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 \\ 5 & 20 & 15 & 141 \\ 5 & 20 & 15 & 141 \\ 2 & 7 & 5 & 54 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 34 & 37 & 35 & 38 \\ 12 & 13 & 15 & 13 \\ 12 & 13 & 15 & 13 \\ 34 & 37 & 35 & 38 \end{bmatrix}.$$

Przyjmując jako wejściową, kolejność wierszy macierzy T, w wyniku optymalizacji otrzymano nową kolejność realizacji budynków: dla macierzy T_1 - 1, 2, 4, 3, dla macierzy T_2 - 2, 1, 3, 4.

Krok 1

Ciąg wartości terminów zakończenia robót:

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

ciąg przewidywanych czasów wykonania robót pierwszego procesu drugiego potoku:

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

Krok 2

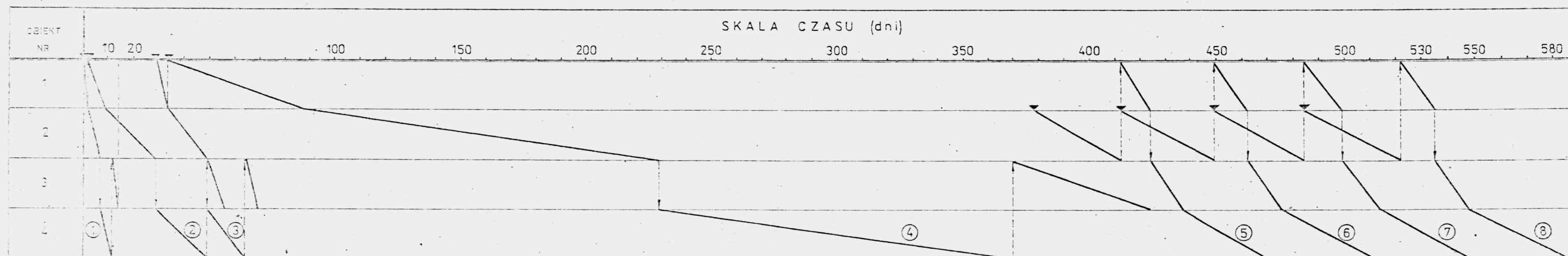
Ustalona kolejność realizacji obiektu	pz_{im}	Ustalona kolejność realizacji obiektu	$t_{i,m+1}$	Pomocnicze terminy rozpoczęcia robót dla kolejności	U_i
1	88	2	34	1 - 34	54
2	229	1	12	2 - 0	229
4	370	3	12	4 - 34+12+12	312
3	424	4	34	3 - 34+12	378

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

Krok 3

Wyznaczenie terminów rozpoczęcia i zakończenia robót w pierwszym częściowym potoku przyległego potoku

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	$378 + 34 + 12 + 12 = 436$	$436 + 34 = 470$



OZNACZENIA:

①-ZDJĘCIE HUMUSU
②-ROBOTY ZIEMNE

③-ROBOTY FUNDAMENTOWE
④-MONTAŻ BUDYNKU

⑤-ROBOTY UZUPEŁNIAJĄCE
⑥-ROBOTY TYNKARSKIE

⑦-ROBOTY MALARSKIE
⑧-ROBOTY POSADZKARSKIE

RYS.7 CYKLOGRAM POTOKU O STRUKTURZE SZEREGOWEJ.

7. MODELOWANIE POTOKU O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ

Wielki kompleks obiektów budowlanych, np. osiedle mieszkaniowe, może być realizowany metodą potokową, nazywaną również metodą pracy równomiernej. Budowa modeli graficznych (wykresów liniowych sieci zależności, wykresów cyklicznych) realizacji, dla poszczególnych obiektów i ich optymalizacja minimalno-czasowa, prezentowana jest w licznych publikacjach. W przypadku realizacji wielkich kompleksów obiektów, zagadnienie to staje się bardziej złożone.

Planując realizację kompleksu obiektów budowlanych potokową metodą, możemy stwierdzić, że czas realizacji przekracza niekiedy termin dyrektywny. W tych przypadkach skraca się czas realizacji, przez dodatkowe nasycenie frontów robót środkami (brygadami, maszynami), jeżeli jest to możliwe ze względów technologicznych lub drogą wprowadzenia równoległych potoków obejmujących grupy obiektów.

W praktyce występują przypadki, kiedy w procesie realizacji niezbędnym staje się wykorzystanie maszyn lub ich zestawów (maszyny do robót ziemnych, żurawie wieżowe) w potokach obejmujących kompleksy obiektów, w sposób ciągły. Należy wówczas tak połączyć ze sobą potoki obejmujące kompleksy obiektów aby zapewnić ciągłość pracy w wiodących częściowych potokach^{*/}.

Przedstawiony zostanie algorytm umożliwiający analityczne wyznaczenie terminów rozpoczęcia robót, w przyległych potokach obejmujących kompleksy obiektów, przy zapewnieniu ciągłości robót w wiodących częściowych potokach. Poszczególne potoki obejmujące kompleksy obiektów zostają zharmonizowane wg algorytmów przedstawionych w pracach [2, 6, 8, 9, 71].

W pierwszym etapie ustalona zostaje kolejność realizacji obiektów w potokach. W drugim, wyznacza się charakterystyki czasowo-nierytmicznych potoków, będące podstawą do wyboru metody organizacji wg algorytmów przedstawionych w niniejszej pracy.

^{*/} Częściowy potok obejmuje roboty jednego rodzaju (ziemne, fundamentowe, montażowe) wykonywane przez specjalistyczne brygady na działkach roboczych. Wiodącym jest częściowy potok, czas trwania którego ma decydujący wpływ na termin realizacji kompleksu.

Poszukiwanie kolejności realizacji obiektów i wyznaczenie charakterystyk czasowych przeprowadza się z zastosowaniem komputera. Opracowano w tym celu zbiór programów w języku FORTRAN na komputer serii Odra.

7.1 Sformułowanie problemu

Rozpatrywanym kompleksem jest zbiór obiektów budowlanych O realizowanych potokową metodą organizacji, o strukturze równoległej potoków,

$$O = \{O_i\}.$$

gdzie:

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

n - liczba obiektów (frontów roboczych).

Roboty budowlane planowane do wykonania w czasie realizacji, zgrupowano w częściowe potoki,

$$R = \{R_j\}.$$

gdzie:

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

m - liczba częściowych potoków rodzajów robót.

Czasy wykonania poszczególnych robót na obiektach zapisane są w macierzy,

$$T = [t_{ij}] \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, m. \end{array}$$

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

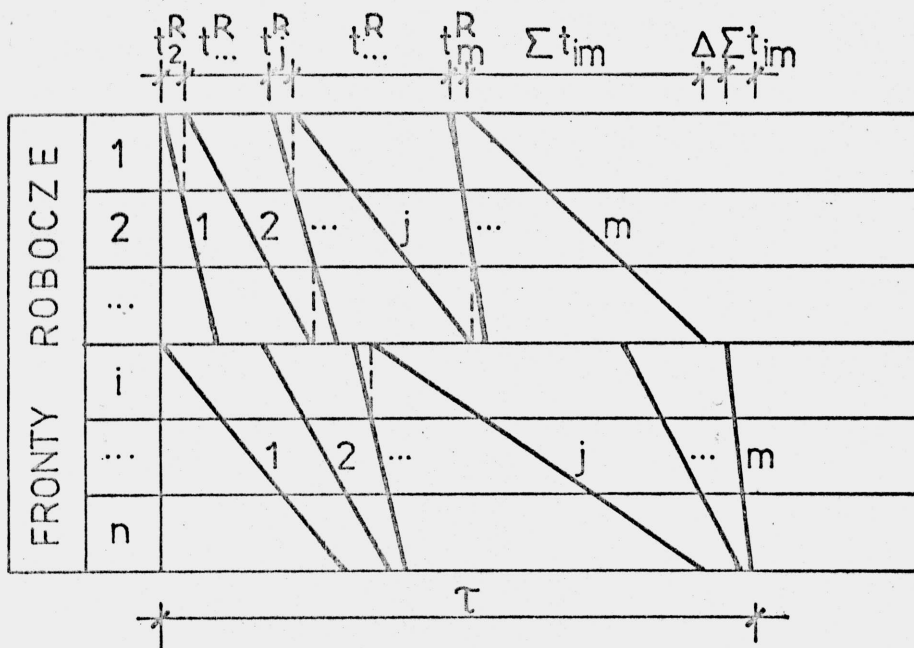
Zgodnie z przyjętym ograniczeniem, dokonano podziału macierzy T na podmacierze $k = 1, 2, \dots, p$; p - liczba podmacierzy.

W podmacierzach T_k , dokonano przeglądu przestrzeni powiązań w wyniku której, otrzymano nową kolejność wierszy w macierzy T_k . Nowe podmacierze, będące podstawą do określenia czasów rozpoczęcia robót w przyległych potokach, oznaczono T'_k .

Jeżeli przez τ oznaczymy czas wykonania wszystkich robót w potokach obejmujących kompleksy obiektów, przy założeniu ich równoległego wykonania, otrzymamy zależność:

$$\sum_{j=2}^m t_j^R + \sum_{i=1}^n t_{im} + \Delta - \tau = 0 \quad (123)$$

gdzie: t_j^R - czas rozwinięcia kolejnych częściowych potoków,
pozostałe oznaczenia na rysunku .



Rys. 8 Potok o strukturze równoległej.

Przy założeniu bezkolizyjnej pracy brygad roboczych, przechodzących z obiektu na obiekt i z kompleksu obiektów na kompleks, zachodzi warunek:

$$t_{ij}^{WZ} \leq t_{i+1,j}^{WR} \quad (124)$$

gdzie: t_{ij}^{WZ} - najwcześniejszy termin zakończenia j-tej roboty na i-tym obiekcie,
 $t_{i+1,j}^{WR}$ - najwcześniejszy termin rozpoczęcia j-tej roboty na następnym obiekcie i+1.

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

$$t_{ij}^{wz} = t_{ij}^{pz} \quad \text{oraz} \quad t_{ij}^{pr} = t_{ij}^{wr} \quad (125)$$

7.2 Rozwiązanie zagadnienia synchronizacji potoków

Rozwiązanie zagadnienia powiązania potoków, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami, przeprowadza się stosując algorytm dla każdej pary potoków.

Sporządzono macierz czasów realizacji $[t_{ij}]$, dokonano jej podziału na podmacierze,

$$T_k = [t_{ij}] ; \quad T_{k+1} = [t_{ij}] , \quad (126)$$

oraz wyznaczono ich czasowe charakterystyki (terminy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych robót). Są one podstawą do wyznaczenia wektorów zanikania^{*}/ częściowych potoków w kompleksie k oraz wektorów rozwinięcia^{**}/ częściowych potoków w kompleksie $k+1$.

^{*}/ Czasem zanikania częściowych potoków T_j^Z , nazywamy czas jaki upływa pomiędzy zakończeniem procesu j i procesu $j+1$, w kompleksie

$$T_j^Z = t_{i,j+1}^{pz} - t_{ij}^{pz} \quad (127)$$

^{**}/ Czasem rozwinięcia częściowych potoków T_j^R , nazywamy czas jaki upływa pomiędzy rozpoczęciem procesu j i procesu $j+1$, w kompleksie

$$T_j^R = t_{i,j+1}^{wr} - t_{ij}^{wr} \quad (128)$$

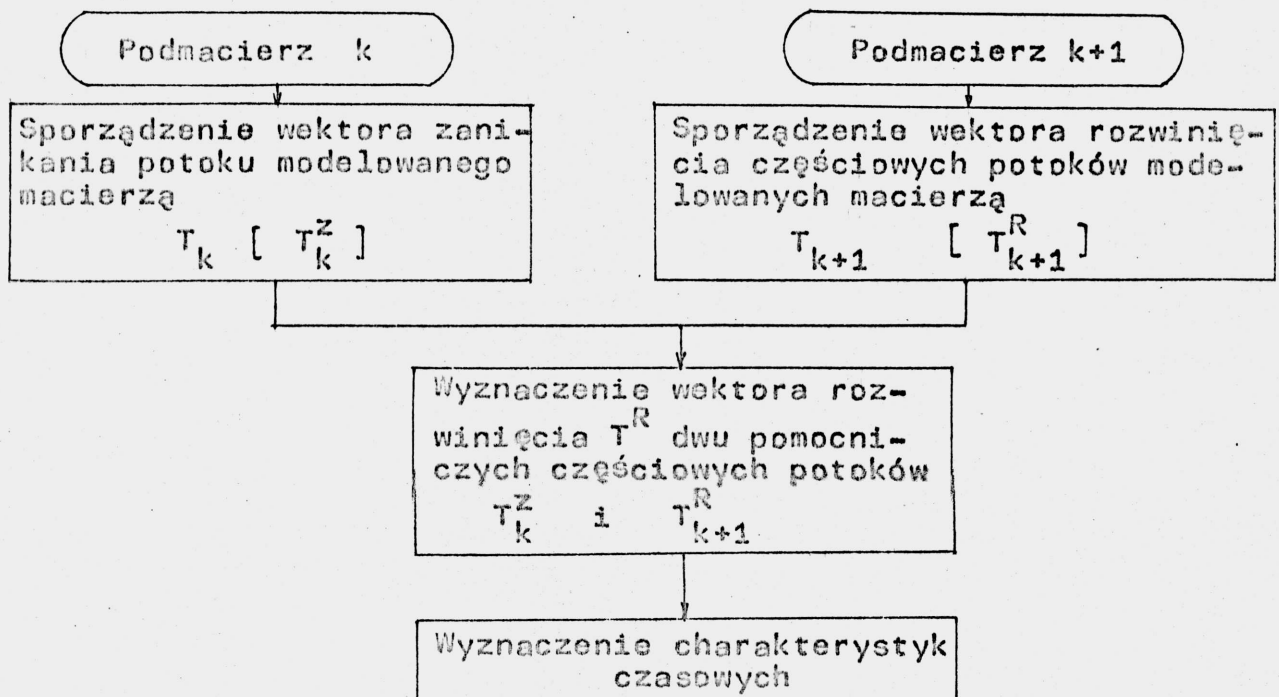
$$T_k^Z = [T_j^Z] ; \quad T_{k+1}^R = [T_j^R] \quad (129)$$

Wyznaczamy następnie okres rozwinięcia T_j^R dwu częściowych potoków, uformowanych z elementów wektorów T_k^Z i T_{k+1}^R , zapewniając bezkolizyjne ich połączenie

$$T_j^R = \max_i \left\{ \sum_{i=1}^n T_{i,j-1}^Z - \sum_{i=1}^n T_{ij}^R \right\} . \quad (130)$$

Zależność ta zapewnia minimalizację czasu realizacji kompleksu drogą maksymalnego zbliżenia uformowanych, pomocniczych częściowych potoków.

Otrzymane znaczenie T_j^R , stanowi informację umożliwiającą określenie położenia na skali czasu, potoku $k+1$.



Rys. 9 Schemat algorytmu powiązania potoków.

7.3 Przykład zastosowania algorytmu

Na podstawie opracowanych przez BP "Miastoprojekt" Wrocław kart limitów materiałów, obowiązującej bazy normatywnej oraz uwzględniając zasoby przedsiębiorstwa wykonawczego, sporządzono macierz czasów realizacji procesów budowlanych, występujących podczas realizacji ośmiu budynków mieszkalnych osiedla "Zakrzów" we Wrocławiu. Elementami macierzy są czasy realizacji, wyrażone w brygadó-dniach, przy czym wiersze odpowiadają kolejno realizowanym obiektom (frontom), kolumny częściowym procesom (zdjęcie humusu, wykonanie wykopu, roboty fundamentowe, montaż, roboty uzupełniające, roboty wykończeniowe I, II, III).

Sporządzono macierz T (8×8)

$$T = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 4 & 17 & 9 & 127 & 29 & 34 & 38 & 33 \\ 4 & 14 & 12 & 92 & 22 & 25 & 23 & 25 \\ 4 & 17 & 12 & 121 & 29 & 34 & 36 & 37 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \end{bmatrix}$$

Uwzględniając warunki wykonania robót, uformowano dwa potoki obejmujące po cztery obiekty, podmacierze T_1 i T_2

$$T_1 = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 4 & 17 & 9 & 127 & 29 & 34 & 38 & 33 \\ 4 & 14 & 12 & 92 & 22 & 25 & 23 & 25 \\ 4 & 17 & 12 & 121 & 29 & 34 & 36 & 27 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \end{bmatrix}$$

W wyniku przeprowadzonych na komputerze obliczeń, otrzymano nową kolejność realizacji obiektów (wiersze w podmacierzach), zapewniającą skrócenie czasów realizacji w potokach uformowanych metodą z zerowym sprzężeniem między środkami realizacji. Dla podmacierzy T_1 , czas realizacji wynosi 575 jednostek, po optymalizacji $T_1^* - 553$ jednostki, dla $T_2 - 682$ jednostki, $T_2^* - 660$ jednostek. W wyniku zmiany kolejności nastąpiło skrócenie czasu realizacji w każdym potoku o 3,8 % i 3,2 %.

$$T_1' = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 5 & 20 & 14 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 2 & 7 & 5 & 54 & 12 & 13 & 15 & 13 \end{bmatrix} \quad T_2' = \begin{bmatrix} 4 & 17 & 9 & 127 & 29 & 34 & 38 & 33 \\ 5 & 20 & 15 & 141 & 34 & 37 & 35 & 38 \\ 4 & 17 & 12 & 121 & 29 & 34 & 36 & 27 \\ 4 & 14 & 12 & 92 & 22 & 35 & 23 & 25 \end{bmatrix}$$

Na podstawie charakterystyk czasowych potoków, sporządzono wektory zanikania i rozwinięcia częściowych potoków, modelowanych macierzą T_1' i T_2'

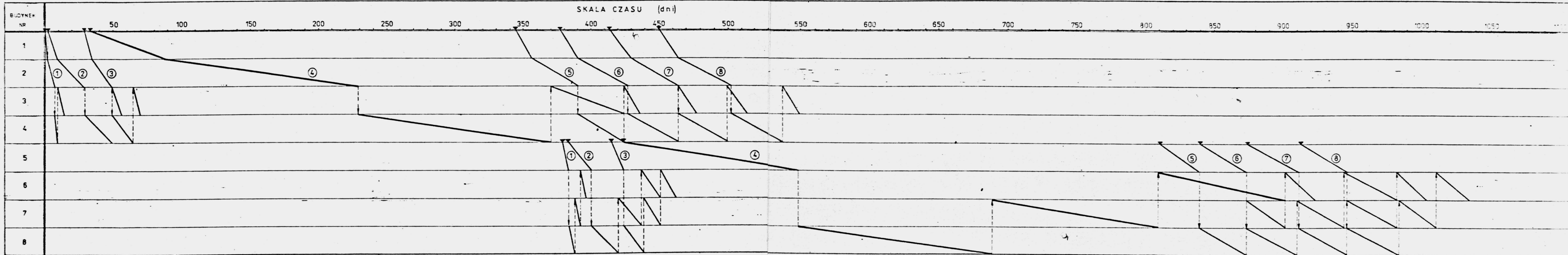
$$T_1^Z = [14, 42, 13, 355, 12, 41, 37, 39];$$

$$T_2^R = [0, 4, 32, 9, 389, 29, 24, 39].$$

Wykorzystując zależność (128), wyznaczamy terminy rozpoczęcia robót w częściowych potokach drugiego potoku, oznaczonego T_2' . Czasy rozwinięcia tworzą wektor T_2^r

$$T_2^r = [379, 4, 32, 9, 389, 29, 34, 39]$$

Prezentowany algorytm umożliwia powiązanie potoków obejmujących kompleks obiektów, zapewniając ciągłość pracy (wykorzystania maszyn) w procesach wiodących. W obu kompleksach, roboty budowlane wykonywane są przez te same specjalistyczne brygady o nie zmienionym składzie. Zastosowanie komputera do wykonywania obliczeń w poszczególnych krokach algorytmu, umożliwia skrócenie czasu wznoszenia, w zamieszczonym przykładzie, z 1108 jednostek do 1038, tj. o 6,3 %.



OZNACZENIA:

①-ZDJĘCIE HUMUSU
②-WYKONANIE WYKOPU

③-ROBOTY FUNDAMENTOWE
④-MONTAŻ BUDYNKU

⑤-ROBOTY UZUPEŁNIAJĄCE
⑥-ROBOTY WYKOŃCZENIOWE I

⑦-ROBOTY WYKOŃCZENIOWE II
⑧-ROBOTY WYKOŃCZENIOWE III

▼-WEJŚCIE BRYGADY NA OBIEKT

RYS. 10 CYKLOGRAM POTOKU O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ ZAPEWNIĄCEJ CIĄGŁOŚĆ PRACY W PROCESACH WIODĄCYCH.

8. USTALENIE KOLEJNOŚCI W ZBIORZE POTOKÓW

Proces planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych odbywa się etapami (rys. 1). Ostatni etap polega na ustaleniu kolejności w zbiorze potoków. Zharmonizowane wcześniej potoki uwzględniają najbardziej racjonalne metody ich organizacji, kolejność robót w potoku oraz inne ograniczenia. Są one wewnętrznie uporządkowane, zapewniając najkrótszy czas realizacji i uwzględniając przyjęte ograniczenia.

Utworzony zbiór potoków wymaga ustalenia ich sekwencji z uwzględnieniem zasady bezkolizyjnej pracy brygad roboczych oraz zapewnienia minimalnego czasu realizacji zadania inwestycyjnego.

8.1 Algorytm szeregowania w zbiorze potoków

Zagadnienie to można rozwiązać z uwzględnieniem minimalno-czasowego kryterium. Zasada działania algorytmu oparta jest na metodzie podziału i ograniczeń.

Rozpoczynając od wariancji A_n^r generujemy ciąg zestawień potoków. Działania te przeprowadzamy w celu ustalenia pierwszego węzła w drzewie wariantów H . Dla każdego zestawienia w ciągu obliczamy wartości $T(A)$, które są podstawą do wyboru kierunku przeszukiwania przestrzeni rozwiązań.

$$T(A) = \max_i \left\{ \sum_{i=1}^n T_{i,j-1}^Z - \sum_{i=1}^n T_{i,j}^R \right\} \quad (131)$$

gdzie:

$T(A)$ - okres rozwinięcia potoków w kolejnych zestawieniach, pozostałe oznaczenia jak w rozdziale 7.

Zbiór wartości $T(A)$ dla zestawień dwóch potoków ze zbioru $\{P_1\}$ umożliwia dokonanie wyboru zestawienia rokującego nadzieję na uzyskanie najkrótszego terminu realizacji.

Zestawienia potoków z n elementów po 2 w każdej wariancji:

$$A_n^2 = \left\{ P_1 - P_2, P_1 - P_3, P_1 - P_4, \dots, P_1 - P_n, P_2 - P_1, P_2 - P_3, P_2 - P_4, \dots, P_2 - P_n, \dots, P_n - P_1, P_n - P_2, \dots, P_n - P_{n-1} \right\} \quad (132)$$

Pierwszy poziom w drzewie wariantów stanowią zestawienia 2-elementowe z wyznaczonymi wartościami $T(A)$. Ze zbioru wartości

$T(A)$ z jednakowymi indeksami początkowymi, wybieramy wartości najmniejsze tzn.

$$\left\{ T(P_1-P_2), T(P_1-P_3), T(P_1-P_4), \dots, T(P_1-P_n) \right\} \xrightarrow{\min} (P_1-P_1),$$
$$\left\{ T(P_2-P_1), T(P_2-P_3), T(P_2-P_4), \dots, T(P_2-P_n) \right\} \xrightarrow{\min} (P_2-P_k), \text{ itd.}$$

1, 2, ..., i, k, n - indeksy potoków

Następnie, wyznaczamy kolejne poziomy drzewa wariantów, eliminując ze zbioru utworzonego A_n^2 już ustalone zestawienia. Rozwijając gałęzie drzewa wariantów w kierunkach ustalonych na poprzednim etapie, wybieramy ze zbioru zestawień potoków pozostałe w logicznym ciągu elementy, wyznaczając kolejności potoków w zbiorze.

Zaproponowana tu strategia podziału wynika z faktu, że na kolejnych poziomach drzewa wariantów wartości liczbowe pomocniczych wskaźników charakteryzujących węzły drzewa, są coraz to większe. Tworzy go suma odpowiednich wartości $T(A)$ wynikająca z możliwego zestawienia potoków. Na każdym poziomie wzrasta ona o jeden składnik a na ostatnim poziomie drzewa rozwiązań do sumy $T(A)$ dodajemy T , czas realizacji robót w ostatnim potoku.

Porównanie wyników końcowych utworzonych z sumy wartości pomocniczych $T(A)$, ustalonych zestawień w ciągu oraz czasu trwania ostatniego potoku i wybór spośród nich najmniejszej liczby, wskazuje kolejność potoków zapewniającą skrócenie terminu realizacji, w stosunku do zadanej kolejności.

W przypadku gdy węzły drzewa wariantów określa się z uwzględnieniem jednakowej liczby elementów, przegląd przestrzeni rozwiązań odbywa się najczęściej drogą porównania wszystkich wartości charakteryzujących węzły drzewa, tworzących wektor $[T]$ na wyższych poziomach. Wzrasta tym samym liczba operacji, wydłużając znacznie czas pracy komputera.

Zagadnienie to można rozwiązać szybciej i prościej eliminując konieczność porównywania ze sobą na każdym poziomie wszystkich elementów wektorów $[T]$, wykorzystując dostrzeżoną podczas praktycznej weryfikacji algorytmu, poszukiwania kolejności wznoszenia obiektów osiedla mieszkaniowego, przy zastosowaniu kryterium minimalno-czasowego, własności występującej pomiędzy elementami wektora $[T]$ na każdym poziomie drzewa H .

Na każdym poziomie k drzewa H przeprowadzamy selekcję elementów, wydzielaając ze zbioru elementów wektora T_k elementy o wartości najmniejszej i największej $T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1r})$

$$T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1r}) \quad n \geq 1 \geq k, n \geq r \geq k.$$

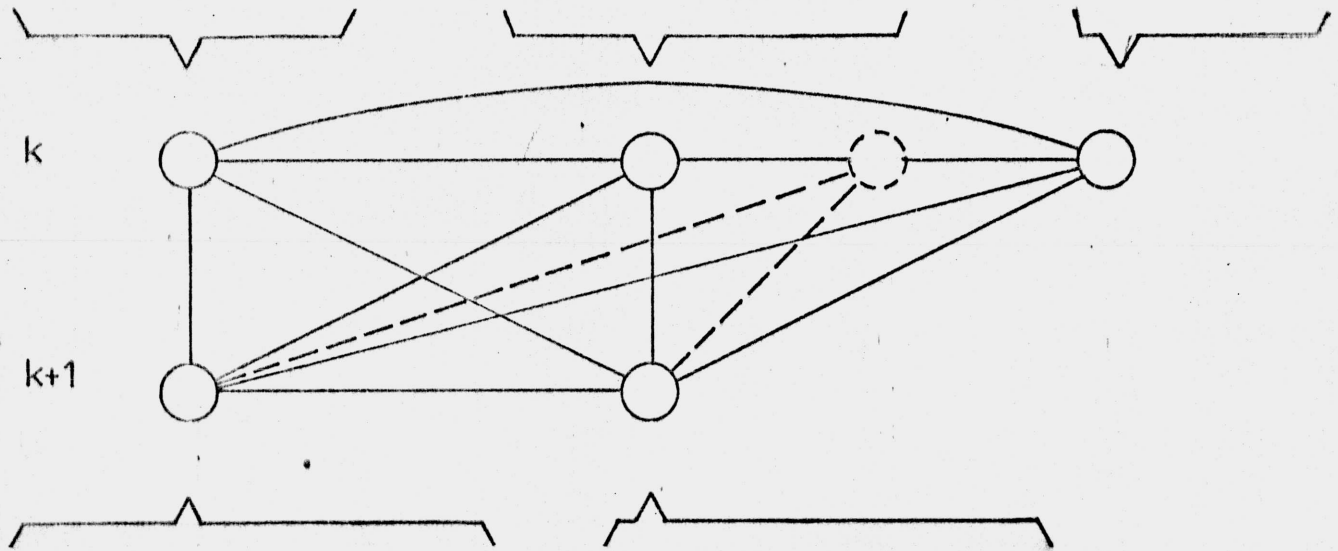
Wyznaczone dwie ekstremalne wartości, ze zbioru elementów wektora, są podstawą do przeprowadzenia porównania z elementami ekstremalnymi na wyższych poziomach $k-1, k-2, \dots, 1$.

Nazywamy $\min \{ T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1k}), T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1,k+1}), \dots, T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}) \} \Rightarrow \alpha_k$, oraz $\max \{ T(P_{11}, \dots, P_{12}, \dots, P_{1k}), T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1,k+1}), \dots, T(P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}) \} \Rightarrow \beta_k$.

Porównując β_k z $\alpha_{k-1}, \alpha_{k-2}, \dots, \alpha_1$ możemy wyszczególnić następujące przypadki:

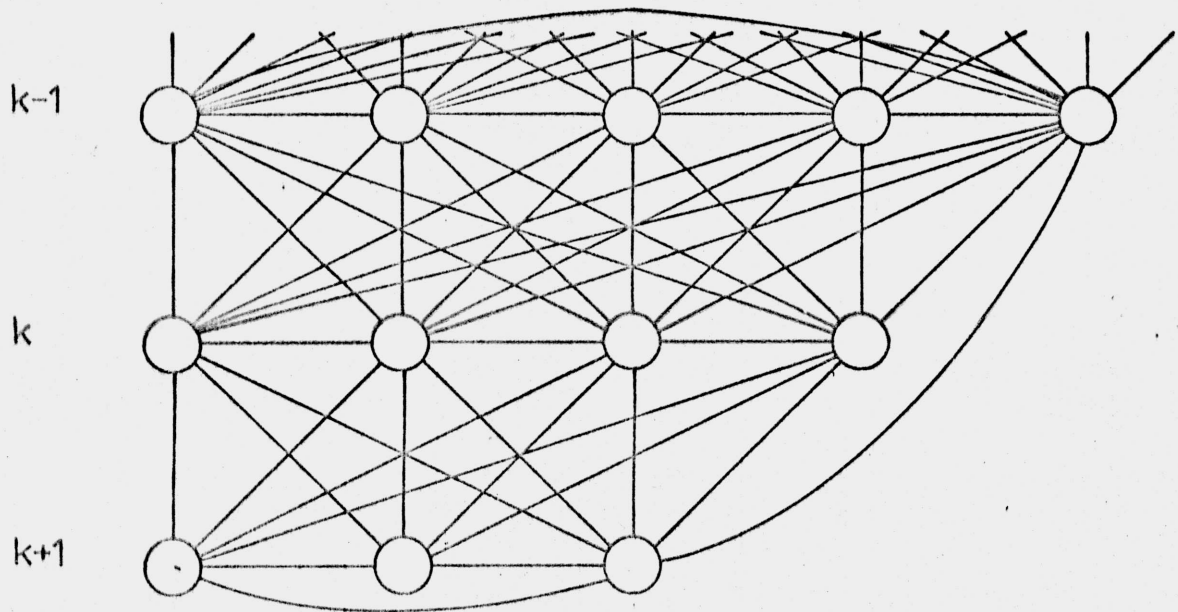
1. $\beta_k < \alpha_{k-1} \wedge \alpha_{k-2} \wedge \dots \wedge \alpha_1$ należy rozwijać gałęzie drzewa z węzła o wartościach α_k lub $\beta_k \leq \alpha_{k-1} \vee \alpha_{k-2} \vee \dots \vee \alpha_1 \rightarrow$ należy rozwijać odpowiednie gałęzie drzewa $\alpha_{k-1} \vee \alpha_{k-2} \vee \dots \vee \alpha_1$ i α_k .
2. $\beta_k > \alpha_{k-1} \vee \alpha_{k-2} \vee \dots \vee \alpha_1 \rightarrow$ należy porównać elementy wektora poziomu spełniającego powyższy warunek z β_k i jeżeli wartości ich są mniejsze, należy porównać z α_k . Jeżeli elementy mają wartości mniejsze od α_k , należy rozwijać odpowiednie gałęzie drzewa, natomiast gdy są wartości większe, rozwijać gałęzie od węzła α_k . Postępujemy w sposób analogiczny dla kolejnych ustalonych poziomów w drzewie $H, k+1, k+2, \dots, n$.

$T(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1k}), T(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1,k+1}), \dots, T(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n})$

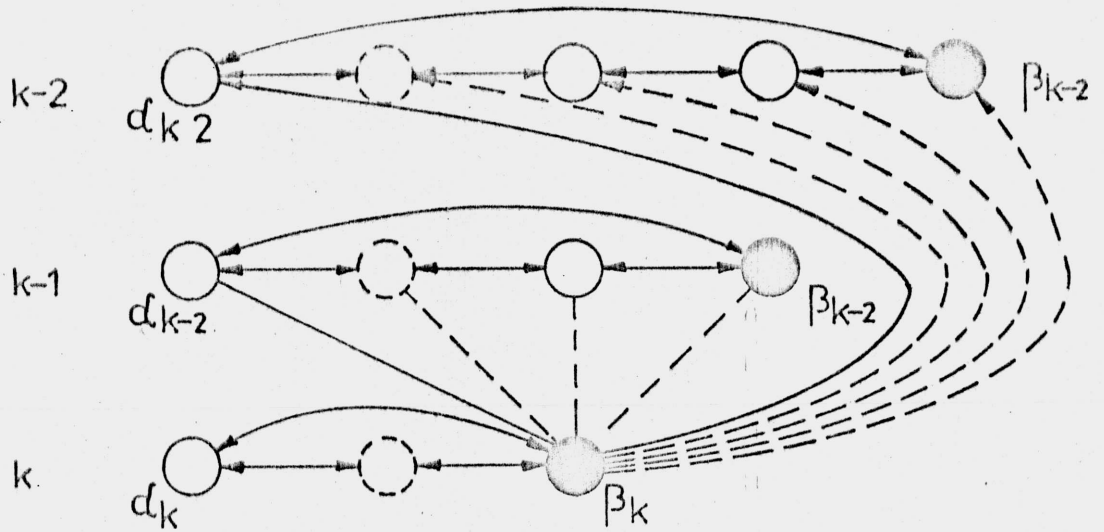


$T(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1,k+1}), \dots, T(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n})$

przy czym model ten należy rozwinąć dla pozostałych poziomów, np.



Rys. 11 Schemat przeglądu przestrzeni rozwiązań wg klasycznego algorytmu.

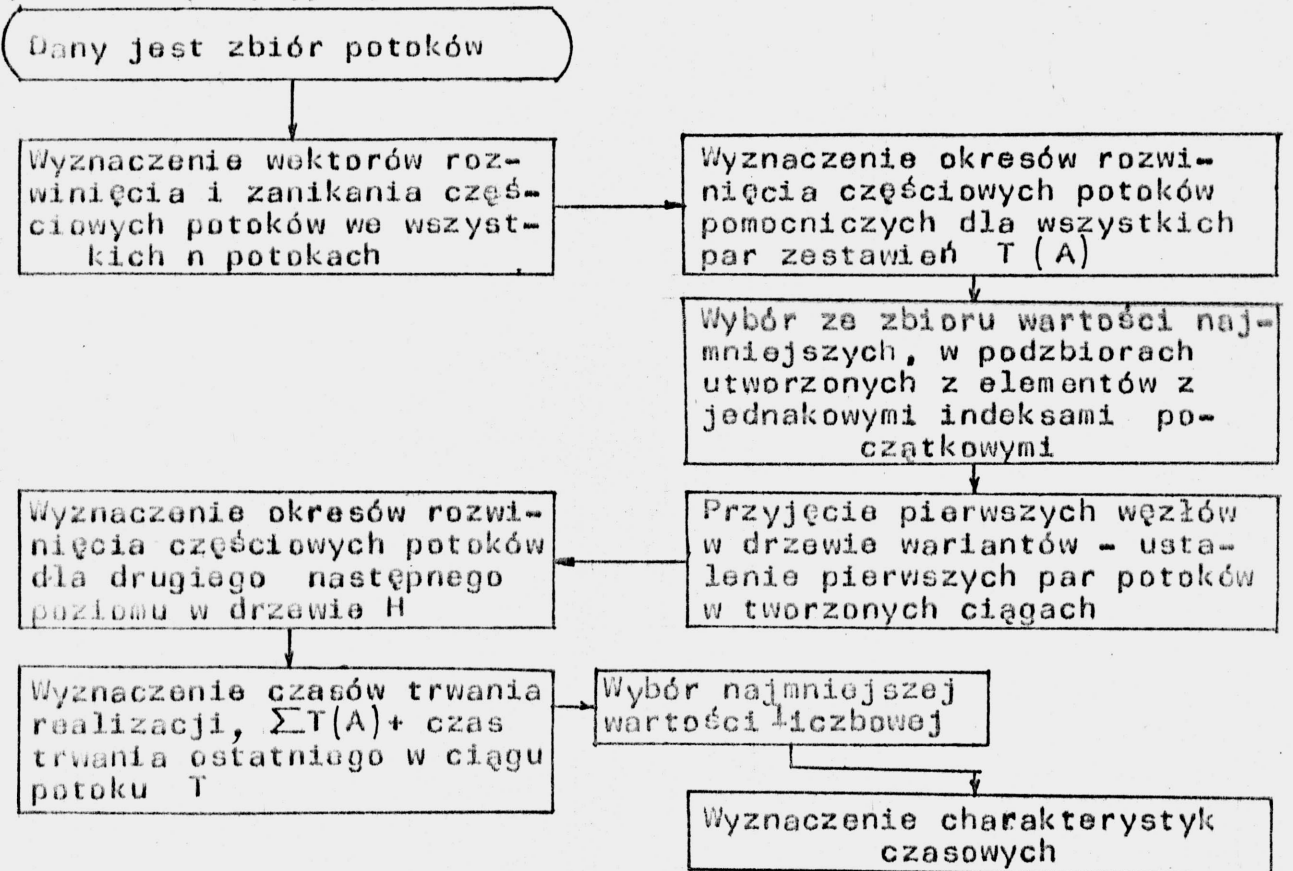


Rys. 12 Schemat przeglądu przestrzeni rozwiązań wg nowej propozycji.

Oznaczenia:

- > powiązania występujące w każdym przypadku,
- - - -> powiązania występujące w szczególnych przypadkach.

Wykorzystanie powyższego algorytmu zmniejsza pracochłonność obliczeń, co ma szczególne znaczenie dla wykorzystania pojemności pamięci operacyjnej komputera.



Rys. 13 Schemat algorytmu szeregowania w zbiorze potoków.

8.2 Praktyczne wykorzystanie algorytmu

Rozwiązanie zagadnienia szeregowania zbioru potoków, przedstawiono na podstawie danych liczbowych z realizacji obiektów osiedla mieszkaniowego Szwałowo-Ozierki w Leningradzie.

Wydzielono cztery potoki ($n=4$), w których została ustalona kolejność realizowanych obiektów oraz metoda ich organizacji tab. 17

Sporządzono macierze czasów wykonania robót na frontach, z uwzględnieniem kolejności prowadzenia robót, z minimalno-czasowym kryterium.

Tabela 12

Potok	Kolejność realizowanych działań	Czas realizacji, dni	Metoda
P_1	3-5-1-4-2	385	I
P_2	2-5-4-1-3	379	I
P_3	5-3-1-2-4	322	III
P_4	2-3-4-1-5-	246	III

Tabela 13

Macierze czasów realizacji obiektów, z ustaloną kolejnością ich wykonania w pptokach, wg tab. 15 .

Potok P_1

Obiekt	RODZAJE ROBÓT CZĘŚCIOWE PROCESY							
3	0	0	0	0	37	30	19	7
5	0	0	0	0	31	28	14	7
1	11	58	9	58	46	40	20	10
4	0	0	0	0	37	30	19	7
2	17	85	9	45	30	25	15	7

Potok P_2

OBIEKT	RODZAJE ROBÓT (CZĘŚCIOWE PROCESY)							
2	0	0	0	0	45	35	24	7
5	0	0	0	0	46	45	15	9
4	11	58	9	57	46	45	15	9
1	13	62	9	54	29	20	19	7
3	0	0	0	0	29	20	19	7

Potok P_3

OBIEKT	RODZAJE ROBÓT (CZĘŚCIOWE PROCESY)							
5	4	21	9	42	31	24	107	6
3	0	0	0	0	45	31	28	7
1	4	22	9	43	32	24	18	7
2	13	63	9	54	29	25	15	7
4	0	0	0	0	29	23	16	7

Potok P_4

OBIEKT	RODZAJE ROBÓT (CZĘŚCIOWE PROCESY)							
2	0	0	0	0	45	33	26	8
3	0	0	0	0	45	33	26	8
4	0	0	0	0	45	33	26	8
1	25	45	9	56	32	30	12	8
5	0	0	0	0	30	29	11	8

Wybór potoku ze zbioru $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, na pierwsze miejsce w ciągu. Macierz czasów rozwijania (r) częściowych potoków i ich związania (z) w potoku kompleksowym :

$$T_1^{r,z} = \begin{bmatrix} 11, 134, 9, 0, 56, 81, 56, 7 \\ 28, 126, 9, 94, 78, 28, 15, 7 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ z \end{matrix}$$

$$T_2^{r,z} = \begin{bmatrix} 11, 111, 9, 0, 57, 92, 60, 7 \\ 24, 107, 9, 102, 84, 27, 19, 7 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ z \end{matrix}$$

$$T_3^{r,z} = \begin{bmatrix} 4, 21, 9, 42, 31, 24, 107, 6 \\ 21, 89, 9, 54, 69, 23, 50, 7 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ z \end{matrix}$$

$$T_4^{r,z} = \begin{bmatrix} 0, 0, 0, 0, 45, 33, 26, 8 \\ 25, 45, 9, 56, 62, 30, 11, 8 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ z \end{matrix}$$

Obliczenie $T(A)$ dla możliwych zestawień potoków :

$$T(P_1, P_2)$$

$$\begin{array}{l} z: 28, 126, 9, 94, 78, 28, 15, 7 \\ r: 0, 11, 111, 9, 0, 57, 92, 60 \end{array} \left| \rightarrow 204 \right.$$

$$T(P_1, P_3)$$

$$\begin{array}{l} z: 28, 126, 9, 94, 78, 28, 15, 7 \\ r: 0, 4, 21, 9, 42, 31, 24, 107 \end{array} \left| \rightarrow 259 \right.$$

$$T(P_1, P_4)$$

$$\begin{array}{l} z: 28, 126, 9, 94, 78, 28, 15, 7 \\ r: 0, 0, 0, 0, 0, 45, 33, 26 \end{array} \left| \rightarrow 335 \right.$$

$$T(P_1, P_1)$$

$$\begin{array}{l} z: 24, 107, 9, 102, 84, 27, 19, 7 \\ r: 0, 11, 134, 9, 0, 56, 81, 56 \end{array} \left| \rightarrow 172 \right.$$

$T(P_2, P_3)$

z: 24, 107, 9, 102, 84, 27, 19, 7
r: 0, 4, 21, 9, 42, 31, 24, 107

→ 250

$T(P_2, P_4)$

z: 24, 107, 9, 102, 84, 27, 19, 7
r: 0, 0, 0, 0, 0, 45, 33, 26

→ 326

$T(P_3, P_1)$

z: 21, 89, 9, 54, 69, 23, 50, 7
r: 0, 11, 134, 9, 0, 56, 81, 56

→ 99

$T(P_3, P_2)$

z: 21, 89, 9, 54, 69, 23, 50, 7
r: 0, 11, 111, 9, 0, 57, 92, 60

→ 111

$T(P_3, P_4)$

z: 21, 89, 9, 54, 69, 23, 50, 7
r: 0, 0, 0, 0, 0, 45, 33, 26

→ 242

$T(P_4, P_1)$

z: 25, 45, 9, 56, 62, 30, 11, 8
r: 0, 11, 134, 9, 0, 56, 81, 56

→ 59

$T(P_4, P_2)$

z: 25, 45, 9, 56, 62, 30, 11, 8
r: 0, 11, 111, 9, 0, 57, 92, 60

→ 66

$T(P_4, P_3)$

z: 25, 45, 9, 56, 62, 30, 11, 8
r: 0, 4, 21, 9, 42, 31, 24, 107

→ 121

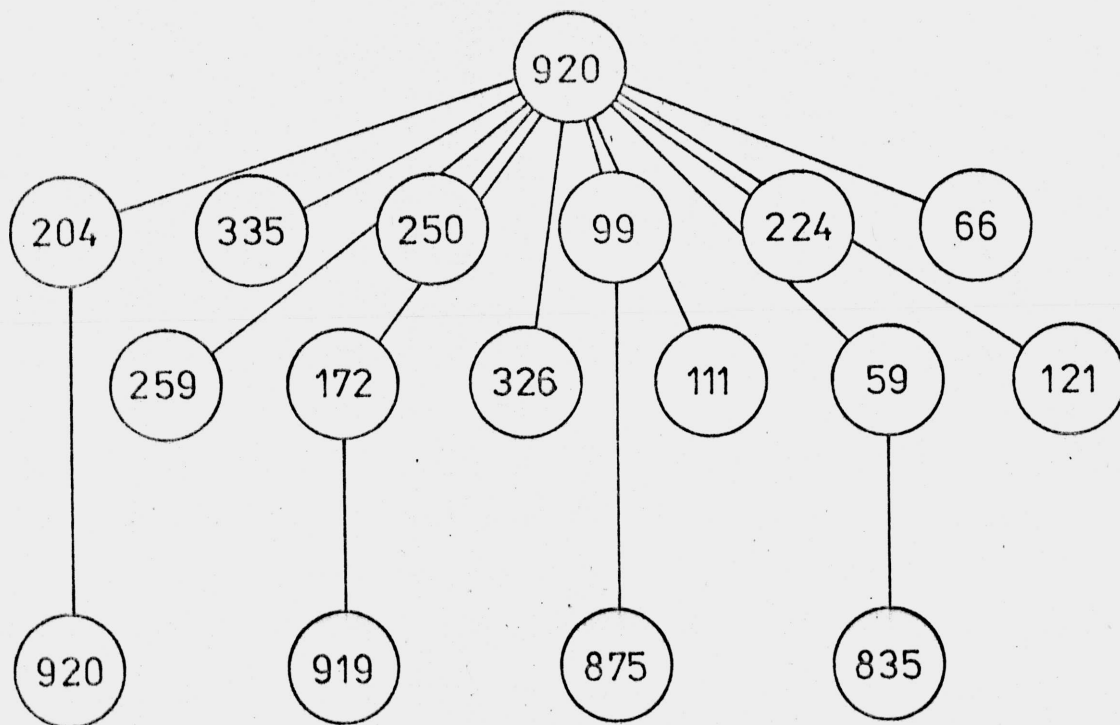
Tabela 14

Wyznaczenie ciągów potoków, z określeniem węzłów w drzewie wariantów

Zestawienie potoków	T (A)	Wyznaczenie możliwych ciągów potoków utworzonych w zestawieniu	T (A) + T
P ₁ , P ₂	204 •	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄	920
P ₁ , P ₃	259		
P ₁ , P ₄	335		
P ₂ , P ₁	172 •	P ₂ , P ₁ , P ₃ , P ₄	919
P ₂ , P ₃	250		
P ₂ , P ₄	326		
P ₃ , P ₁	99 •	P ₃ , P ₁ , P ₂ , P ₄	875
P ₃ , P ₂	111		
P ₃ , P ₄	224		
P ₄ , P ₁	59 •	P ₄ , P ₁ , P ₂ , P ₃	835
P ₄ , P ₂	66		
P ₄ , P ₃	121		

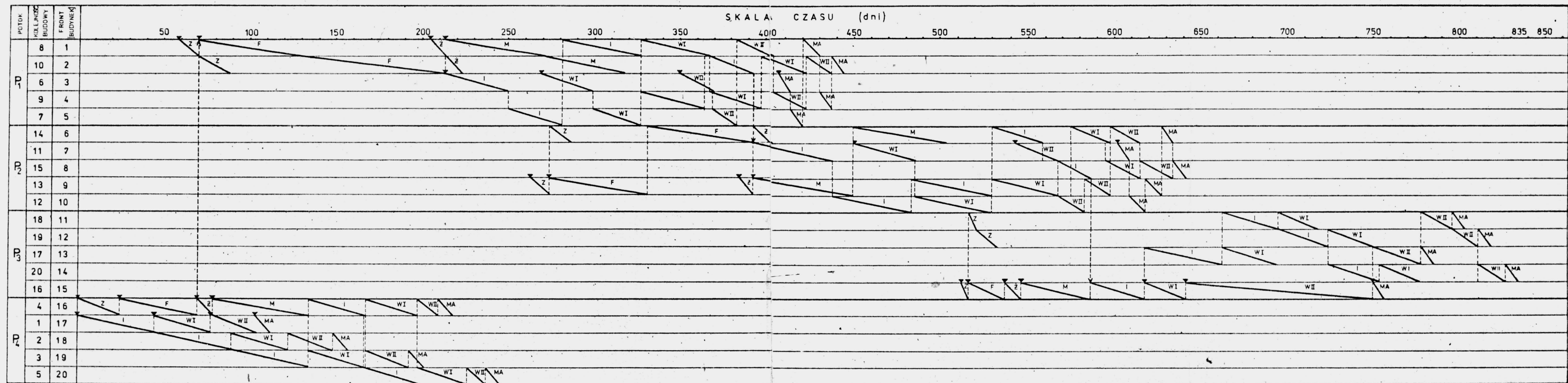
• - najmniejsza wartość T (A) w podzbiorze.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, uzyskano nową kolejność potoków P₄, P₁, P₂, P₃, zapewniającą zrealizowanie zadania inwestycyjnego w 835 jednostek czasowych. Zapewnia to skrócenie terminu realizacji o 9,2 %, w stosunku do terminu wyznaczonego przy zadanej kolejności potoków P₁, P₂, P₃, P₄, tj. 920 jednostek.



Rys. 14 Drzewo wariantów do przykładu.

Planowanie realizacji wieloletnich przedsięwzięć inwestycyjnych, np. budowa osiedla mieszkaniowego wymaga, w przypadku stosowania metod równoległe-potokowych, uwzględnienia kolejności potoków w procesie realizacyjnym. Prezentowany algorytm zapewnia ustalenie kolejności planowanych do realizacji potoków, przy zastosowaniu minimalno-czasowego kryterium, zachowując ciągłość pracy w procesach wiodących. Zaproponowana strategia podziału zmniejsza liczbę operacji logicznych, co ma istotne znaczenie dla wykorzystania pojemności pamięci operacyjnej komputera, a w efekcie obniża pracochłonność obliczeń w procesie projektowania organizacji budowy.



OZNACZENIA:

Z-ROBOTY ZIEMNE
F-ROBOTY FUNDAMENTOWE

Ż-MONTAŻ ŻURAWIA
M-MONTAŻ BUDYNKU

WI-ROBOTY WYKOŃCZENIOWE
WII-ROBOTY WYKOŃCZENIOWE

I-ROBOTY INSTALACYJNE
MA-MAŁA ARCHITEKTURA

▼-WEJŚCIE BRYGADY NA ZESPÓŁ OBIEKTÓW
---ZEROWE SPRZĘŻENIE MIĘDZY POTOKAMI

RYS. 15 CYKLOGRAM POTOKU O STRUKTURZE RÓWNOLEGLEJ Z USTALONĄ KOLEJNOŚCIĄ REALIZACJI OBIEKTÓW.

9. SPOSÓB WYBORU POTOKOWEJ METODY ORGANIZACJI ROBÓT

Brak stosowania ocen organizacyjno-technologicznych w procesie projektowania realizacji obiektów budowlanych uniemożliwia określenie rezerw występujących w produkcji budowlano-montażowej. Systemy ocen stosowane obecnie, dotyczą oceny efektów techniczno-ekonomicznych i wykorzystywane są na etapie projektowania architektonicznego i konstrukcyjnego, jako podstawa procesu decyzyjnego. W pracy [11], przedstawiono metodykę oceny potokowych metod organizacji robót, której podstawą jest zbiór elementarnych wskaźników jakości organizacji robót, oraz zaproponowano kryteria decyzyjne umożliwiające dokonanie wyboru metody organizacji. Wpływ czynników zewnętrznych wyrażony jest przez wagi nadawane kryterium elementarnym.

9.1 Podstawy teoretyczne zagadnienia wyboru metody

W procesie realizacyjnym znaczną rolę odgrywa czynnik czasu, jako jedno z kryteriów efektywności. Podejmując decyzję dotyczącą wyboru metody organizacji robót, należy w wielu przypadkach uwzględnić, oprócz zestawu kryteriów elementarnych jakości organizacji robót, czas trwania kompleksu robót.

Przedstawiona problematyka dotyczy tematyki organizacyjno-technologicznej wznoszenia wielkich kompleksów obiektów, np. osiedli mieszkaniowych, zakładów przemysłowych. Z uwagi na dużą skalę analizowanego problemu, pominięto czynnik ekonomiczny w procesie polioptymalizacji. Uwzględnienie kosztów wymagałoby oddzielnego opracowania.

Kolejność postępowania przy wyborze metody organizacji robót w potoku jest następująca:

1. Sporządzić macierz wejściową czasów wykonania robót na obiektach.
2. Wyznaczyć dla możliwych kolejności realizowanych obiektów, wartości wskaźników decyzyjnych K , uwzględniających wpływ czynników zewnętrznych przez wprowadzenie wag do kryteriów elementarnych, oraz czasy trwania robót T , wykorzystując podstawowe metody potokowej organizacji.

3. Dokonać wyboru par liczb, dla każdej metody potokowej organizacji robót: największej wartości kryterium decyzyjnego, z odpowiadającym danej kolejności prowadzenia robót na obiektach czasem ich wykonania $K_{\max}$ i T oraz wartości najkrótszego czasu realizacji kompleksu robót, wraz z odpowiadającą mu wartością kryterium decyzyjnego $T_{\min}$ i K .

4. Wyznaczyć dla każdej metody wskaźnik pomocniczy wg wzoru:

$$A = (1 - K) T_{\min} + (1 - K_{\max}) T \quad (133)$$

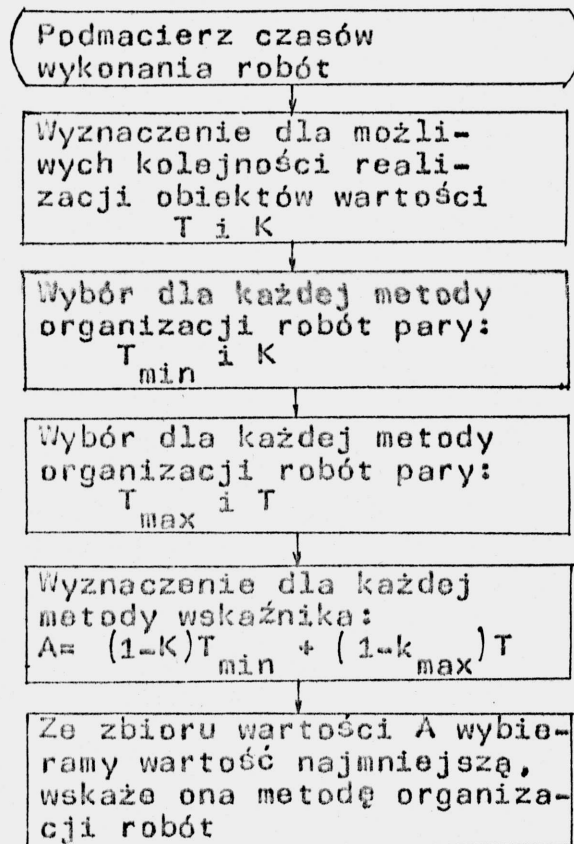
5. Spomiędzy uzyskanych wartości liczbowych wskaźnika pomocniczego A , wybieramy wartość najmniejszą:

$$A = \min \{ A_I, A_{II}, A_{III}, A_{IV}, A_V, A_{VI} \} \quad (134)$$

gdzie: $A_I, \dots, A_{VI}$ - wskaźniki pomocnicze wyznaczone kolejno dla każdej metody potokowej organizacji robót.

Wartość ta wskaże metodę organizacji robót.

Z uwagi na znaczną pracochłonność obliczeń, opracowano program na komputer, zapewniający uzyskanie niezbędnych wyników w tabelarycznej formie.



Rys. 16 Schemat procesu wyboru potokowej metody organizacji robót.

9.2 Wyniki praktycznej weryfikacji

Na podstawie badań, przeprowadzonych podczas realizacji osiedla mieszkaniowego "Szuwałowo-Ozierki" w Leningradzie^{*/} (ZSRR), sporządzono macierz czasów wykonania robót na obiektach.

Budynki mieszkalne wznoszono z elementów prefabrykowanych, wielkopłytowych serii 1GL-600A. Roboty projektowane do wykonania scalono, tworząc osiem częściowych potoków.

W procesie projektowania realizacji, niezbędnym stało się wprowadzenie elementów metody równoległego wykonania, poprzez wydzielenie równoległe realizowanych potoków (metoda równoległo-potokowa).

Tabela 15

Potoki	Rodzaje robót							
	Roboty ziemne	Roboty fundamentowe	Montaż żurawia	Montaż nadziemnej części	Roboty instalacyjne	Roboty wykonawcze I	Roboty wykonawcze II	Mala architekтура
1	2	3	4	5	6	7	8	9
P ₁	11	58	9	58	46	40	20	10
	17	85	9	45	30	25	15	7
	0	0	0	0	37	30	19	7
	0	0	0	0	37	30	19	7
	0	0	0	0	31	28	14	7
P ₂	13	62	9	54	29	20	19	7
	0	0	0	0	45	35	24	7
	0	0	0	0	29	20	19	7
	11	58	9	57	46	45	15	9
	0	0	0	0	46	45	15	9
P ₃	4	22	9	43	32	24	18	7
	13	63	9	54	29	25	15	7
	0	0	0	0	45	31	28	7
	0	0	0	0	29	23	16	7
	4	21	9	42	31	24	107	6

^{*/} Wyniki badań i opracowany na tej podstawie harmonogram budowy osiedla, zostały przyjęte i апробованы przez Zjednoczenie Budowy Osiedli Mieszkaniowych (SOKZ), z poleceniem rozpropagowania metodyki w podległych przedsiębiorstwach budowlanych. Praca wykonana została na Katedrze Organizacji Planowania i Zarządzania Budownictwem Leningradzkiego Instytutu Budowlanego (LISI).

Tabela 15 c.d.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P ₄	25	45	9	56	32	30	12	8
	0	0	0	0	45	33	26	8
	0	0	0	0	45	33	26	8
	0	0	0	0	45	33	26	8
	0	0	0	0	30	29	11	8
P ₅	6	29	9	66	47	41	21	10
	9	44	9	47	36	30	19	8
	18	77	9	78	44	40	20	9
	0	0	0	0	31	25	14	9
	0	0	0	0	63	50	31	9
P ₆	4	11	9	55	43	24	18	6
	4	11	9	55	43	24	18	6
	4	11	9	55	43	24	18	6
	8	26	9	62	70	33	26	22
	8	27	9	65	82	55	44	22
P ₇	6	26	9	59	45	33	26	6
	25	45	9	96	44	33	26	9
	0	0	0	0	45	33	26	9
	0	0	0	0	45	33	26	9
	0	0	0	0	61	46	32	12
P ₈	4	21	9	42	31	23	18	6
	11	53	9	57	44	33	26	9
	0	0	0	0	44	33	26	9
	9	45	9	47	37	27	23	8
	0	0	0	0	37	27	23	8
P ₉	4	22	9	43	32	22	20	7
	13	63	9	56	52	37	32	10
	0	0	0	0	52	37	32	10
	5	22	9	34	22	12	9	17
	5	19	9	36	22	12	9	17
P ₁₀	19	52	9	51	53	26	22	17
	5	28	9	31	20	10	7	17
	7	17	9	42	26	21	21	17
	6	28	9	40	26	11	9	17
	6	28	9	40	26	11	9	17
P ₁₁	4	36	9	11	35	12	9	16
	4	36	9	11	35	12	9	16
	8	51	9	23	42	24	21	26
	4	36	6	11	35	12	8	16
	4	36	9	11	35	12	9	16
P ₁₂	9	47	9	85	40	36	25	6
	5	19	9	46	14	12	7	5
	12	45	9	79	17	22	18	5
	15	50	9	52	20	22	18	6

Tabela 16

Wyniki symulacji cyfrowej^{*/}

Po- rok		Metoda M1	Metoda M2	Metoda M3	Metoda M4	Metoda M5	Metoda M6
P ₁	T _{max}	470	512	434	470	443	479
	K _{max} -T	0,759-385	0,700-392	0,718-366	0,715-364	0,699-374	0,674-409
	T _{min} -K	385-0,759	353-0,590	285-0,639	315-0,667	285-0,634	345-0,566
	1-K	92,8	145,8	103,2	104,9	104,3	149,8
	T _{min}						
	1-K _{max}	92,8	117,6	103,2	120,1	112,6	133,4
P ₂	T _{max}	479	524	434	479	450	495
	K _{max} -T	0,761-379	0,713-412	0,727-376	0,723-376	0,692-385	0,677-354
	T _{min} -K	379-0,761	346-0,607	272-0,672	317-0,707	272-0,671	333-0,604
	1-K	90,6	133,9	85,9	92,9	89,5	131,4
	T _{min}						
	1-K _{max}	90,6	118,2	102,6	104,2	118,6	114,3
P ₃	T _{max}	489	522	460	474	469	487
	K _{max} -K	0,769-389	0,674-485	0,751-322	0,745-327	0,687-314	0,684-445
	T _{min} -K	389-0,769	332-0,635	278-0,722	316-0,694	287-0,677	367-0,596
	1-K	89,6	121,2	80,1	96,1	95,6	148,3
	T _{min}						
	1-k _{max}	89,6	158,1	80,2	83,4	98,3	140,6
P ₄	T _{max}	399	402	399	399	402	402
	T _{max} -T	0,739-327	0,702-383	0,694-246	0,685-247	0,670-256	0,647-262
	T _{min} -K	325-0,738	335-0,598	246-0,694	247-0,685	256-0,670	259-0,631
	1-K	85,2	134,7	75,3	77,8	84,5	95,6
	T _{min}						
	1-K _{max}	85,3	114,1	75,3	77,8	84,5	92,5

*/

Wyniki uzyskano wykorzystując opracowany w Leningradzkim Instytucie Budowlanym program na komputer.

Potok		M1	M2	M3	M4	M5	M6
P ₅	T _{max}	581	611	526	561	539	571
	K _{max} -T	0,789-345	0,716-520	0,742-388	0,743-402	0,719-459	0,714-462
	T _{min} -K	436-0,789	362-0,671	340-0,691	378-0,676	340-0,671	397-0,627
	1-K	91,8	119,1	105,1	122,5	111,9	148,1
	T _{min}						
	1-K _{max}	91,8	147,7	100,1	103,3	129,0	132,1
P ₆	T _{max}	614	591	576	578	591	594
	K _{max} -T	0,821-510	0,772-498	0,770-747	0,765-502	0,732-498	0,719-526
	T _{min} -K	509-0,821	454-0,733	442-0,720	486-0,757	452-0,710	489-0,693
	1-K	91,1	121,2	123,8	118,1	131,1	150,1
	T _{min}						
	1-K _{max}	91,1	113,5	109,0	118,0	133,5	147,8
P ₇	T _{max}	537	560	520	537	520	537
	K _{max} -T	0,779-389	0,713-499	0,739-308	0,722-349	0,671-484	0,672-484
	T _{min} -K	385-0,777	398-0,646	308-0,718	340-0,717	355-0,643	365-0,616
	1-K	85,9	140,9	86,9	96,2	126,8	140,2
	T _{min}						
	1-K _{max}	86,0	143,2	86,9	97,0	159,2	158,8
P ₈	T _{max}	458	496	405	535	412	440
	K _{max} -T	0,770-361	0,724-389	0,713-370	0,714-370	0,691-386	0,682-378
	T _{min} -K	361-0,770	323-0,638	286-0,670	312-0,705	286-0,671	322-0,634
	1-K	83,0	116,9	94,4	92,0	94,1	117,9
	T _{min}						
	k-K _{max}	83,0	107,4	106,4	106,2	119,3	120,2
P ₉	T _{max}	475	481	427	440	446	459
	K _{max} -T	0,782-375	0,682-415	0,575-345	0,574-423	0,682-378	0,693-693
	T _{min} -K	375-0,782	346-0,596	320-0,609	333-0,660	329-0,612	355-0,693
	k-K						
	T _{min}	81,1	139,8	125,1	113,2	127,7	109,0
	1-K _{max}	81,8	132,0	146,6	180,2	120,2	109,0

Potok		M1	M2	M3	M4	M5	M6
P ₁₀	T _{max}	478	415	365	384	387	405
	K _{max} -T	0,774-414	0,739-350	0,729-338	0,719-363	0,705-349	0,094-374
	T _{min} -K	414-0,774	325-0,689	307-0,687	343-0,690	316-0,672	352-0,675
	1-K	93,6	101,1	96,1	106,3	103,6	114,4
	T _{min}	93,6	91,4	91,6	102,0	103,0	114,4
	1-K _{max}	93,6	91,4	91,6	102,0	103,0	114,4
P ₁₁	T	456	344	344	382	344	382
	T _{max}	456	344	344	382	344	382
	K _{max} -T	0,748-343	0,702-328	0,693-310	0,680-361	0,711-310	0,681-358
	T _{min} -K	434-0,748	324-0,600	307-0,645	358-0,678	307-0,660	358-0,681
	1-K	109,4	110,2	109,0	116,0	104,4	113,2
	T _{min}	109,4	97,7	95,2	115,5	89,6	114,2
P ₁₂	1-K _{max}	109,4	97,7	95,2	115,5	89,6	114,2
	T	527	444	443	479	443	479
	T _{max}	527	444	443	479	443	479
	K _{max} -T	0,765-487	0,700-365	0,679-365	0,678-315	0,683-365	0,671-415
	T _{min} -K	487-0,765	361-0,664	358-0,649	401-0,646	358-0,653	404-0,645
	1-K	163,1	121,3	125,7	142,0	124,2	143,4
P ₁₂	T _{min}	163,1	109,5	117,2	133,6	123,6	136,5
	1-K _{max}	163,1	109,5	117,2	133,6	123,6	136,5
	T						

Tabela 12

Tabela wartości liczbowych wskaźnika pomocniczego $A = (1-K) T_{\min} + (1 - K_{\max}) T$

Po- tok	Metoda potokowej organizacji robót					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	2	3	4	5	6	7
P ₁	185,6	263,4	206,4	245,0	216,9	283,1
P ₂	181,2	252,1	192,1	197,1	107,1	246,2
P ₃	179,2	279,3	160,3	179,5	193,9	288,9
P ₄	170,5	248,8	150,6	155,6	169,0	188,1
P ₅	183,6	266,8	205,2	225,8	240,9	280,2
P ₆	182,2	234,7	232,8	236,1	264,6	297,9
P ₇	171,9	284,1	173,8	193,2	286,0	299,0

1	2	3	4	5	6	7
P_8	*166,0	224,3	200,6	198,8	213,4	238,1
P_9	*163,6	271,8	271,7	293,4	247,9	218,0
P_{10}	*187,2	192,5	187,7	208,3	206,8	228,8
P_{11}	218,8	207,9	204,2	231,5	*194,0	228,4
P_{12}	326,2	*230,8	242,9	275,6	247,7	279,9

* - najmniejsza wartość wskaźnika.

Wyznaczając wartości liczbowe kryteriów decyzyjnych, uwzględniono cztery wskaźniki elementarne jakości organizacji robót: wykonania robót w ustalonym terminie, jednoczesność prowadzenia robót na różnych frontach, ciągłość prowadzenia robót przez brygady, nieprzerwane oddawanie brygadam frontów robót [11, 71].

Uwzględniając stanowisko kierownictwa przedsiębiorstwa wykonawczego, nadano kryteriom wg podanej kolejności wagi: 1, 1, 3, 1, podkreślając znaczenie pełnego wykorzystania specjalizowanych brygad roboczych, w procesie realizacyjnym.

W wyniku przeprowadzonej na komputerze symulacji kolejności realizacji obiektów osiedla mieszkaniowego, otrzymano zestaw danych, umożliwiających dokonanie wyboru par liczb, $K_{\max} - T$ i $K - T_{\min}$, wg p. 3 algorytmu. Wyniki przedstawiono w tabeli 17. Tabela 17 zawiera wartości wskaźników pomocniczych A, wyznaczonych wg wzoru 133, p. 4, algorytmu, porównanie których umożliwiło ustalenie metody organizacji robót dla każdego potoku, wg prezentowanego schematu postępowania.

Analiza przedstawionych wyników wskazuje, że nie zawsze minimalnej wartości czasu realizacji kompleksu obiektów, odpowiada największa wartość kryterium decyzyjnego. W przypadku stosowania oceny wielokryterialnej, przyjęta kolejność realizacji obiektów może odbiegać od kolejności wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmów przedstawionych w pracach. Prezentowana metodyka pozwala na znalezienie w zbiorze możliwych rozwiązań kolejności realizacji obiektów i metody formowania potoku, najbardziej zbliżonego do optymalnego.

10. PODSUMOWANIE

Potokowe metody organizacji robót budowlanych, przedstawione w pracach [2, 3, 6, 8, 9, 71], umożliwiają racjonalne planowanie realizacji obiektów lub niewielkich zespołów^{*/}. W przypadkach planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów (osiedli mieszkaniowych, zakładów przemysłowych, itp.), ich stosowanie napotyka poważne trudności metodologiczne.

Ograniczone możliwości wykorzystania w praktyce budowlanej potokowych metod organizacji, wywołały potrzebę ich rozwinięcia i opracowania teoretycznych podstaw zapewniających im skuteczniejsze stosowanie. Specyfika produkcji budowlanej, nakładająca szereg ograniczeń technologicznych, np. sekwencyjność częściowych procesów budowlanych, czy organizacyjnych, np. ciągłość pracy brygad, nieprzerwane prowadzenie robót na obiektach itp., wywołuje potrzebę ich uwzględnienia w procesie planowania realizacji.

Praca ta, podejmując problematykę planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów budowlanych, stanowi kolejny etap w badaniach nad problematyką nierytmicznych potoków w budownictwie, który zapoczątkowały prace [2, 3, 6, 8, 9, 71]. Jest to krok, rozszerzający obszar praktycznego stosowania potokowych metod organizacji robót, do zagadnień planowania realizacji w większej nawet skali niż plac budowy, tj. przedsiębiorstwa, regionu. Uwzględnienie tej specyfiki wymagało sformułowania i rozwiązania szeregu problemów.

Badania nad rozszerzeniem obszaru stosowania potokowych metod organizacji wywołały potrzebę identyfikacji sprzężeń czasowych oraz zbadanie charakteru i skutków ich oddziaływania na roboty budowlane.

Ważnym zagadnieniem stało się również opracowanie odpowiedniego zapisu danych liczbowych i praktycznych ograniczeń, umożliwiających przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych. Należało uwzględnić dotychczasową macierzową formę przedstawienia danych wejścio-

^{*/} Stwierdzenie to sformułowano na podstawie badań przeprowadzonych podczas realizacji osiedla mieszkaniowego "Suwałowo-Ozierki" w Leningradzie.

wych, dostosowując ją do specyfiki wielkich kompleksów /tj. różną wielkość i ilość działek, zmieniającą się liczbę i rodzaj wykonywanych robót, tzw. roboty zerowe/

Pojawiły się również problemy planowania ciągłej pracy wielu brygad jednej specjalności, w realizacji wielkich kompleksów budowlanych.

Badania nad specyfiką potoku, dla tak dużego zadania inwestycyjnego, doprowadziły do rozważań na temat jego struktury. Pojawił się problem zapewnienia ciągłości pracy w procesach wiodących (np. zapewnienie ciągłości prowadzenia robót montażowych, aby w pełni wykorzystać sprzęt montażowy), w potokach o strukturze równoległej.

Struktura szeregową potoku stwarza problemy powiązania części procesów technologicznych, wykonywanych różnymi metodami potokowej organizacji robót, aby zapewnić minimalny czas realizacji. Rozważania te, wyłaniające się podczas prób stosowania kombinacji metod równoległo i kolejno-potokowych, wskazały na potrzebę znalezienia rozwiązania tych zagadnień.

Analizując problemy tworzenia potoku o strukturze równoległej, nie można pominąć zagadnienia kolejnościowego. Ustalenie kolejności realizacji obiektów w każdym potoku można przeprowadzić, wykorzystując procedury optymalizacyjne przedstawione w pracach [2, 8, 9, 71]. Natomiast problem kolejności potoków w zbiorze, przy zachowaniu ciągłości procesów wiodących, nie został rozwiązany, a tkwią w nim znaczne rezerwy czasowe.

Z pierwszą fazą procedury optymalizacyjnej, tj. ustaleniem kolejności realizacji obiektów (działek) w każdym potoku, wiąże się zagadnienie oceny i wyboru metody potokowej organizacji robót.

Z przedstawionymi zagadnieniami, zakreślającymi obszar wiedzy dotyczącej planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych, wiąże się wiele problemów, jak np.: uwzględnienie stochastycznego charakteru procesów budowlanych, dostępności i wielkości środków realizacji, analizy kosztowej, itp.

Układ pracy wynika z systemowego traktowania procesu realizacji. Kolejne rozdziały rozprawy zawierają rozwiązania wymienionych powyżej problemów, w ustalonym logicznym porządku, przedstawionym na schemacie (rys. 1).

Budowa macierzy czasów wykonania robót dla kompleksu obiektów

Dotychczas stosowany zapis danych wejściowych, do procesu planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych, z wykorzystaniem komputera, okazał się niedoskonały. Pojawiające się trudności wynikające z różnic w ilości i wielkości działek roboczych, zmieniającej się ilości i rodzajów częściowych procesów przewidywanych do wykonania, powodowały trudności w przyjętym zapisie tych ograniczeń oraz prowadziły do błędnych wyników otrzymywanych w procesie ustalania kolejności realizacji obiektów.

Zaproponowano rozwiązanie tego zagadnienia, przez podział macierzy na podmacierze i prowadzenie w nich logicznych operacji, lub scalenie elementów macierzy w kolumnach, do jednakowej, minimalnej liczby elementów.

Przedstawione alternatywne rozwiązania eliminują możliwość pojawienia się błędów w obliczeniach, wpływających na wydłużanie się czasu realizacji kompleksu obiektów. Posługiwanie się pierwszym sposobem, choć jest on bardziej pracochłonny, zapewnia dokładniejsze wyniki, niż w przypadku wykorzystywania drugiego sposobu. Zaleca się stosować podział na podmacierze o jednakowej ilości wierszy, przy mniejszej skali planowania, tj. np. realizacji osiedla mieszkaniowego, planowania pracy przedsiębiorstwa budowlanego, gdy jednostką na skali czasu może być dzień, tydzień. Natomiast skala wymagająca mniejszej dokładności, gdy jednostką może być miesiąc, kwartał, przy planowaniu realizacji, np. w regionie, uzasadnia wykorzystanie drugiego sposobu.

Ważnym zagadnieniem, które należy rozwiązać aby prawidłowo planować realizację wielkiego kompleksu jest wyznaczenie elementów macierzy wejściowej. Dokonano przeglądu sposobów określania czasów wykonania robót, proponując sposób opracowany w Centralnym Instytucie Naukowo-Badawczym i Projektowo-Eksperymentalnym Systemów Automatyki Ministerstwa Budownictwa ZSRR (CNI-PIASS).

Określenie czasów wykonania robót przez brygady, może odbywać się na podstawie danych o ilościowym wykonaniu produkcji budowlanej w jednostkach rzeczowych i wskaźnika wykonania normy czasu danymi środkami. Umożliwia on ustalenie czasu wykonania zadanej objętości robót budowlanych. Szeroka praktyka budowlana powinna jednak

bazować na aktualnym zestawie norm pracy technicznie uzasadnionych, umożliwiających opracowanie realnych planów realizacyjnych.

Nowe warianty potokowych metod organizacji robót budowlanych

Sprzężenia czasowe, które określają specyfikę potokowych metod organizacji, przedstawionych w podstawowych pracach dotyczących tej problematyki [2, 3, 6, 8, 9, 71], wiążą roboty budowlane w szczególny sposób, nie wyczerpując wszystkich możliwości ich powiązań. Na przykład, w metodzie z uwzględnieniem zerowych sprzężeń między środkami realizacji przyjęto, że sprzężenia czasowe wiążą roboty tego samego rodzaju na kolejnych działkach (obiektach), przyjmując zakończenie roboty j na działce i , za początek roboty j na działce $i+1$, $t_{ij}^{WZ} = t_{i+1,j}^{Wr}$. Oczywiście, jest to jeden ze szczególnych przypadków ograniczeń organizacyjnych, których może być wiele, np. konieczność rozpoczęcia robót tego samego rodzaju na kolejnych działkach (obiektach) $t_{ij}^{Wr} = t_{i+1,j}^{Wr}$, konieczność jednoczesnego zakończenia robót jednego rodzaju na kolejnych działkach $t_{ij}^{WZ} = t_{i+1,j}^{WZ}$ itp.

Badając możliwości oddziaływania sprzężeń czasowych na roboty budowlane dostrzeżono, że może pojawiać się cały szereg ich kombinacji, rozszerzając znacznie obszar stosowania potokowych metod organizacji. Przeanalizowano 82 możliwe kombinacje sprzężeń czasowych, w tym sześć rodzajów nowych jakościowo sprzężeń tranzytowych (przekątniowych). Dotychczas wykorzystywano tylko 6 kombinacji, tworząc na tej podstawie sześć potokowych metod organizacji.

Zaprezentowane nowe możliwości tworzenia potoków, zapewniają pełniejsze odwzorowanie występujących w praktyce budowlanej ograniczeń organizacyjnych i technologicznych. Wpływają one na dokładność odwzorowania planowanego przebiegu procesów budowlanych i ujęcia ich specyfiki.

Sprzężenia te, umożliwiające stworzenie wielu wariantów potokowych metod organizacji, rozszerzając obszar ich praktycznego stosowania, dają organizatorom produkcji budowlanej nowe, skuteczniejsze możliwości planowania wielkich kompleksów, poprzez uwzględnienie ich specyfiki (wielkiej ilości środków realizacji, zapewnienia ciągłości pracy brygomom roboczym, możliwości równoległej pracy brygad jednej specjalności, itp.).

Proponowany, bogaty zestaw możliwości planowania realizacji, uporządkowany zgodnie z występującymi ograniczeniami technologicznymi i organizacyjnymi, stanowi nowe narzędzia harmonogramowania. Wiele wariantów metod, powstałych drogą uwzględnienia kombinacji sprzężeń czasowych, ułatwia znalezienie rozwiązania dającego najlepszy efekt, w danych warunkach realizacyjnych.

Analizując kombinacje sprzężeń czasowych występujących między robotami zbadano jakościowo nowy ich rodzaj - sprzężenia tranzytowe. Mają one kierunek działania prostopadły do kierunku działania sprzężeń stopniowych. Ich czynna rola ujawnia się, gdy w sąsiedztwie danej roboty pojawiają się roboty "zerowe". Mają wówczas bezpośredni wpływ na terminy rozpoczęcia i zakończenia danej roboty, na działanie (obiekcie).

Zagadnienie planowania pracy wielu brygad jednej specjalności

Przedsiębiorstwa budowlane o określonej strukturze zatrudnienia dysponujące często wieloma brygadami jednej specjalności, stoją przed problemem określenia zadań, zapewniających racjonalne ich wykorzystanie.

Zagadnienie to sprowadza się do określenia na jakich działkach (obiekcie) i w jakich terminach będą pracowały brygady, przy zapewnieniu ciągłości ich pracy i minimalizacji czasu realizacji kompleksu budowlanego.

Rozwiązanie tego zagadnienia osiąga się w dwóch etapach. W pierwszej kolejności należy dokonać przydziału zadań brygadam a następnie wyznaczyć czasowe charakterystyki potoku, tj. najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót, wraz z wartościami rezerw czasu.

Opracowany sposób polega na symulacji układu działka - brygada i wielokrotnym wyborze ze zbiorów przewidywanych czasów wykonywania robót na działkach (obiekcie), wartości najmniejszej, zapewniającej najkrótszy czas oczekiwania działki na brygadę roboczą. Najdogodniej operację tę jest przeprowadzić wykorzystując zapis macierzowy, ułatwiający przyporządkowanie numerowi brygady numer działki. Powtarzając procedurę do wyczerpania się zbioru działek, ustalamy miejsce i terminy pracy wszystkich brygad.

Przedstawiony w rozprawie sposób planowania pracy brygad, uwzględnia specyfikę potokowych metod organizacji, a szczególnie metodę z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji oraz metodę z zerowymi sprzężeniami między frontami roboczymi, które nakładają warunki ciągłości pracy brygad lub ciągłości prowadzenia robót na działkach obiektach. Ograniczenia te uwzględniono w opracowanym algorytmie, zapewniając ponadto, bezkolizyjną pracę brygad i minimalizację czasu wykonania zadania inwestycyjnego.

Prezentowany sposób zapewnia racjonalne, np. w skali przedsiębiorstwa, planowanie wykorzystania zasobów siły roboczej i określenie możliwości wykonawczych organizacji budowlanej.

Modelowanie potoku w strukturze szeregowej

Zagadnienie to pojawia się, gdy następuje konieczność prowadzenia robót w potoku różnymi metodami organizacji. Część robót może być wykonywana, z uwagi np. na zapewnienie ciągłości pracy brygad roboczych, z wykorzystaniem metody z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji, pozostałe natomiast, gdy zachodzi konieczność przyspieszenia robót np. metodą z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi, dającą jak wykazały badania [45, 71] najkrótszy czas realizacji. W przypadku planowania realizacji wielkich kompleksów obiektów, pojawia się również problem różnych kolejności ich wykonania w grupach robót.

Zagadnienie to rozwiązano wykorzystując elementy techniki symulacji cyfrowej i metod heurystycznych. Oczywiście, jak w poprzednich przypadkach, decydującym jest kryterium czasowe. Opracowany algorytm zapewnia rozwiązanie zagadnienia w trzech krokach.

W pierwszym kroku, wyznaczamy terminy zakończenia robót na działkach (obiekтах) w ostatnim częściowym potoku pierwszego potoku oraz zbiór czasów wykonania robót dla pierwszego częściowego potoku drugiego potoku. Drugi krok, w którym uwzględnia się różne kolejności wykonania robót, zapewnia wyznaczenie niezbędnych przerw w pracy brygad na działkach (obiekтах), w celu zachowania ich bezkolizyjnej pracy. W trzecim kroku, wyznaczamy skorygowane terminy rozpoczęcia robót na odpowiednich działkach (obiekтах), z uwzględnieniem przyjętej potokowej metody organizacji robót.

Algorytm ten zapewnia maksymalne zbliżenie w czasie obu "części" potoku, minimalizując przerwy w prowadzeniu robót na działkach a tym samym w kompleksie obiektów, uwzględniając zarówno możliwość formowania ich różnymi metodami, jak również różną kolejność prowadzenia robót.

Rozwiązanie zagadnienia modelowania potoku o strukturze szeregowej zostało przetestowane na przykładzie planowania realizacji zadania inwestycyjnego w postaci zespołu budynków osiedla mieszkaniowego, "Zakrzów" we Wrocławiu. Macierz wejściowa zawiera dane liczbowe, opracowane na podstawie obowiązujących normatywów i zasobów przedsiębiorstwa wykonawczego. W danym przypadku, wykorzystanie opracowanego algorytmu, umożliwiło skrócenie terminu realizacji tego kompleksu, z 633 jednostek do 587, tj. o 7,2 %.

Modelowanie potoku o strukturze równoległej

Planowanie realizacji wielkich kompleksów, z wykorzystaniem metod przedstawionych w pracach [2, 3, 6, 8, 9, 71], może powodować przekroczenie zadanego terminu. W tych przypadkach, skraca się czas realizacji, drogą wprowadzenia równoległych potoków obejmujących grupy obiektów. W praktyce, pojawiają się przypadki, gdy zachodzi konieczność zapewnienia ciągłości pracy maszynom, np. żurawiom wieżowym czy zestawom maszyn do robót ziemnych, w długim okresie czasu. Należy tak ze sobą połączyć wydzielone potoki, obejmujące grupy obiektów, aby zachować bezkolizyjną pracę brygad roboczych, tj. wyeliminować ich zazębienie się i zapewnić ciągłość pracy w częściowych procesach wiodących (najczęściej czas jego trwania ma decydujący wpływ na termin realizacji kompleksu) oraz zminimalizować czas trwania robót.

Zagadnienie to rozwiązano, wykorzystując m.in. dostrzeżoną podczas badań na tym zagadnieniu analogię z ideą wyznaczania okresów rozwinięcia częściowych potoków T_j^r , leżącą u podstaw potokowej metody organizacji robót z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji. Dostosowanie tej idei do nowych ograniczeń umożliwiło opracowanie skutecznego algorytmu, zapewniającego znalezienie poszukiwanego rozwiązania. Otrzymana w wyniku przeprowadzonych obliczeń wartość liczbową, określa terminy rozpoczęcia robót na pierwszej działce (obiekcie) drugiego potoku, z zachowaniem wyżej wymienionych ograniczeń.

Przetestowano prezentowany algorytm, wykorzystując dane o czasach wykonania robót na obiektach osiedla mieszkaniowego "Zakrzów" we Wrocławiu. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że zastosowanie algorytmu dla zadania inwestycyjnego polegającego na wzniesieniu zespołu budynków mieszkalnych, umożliwia skrócenie czasu realizacji z 1108 jednostek do 1038, tj. o 6,3 %.

Ustalenie kolejności w zbiorze potoków

Zmiana kolejności realizacji obiektów wpływa na terminy wykonania ich kompleksu. Poszukiwanie najkrótszego terminu realizacji wielkiego kompleksu polega na uporządkowanym przeglądzie przestrzeni możliwych rozwiązań. W rozprawie, opracowano sposób ustalania kolejności potoków w ich zbiorze.

Potoki zharmonizowane wewnętrznie, przy wykorzystaniu potokowych metod organizacji robót i sposobów przedstawionych w rozprawie, zapewniając minimalny czas realizacji dla objętych nimi grup obiektów, są bazą na której dokonuje się procesu ustalania ich kolejności w zbiorze.

Opracowano sposób ustalania kolejności potoków, wykorzystujący metodę podziału i ograniczeń (Branch and Bound). Zaproponowano strategię podziału drzewa wariantów na kolejne poziomy, zapewniającą przegląd możliwych zestawień potoków, z funkcją celu umożliwiającą wybór kierunku przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, w postaci $\min T(A)$, tj. okresu rozwinięcia potoków w zestawieniu. Sposób ten zapewnia szybki przegląd możliwych rozwiązań i znalezienie w kolejnych krokach rozwiązania lepszego od wyjściowego. W przykładzie testującym wykorzystano macierz wejściową, zawierającą elementy - czasy wykonania robót na dwudziestu obiektach osiedla mieszkaniowego Szuwałowo-Ozierki w Leningradzie, zgrupowane i zharmonizowane wewnętrznie w czterech potokach. Zastosowanie opracowanego sposobu, do ustalania kolejności potoków, zapewniło dla nowej sekwencji potoków, skrócenie terminu wykonania tego zadania z 920 jednostek do 813, tj. o 13,2 %.

Prowadząc badania nad tą problematyką, analizując sposoby przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, dostrzeżono możliwość przyspieszenia i uproszczenia procedury wyboru kierunków przeszukiwań. Zagadnienie to rozwiązywano w przypadku, gdy węzły drzewa wariant-

tów na każdym jego poziomie określone są z uwzględnieniem jednokowej liczby elementów, drogą porównywania wszystkich wartości na wyższych poziomach i porównywania z rozpatrywanym elementem. Liczba wykonywanych operacji jest zawsze duża, co upływa na długi czas pracy komputera.

Zaproponowano rozwiązanie, eliminujące szereg operacji, polegające na wyborze na każdym poziomie drzewa węzłów, charakteryzujących się ekstremalnymi wartościami i dokonywaniu wyboru kierunków przeszukiwań z ich pomocą. Skraca to czas wykonywania obliczeń i upraszcza procedurę.

Sposób wyboru metody potokowej organizacji robót

Różnorodność możliwości organizacyjnych powodowanych wykorzystaniem bogatego zestawu potokowych metod organizacji robót i ich wariantów, wywołuje potrzebę określenia sposobu wyboru najlepszej z nich, przy uwzględnieniu dodatkowych ograniczeń z otoczenia.

Opracowano sposób wielokryterialnej oceny stosowanych metod, biorąc pod uwagę oprócz wskaźnika czasowego, wskaźniki jakości organizacji robót: wykonanie robót w ustalonym terminie, jednocześnie prowadzenie robót na różnych działkach (obiektach), ciągłość prowadzenia robót przez brygady, nieprzerwane oddawane brygadam frontów robót (działek).

Zaproponowano wykorzystanie syntetycznego wskaźnika $A = (1 - K)T_{min} + (1 - K_{max})T$, zapewniającego powiązanie wielu kryteriów jakościowych z czasem realizacji, umożliwiającego sprawdzenie ich do porównywalnych wielkości i wybór najmniejszej liczby wskazującej najlepszą metodę organizacji.

Opracowany algorytm przetestowano, wykorzystując dane liczbowe zebrane podczas budowy osiedla Szuwałowo-Ozierki w Leningradzie, dla 42 budynków zgrupowanych w 12 potokach. Porównanie wyników obliczeń umożliwiło wskazanie najlepszej, w danych warunkach, metody potokowej organizacji, dla każdego potoku.

W N I O S K I K O Ń C O W E

1. W pracy omówiono siedemdziesiąt sześć wykrytych kombinacji sprzężeń czasowych, w tym sześć nowych jakościowo sprzężeń tranzytowych, które są podstawą zaproponowanych wariantów potokowych metod organizacji. Dotychczas znano i stosowano sześć rodzajów sprzężeń, które stały się podstawą sześciu potokowych metod organizacji.
2. Rozwiązano problem racjonalnego planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych przez uwzględnienie i sformalizowanie struktur szeregowej i równoległej w potoku, zapewniając skrócenie terminu wykonania zadania inwestycyjnego.
3. Znaleziono sposób wyznaczania racjonalnej kolejności realizacji obiektów w wielkim kompleksie budowlanym, z uwzględnieniem minimalno czasowego kryterium efektywności.

SPIS LITERATURY

1. Adamiecki K.: Metoda wykreślna organizowania pracy zbiorowej w walcowniach. Przegląd Techniczny 1909.
2. Afanasev V.A.: Algoritmy formirovanija i rasčeta potočnoj organizacii rabot, VIKI, Leningrad 1972.
3. Afanasev V.A.: Klasifikacija metodov organizacii rabot, Ekonomika Stroitelstva Nr 8, 1975.
4. Afanasev V.A.: Kriterii ocenki organizacii stroitelstva, Ekonomika Stroitelstva Nr 8, 1972.
5. Afanasev V.A., Karelin V.V.: Opredelenie vozmožnogo minimuma proddžitelnosti vypolnenija kompleksa rabot, Kibernetika Nr 1, Akademija Nauk USSR, 1974.
6. Afanasev V.A., Velickin V.Z.: Proektirovanie organizacii rabot s pomoščju EVM, VIKI, Leningrad 1975.
7. Afanasev V.A., Mrozowicz J., Smironov A.: Układ v razvite teorii potočnoj organizacii rabot, Na strojkach RosiiNr 8, 1978.
8. Afanasev V.A.: Algoritmy formirovanija, rasčeta i optimizacii metodov organizacii rabot. LISI, Leningrad 1980.
9. Afanasev V.A.: Modeli organizacii rabot, LISI, Sbornik trudov Nr 6, Leningrad 1977.
10. Afanasev V.A., Mrozowicz J., Hejducki Z.: Metoda potokowej organizacii robót z krytycznymi robotami wyznaczonymi przy uwzględnieniu sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych. XXVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, KN PZITB, Krynica 1980, T5, s. 3-11.
11. Afanasev V.A., Mrozowicz J., Hejducki Z.: Kompleksowa ocena metod organizacii robót. XXVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, KN PZITB, Krynica 1981, T5, s. 7-13.
12. Afanasev V.A., Mrozowicz J., Hejducki Z.: Modelowanie nierytmicznych potoków z uwzględnieniem sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych z wykorzystaniem komputera. III Konferencja Metody i Środki Projektowania Automatycznego, Warszawa 1981, T1, s. 5-11

13. Bąbiński Cz.: Elementy nauki o projektowaniu. WNT, Warszawa 1972.
14. Berman H.: The Critical Path Method for Project Planning and Control. The Constructor, ss. 88-94, September 1961.
15. Bileckij O.S.: Isledovanie voprosov nadežnosti stroitel'no-go potoka. Dysertacija na soiskanie naučnoj stepeni, Kiev 1970.
16. Biliński T.: Projektowanie techniczne, Wyższa Szkoła Inżynierska w Zielonej Górze. Wydawnictwo Uczelniane, 1982.
17. Biliński T., Gaczek W.: Budownictwo Systemowe, PWN, Warszawa 1983.
18. Bładowski S.: Metody sieciowe w planowaniu i organizacji pracy. PWE, Warszawa 1970.
19. Budnikov M.S.: Potočnoje stroitel'stvo posjołkov, izd. Akademii architektury USSR, Kijev, 1949.
20. Budnikov M.S., Nadawnij P.I., Rybalskij W.I.: Osnovy potočnogo stroitel'stva. Gosstrojizdat USSR, Kijów 1961.
21. Budzyński S., Chorobiński A.: Metoda podziału i ograniczeń w projektowaniu zakładów przemysłowych. PWN, Warszawa 1967.
22. Burgess A.R., J.B. Killebrew, Variation in Activity Level on a Cyclical Arrow Diagram. J. Ind. Eng., vol. 13, Nr 2, March - April, 1962.
23. Chanas S., Radosiński E.: Model czasu realizacji czynności w świetle teorii zbiorów rozmytych. Problemy Organizacji Nr 2/1976.
24. Goffman E.G.: Teoria szeregowania zadań. WNT, Warszawa 1980.
25. Czachorowski J.: Metody optymalizacji procesów inwestycyjnych w budownictwie. Wyższa Szkoła Inżynierska w Zielonej Górze, Zielona Góra 1978.
26. Czachorowski J.: Problemy sterowania procesami inwestycyjno-budowlanymi z przykładami zastosowania. Wyższa Szkoła Inżynierska w Zielonej Górze, 1982.
27. Czachorowski J.: Programowanie sieciowe - Wprowadzenie do metody PERT, Wydawnictwo Uczelniane WSI, Zielona Góra 1978.

28. Czapliński K., Mrozowicz J., Musiał W.: Podstawy metodologii projektowania w budownictwie. Wyd. PWr, Wrocław 1980.
29. Czapliński K., Mrozowicz J.: Realizacja obiektów budowlanych, Wyd. PWr, Wrocław 1982.
30. Czapliński K., Hejducki Z., Mrozowicz J.: Modellieren des Flusses mit Dauerbetrieb der Brigaden in Diagonalen /mit Null-Stufenkopplungen/. VII Internationaler Kongress Industrielles Bauen, Heft 11, 1984, s. 121-127.
31. Dyżewski A.: Nowe kierunki graficznego planowania organizacji budowy. ITB, Warszawa 1950.
32. Dyżewski A.: Technologia i organizacja budowy. Arkady, Warszawa 1971.
33. Eisner H.: Generalized Network Approach to the Planning and Scheduling of a Research Program. Operations Research. Vol. 10, Nr 1/62.
34. Ford L.R. i D.R. Fulkerson, Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, N. J. 1962.
35. Fulkerson D.R., A Network Flows Computation for Project Cost Curves, Management Sci., vol. 7, Nr 2, ss. 167-179, January 1961.
36. Gedymin: Metody optymalizacji w planowaniu sieciowym. PWN, Warszawa 1974.
37. Gordon J.: Symulacja systemów. WNT, Warszawa 1974.
38. Gusakov A.A.: Osnovy projektirovanija organizacii stroitel'nogo proizvodstva /V ustovijach ASU/, Moskva, Strojizdat, 1977.
39. Gusakov A.A.: Organizacionno-technologiceskaja nadeznost' stroitel'nogo proizvodstva. Strojizdat, Moskva 1974.
40. Grabowski J.: Uogólnione zagadnienia optymalizacji kolejności operacji w dyskretnych systemach produkcyjnych. Pr. Nauk Inst. Cybern. 50, Monografie 9, Wyd. PWr, Wrocław 1979.
41. Grabowski J.: Algorytmy optymalizacji i sterowania w dyskretnych systemach produkcyjnych. Pr. Nauk. Inst. Cybern. 42, Monografie 7, Wyd. PWr, Wrocław 1977.

42. Grabski A.: Zastosowanie elementów teorii mnogości przy określaniu struktur organizacyjnych przedsiębiorstw budowlano-montażowych. Zeszyt Naukowy Nr 362, Budownictwo, z. 32, Politech. Śląska, Gliwice 1973.
43. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Ocena metod organizacji robót. Seminarium Naukowe Instytutu Melioracji Akademii Rolniczej. Wrocław 1980.
44. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Modelowanie potoku o strukturze równoległej zapewniającej ciągłość pracy w procesach wiodących, XXVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, KN PZITB, Krynica 1982, T5, s. 39-45.
45. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Komputerowo wspomagane projektowanie nierytmicznych ciągów na przykładzie realizacji wybranych obiektów osiedla mieszkaniowego. Konferencja Naukowa Jednostek Jednoimiennych Technologii i Organizacji Budownictwa, Zielona Góra, 1982, T2, s. 69-75.
46. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Modelowanie nierytmicznego potoku w procesie planowania remontu kompleksu obiektów mieszkalnych. I Konferencja Naukowa Problemy Remontowe Substancji Mieszkaniowej, Szklarska Poręba, 1982, s. 105-113.
47. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Zagadnienia wykorzystania zasobów w procesie planowania realizacji kompleksu obiektów. Problemy Rozwoju Budownictwa, Kwartalnik Naukowy Instytutu Organizacji, Zarządzania i Ekonomiki Przemysłu Budowlanego, 2/1984, s. 8-11.
48. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Nowe metody potokowej organizacji robót. Przegląd Budowlany 4/1984, s. 179-183.
49. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Komputerowo wspomagane modelowanie nierytmicznych potoków. Przegląd Budowlany 12/1984.
50. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Problemy harmonogramowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych. IV Krajowa Konferencja Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 1984, z. 75, s. 19-27.
51. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Planowanie ciągłej pracy brygad kompleksowych w remontach obiektów budowlanych. II Konferencja Naukowo-Techniczna, Problemy Remontowe Substancji Mieszkaniowej Karpacz, 1984, s. 50-55.

52. Held M., Karp R.M.: A dynamic Programing Approach to Sequensing Problems. SIAM Journal Appl. Math. vol. 10, No 1, 1961.
53. Jaworski K.: Projektowanie realizacji budowy według kryterium niezawodności. WPW, Warszawa 1980.
54. Jaworski K.: Niezawodność dopuszczalna programów sieciowych realizacji budowy. Konferencja Naukowa Instytutów Jednoimien-nych Technologii i Organizacji Budownictwa. Kraków - Janowice 1978.
55. Jaworski K., Minasowicz A.: Wybrane aspekty zwiększania nie-zawodności programów sieciowych. Przegląd Budowlany, 3/1978.
56. Jaworski K.: Metoda rozdziału zapasu czasu czynności w stochas-tycznych programach sieciowych. Archiwum Inżynierii Lądowej, 1/1978.
57. Jaworski K., Minasowicz A.: System informatyczny "SIPROB" projektowania optymalnej realizacji budowy. Prace Naukowe IB Politechniki Wrocławskiej 27/1978, S: Konferencje .
58. Johnson S.M.: Optimal two-and three-stage production schedules with set-up times included, Naval Res. Quart, vol. 1, 1954.
59. Jurecka W., Zimmermann H.J.: Operations Research im Bauwesen, Springer - Verlag, Berlin, Weidelberg, New York 1972.
60. Kapliński O.: Niektóre problemy metody pracy równomiernej w warunkach stochastycznych. XX Jubileuszowa Konferencja Nauko-wa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB.
61. Kapliński O.: Zagadnienie optymalnej wielkości brygady roboczej w warunkach losowego charakteru pracy. Zeszyty Naukowe Polit. Poznańskiej Nr 19, 1974.
62. Kelley J.E.: Critical Path Planing and Scheduling. Mathemati-cal Basis. J. ORSA, vol. 9 Nr 3, ss. 296-320, 1961.
63. Kowalczyk B.: Macierze i ich zastosowanie, WNT, Warszawa 1978.
64. Lenkiewicz W., Jaworski K.M.: Projektowanie realizacji budowy metodą pracy równomiernej i ciągłej z uwzględnieniem losowości procesów roboczych. II Konferencja nt. "Metody i środki projek-towania automatycznego". Instytut Podstaw Budowy Maszyn Polit. Warszawskiej, 1979.

65. Lomnicki Z.A.: "Branch - and - Bound" Algorithm for-the Exact Solution of the Three - machine Scheduling Problem, Operational Research Quarterly, vol. 16, 1965.
66. Mamed-Zade: Metody rasčeta stroitelnyh potokov, Strojizdat, Moskva 1975.
67. Międzyński A.: Teoria ciągów pracy równomiernej i jej zastosowanie w budownictwie uprzemysłowionym. Praca doktorska, Warszawa 1963.
68. Michnowski Z.: Podstawy zintegrowanego modelowania graficznego - ZMG procesów realizacji inwestycji. XXIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1978.
69. Mitten L.G.: Branch - and - Bound Methods, General Formulation and Properties, Operations Research, No 18, 1970.
70. Moliński J.: Rzeczowe planowanie produkcji w przedsiębiorstwach budowlanych w ujęciu modelowym. Warszawa 1976.
71. Mrozowicz J.: Metody potokowe organizacji procesów budowlanych o charakterze deterministycznym. WPW, Wrocław 1982.
72. Nasierowski W.: Algorytm alokacji zasobów w czasie. Przegląd Organizacji Nr 1, 1979, s. 25-29.
73. Nowicki Z.M.: Organizacja macierzowych jednostek przetwarzania potokowego realizujących operacje matematyczne. PWN, Warszawa-Łódź, 1980.
74. Nicol F.: Planification dans Le bâtiment Methode des tâches composees, Dunod, Burdas, Paris, Bruxelles, Montreal 1975.
75. Organizacja i planowanie budowy. Praca zbiorowa pod kierunkiem W. Lenkiewicza, tom I, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1979.
76. Perkowski P.: Technika symulacji cyfrowej. WNT, Warszawa 1980.
77. Perk H.N.: Nan - scheduling, file 10.3.009, IBM 650 Program Library, file 10.3.013, IBM 1620 Program Library.
78. Piórecki S.: Badania czasu pracy i wpływu jego dyspersji na wydaność produkcji w budownictwie. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Rozprawy Nr 59, Poznań 1973.

79. Pjentkovskij N.I.: *Ekonomika, Organizacija i Planirovanije stroitelstva*, Strojizdat, 1950.
80. Portugal V.M.: *Issledovanije assimptotičeskoje povedenija zadači Džonsona*, Kibernetika, Nr 11, 1971.
81. Rowiński L.: *Metoda pracy równomiernej przy realizacji budowli niejednorodnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo Nr 4, Warszawa 1955.
82. Rowiński L.: *Organizacja procesów budowlanych*. PWN, Warszawa 1979.
83. Rowiński L.: *Aspekty organizacyjne systemów budowlanych*, "Przegląd Budowlany" Nr 7/8, 1975.
84. Rowiński L.: *Organizacja produkcji budowlanej*. Arkady, Warszawa 1982.
85. Royer K.: *CPM vs Cost Control*, Bldg. Construct., ss. 62-70, November, 1963.
86. Rybalski V.I.: *O rasčete srokov i očerednosti stroitelstva s pomoščju elektronnych vyčislitelnych mašin*. *Ekonomika stroitelstva*, 1963, No 3.
87. Rybalski V.I.: *Cybernetyka w produkcji budowlanej*. Arkady, Warszawa 1970.
88. Satałkin I.N.: *Soveršenstvovaniije nizovovo planirovanija w uslovijach nepreryvnogo stroitelnoego potoka*, Izdatelstvo "Budi-velnik", Kiev 1977.
89. Shaffer L.R., J.B. Ritter, W.L. Meyer.: *The Critical Path Method*, Mc Grawhill Book Company, New York, 1965.
90. Staniszkis W.: *Metoda decydujących ciągów czynności MDC*. IOMB, Warszawa 1964.
91. Stark R.M., Nicholls R.L.: *Mathematical Foundations for Design: Civil Engineering Systems*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
92. Sevčuk B.M., Belostockij O.B., Maksimov V.P., Medina-Garsia K., Rejm S.I.: *Projektirovaniije potočnogo stroitelstva promyšlennykh predprijatij*. Izdatelstvo "Budi-velnik", Kiev 1968.

93. Škurba V.V.: Zadača trech stankov. Izdatelstvo "Nauka", Moskva 1976.
94. Voropaev V.I.: Modeli i metody kalendarnogo planirovanija v avtomatizirovanyh sistemach upravlenija stroitel'stvom. Strojizdat. Moskva 1975.
95. Ziolkowski J.: System CBC koordynacji danych w procesie budowlanym. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Nr 231, Budownictwo Lądowe, XXVII. Gdańsk 1975.

Załącznik

Komputerowo wspomagane modelowanie potoków

W skład systemu planowania procesu realizacji kompleksu obiektów budownictwa mieszkaniowego wchodzi organizator produkcji budowlanej i komputer.

Rozwiązanie zagadnienia kolejnościowego tj. ustalenie kolejności realizacji obiektów w potokach, najwygodniej jest przeprowadzić z wykorzystaniem komputera. Jest to problem o dużej złożoności obliczeniowej, wymagający przeglądu przestrzeni rozwiązań, z wyborem rozwiązania dającego najmniejszą wartość funkcji celu. W pracy posłużono się zbiorem programów opracowanych dla maszyn cyfrowych ODRA serii 1300, OPT1, OPT2, OPT3, do ustalania kolejności realizowanych obiektów oraz PRO1, PRO2, PRO3, do wyznaczania charakterystyk czasowych modelowanych potoków.

Wykorzystano ponadto program ADEL opracowany w Leningradzkim Instytucie Inżynieryjno-Budowlanym umożliwiający wyznaczanie czasów wykonania robót metodami potokowej organizacji robót, dla możliwych kolejności prowadzenia prac na obiektach (frontach), wraz z wartością kryterium decyzyjnego ($T-K$).

Rozwiązanie szeregu zagadnień przedstawionych w rozprawie, ujętych w system harmonogramowania, jest wspomagane zbiorem wyżej wymienionych programów. Uwzględnienie wpływu otoczenia, np. zmiany ilości środków realizacji, wielkości zadania inwestycyjnego, zakłócenia procesu realizacyjnego itp. odbywa się przez ingerencję organizatora produkcji budowlanej w elementy systemu.

Proces modelowania złożonych potoków wspomagany jest systemem komputerowym OPTY, elementami którego są programy: OPT1, OPT2, OPT3, PRO1, PRO2, PRO3, znajdującym się pod kontrolą systemu operacyjnego GEORGE-3.

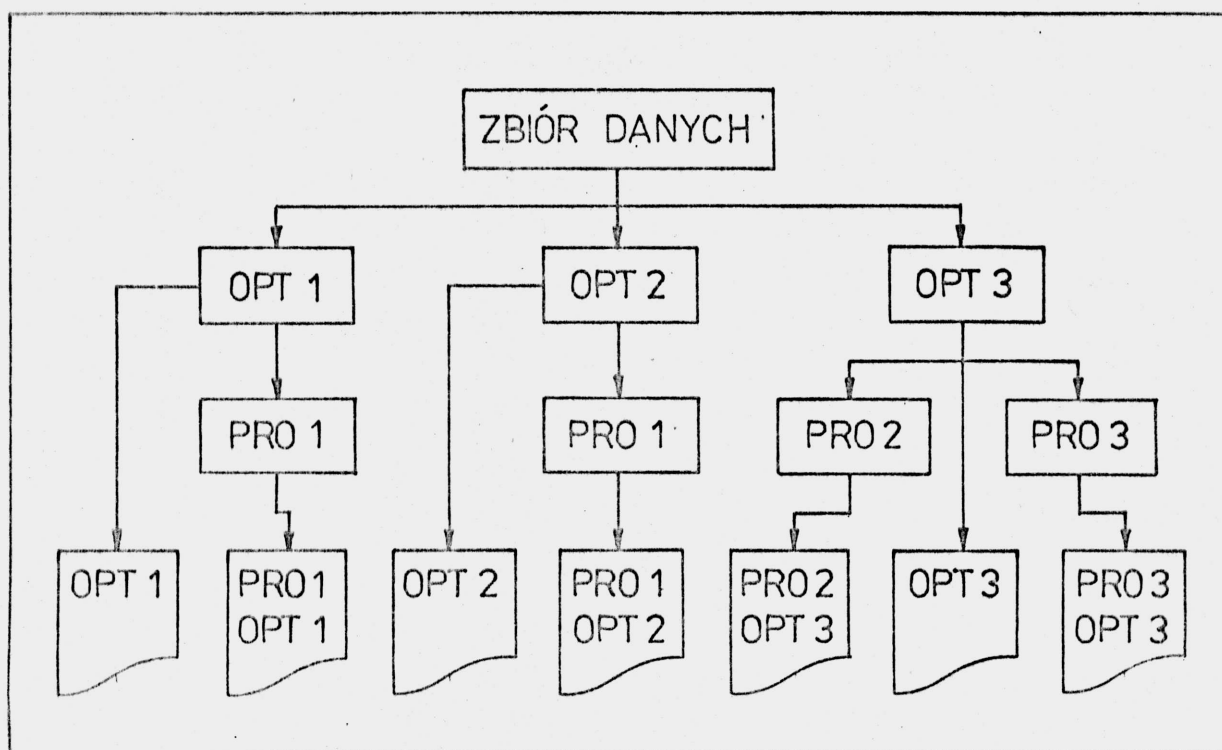
Dane wejściowe powinny zawierać:

- liczbę serii danych,
- liczbę wierszy i kolumn macierzy,
- macierze czasów wykonania robót.

Wykorzystywany w rozprawie program ADEL, uruchamiany w systemie RIAD, wymaga przygotowania następujących danych:

- macierzy czasów wykonania robót,
- podania terminu dyrektywnego realizacji zadania inwestycyjnego,
- składu ilościowego brygad roboczych,
- wag kryteriów elementarnych.

Systemy OPTY oraz program ADEL znajdują się w bibliotece programów Zakładu Metod Projektowania i Realizacji Budowli Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.



Rys. 17 Schemat blokowy systemu OPTY.

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 (T1) - macierz kolumnowa utworzona z elementów kolumny J dla T1,
T1 - macierz Nr 1,
T2 - macierz Nr 2,
J+1 (T2) - macierz kolumnowa utworzona z elementów kolumny J+1 dla T2,
T (R) - macierz robocza,
MW - macierz wskaźników,
U (I) - wartość pomocnicza,
MAXU - maksymalna wartość pomocnicza,
T2 (T1) - wektor zanikania macierzy T1,
TR (T2) - wektor rozwinięcia macierzy T2,
TRJ (T2) - okres rozwinięcia częściowego procesu J macierzy T2,
MW - macierz wejściowa,
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 wykonania robót w potoku.

Schematy blokowe programów przedstawiono na rys. 18, 19, 20, 21.

Program źródłowy systemu OPTY

DOCUMENT OPTY12

```
0 LO OPT3B
1 AS #CRO,%A
2 AS # TPO,TP3%A
3 AS # LPO,OPT3%A
4 TI 60MINS
5 EN
6 LF OPT3%A1,#LP
7 IFFAILED TIME UP , GO 1E
8 LO PRO2B
9 AS #TRO,TP3%A
10 AS #LPO,PRO2%A
11 EN
```

```

12 LF PK02%A,MLP
13 LO PRO3B
14 AS MTR0,TP3%A
15 AS MLPO,PRO3%A
16 EN
17 LF PRO3%A1,MLP
18 ER TP3%A
19 LO OPT1B
20 AS MCRO,%A
21 AS MTP0,TP3%A
22 AS MLPO,OPT1%A
23 TI 60 MINS
24 EN
25 LF OPT1%A,MLP
26 IF FAILED TIME UP , GO 4E
27 LO PRO1B
28 AS MTR0,TP3%A
29 AS MLPO,PRO1%A
30 EN
31 LF PRO1%A,MLP
32 4E
33 ER TP3%A
34 LO OPT2B
35 AS MCRO,%A
36 AS MTP0,TP3%A
37 AS MLPO,OPT2%A
38 TI 60 MINS
39 EN
40 LF OPT2%A,MLP
41 IF FAILED TIME UP , GO 5E
42 LO PRO1B
43 AS MTR0,TP3%A
44 AS MLPO,PRO12%A
45 EN
46 LF PRO12%A,MLP
47 5E
48 1E ER TP3%ER OPT3%A1,PRO2%A, PRO3%A, OPT1%A, PRO1%A, OPT2%A,
    PRO12%A
49 ER %A
50 EJ

```

Tabela 18

Wydruki do rozdziału 6

WYNIKI SERII Nr 1M

D A N E W E J Ś C I O W E

2,0	7,0	5,0	54,0
5,0	20,0	15,0	141,0
5,0	20,0	15,0	141,0
2,0	7,0	5,0	54,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI

INDEKSY	ROZP.-ZAK.,		SPRZĘŻENIE
1-1	0,0-	2,0	0,0
2-1	2,0-	7,0	0,0
3-1	7,0-	12,0	0,0
4-1	12,0-	14,0	0,0
1-2	2,0-	9,0	0,0
2-2	9,0-	29,0	2,0
3-2	29,0-	49,0	17,0
4-2	49,0-	56,0	35,0
1-3	29,0-	34,0	20,0
2-3	34,0-	49,0	5,0
3-3	49,0-	64,0	0,0
4-3	64,0-	69,0	8,0
1-4	34,0-	88,0	0,0
2-4	88,0-	229,0	39,0
3-4	229,0-	370,0	165,0
4-4	370,0-	424,0	301,0

WYNIKI SERII Nr 2x

D A N E W E J Ś C I O W E

34,0	37,0	35,0	38,0
12,0	13,0	15,0	13,0
12,0	13,0	15,0	13,0
34,0	37,0	35,0	38,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI I FRONTAMI

INDEKSY	WCZESNE TERMINY		SPRZ. M ŚRODK. SPRZ. M FRONT.	
1- 1	0,0-	34,0		
1- 2	34,0-	71,0		
1- 3	71,0-	106,0		
1- 4	106,0-	144,0		
2- 1	34,0-	46,0	0,0	0,0
2- 2	71,0-	84,0	0,0	25,0
2- 3	106,0-	121,0	0,0	22,0
2- 4	144,0-	157,0	0,0	23,0
3- 1	46,0-	58,0	0,0	0,0
3- 2	84,0-	97,0	0,0	26,0
3- 3	121,0-	136,0	0,0	24,0
3- 4	157,0-	170,0	0,0	21,0
4- 1	58,0-	92,0	0,0	0,0
4- 2	97,0-	134,0	0,0	5,0
4- 3	136,0-	171,0	0,0	2,0
4- 4	171,0-	209,0	1,0	0,0

INDEKSY	POZNE TERMINY		SPRZ. M SRODK.	SPRZ. M FRONT.	OG.	PRZE RWA
4- 4	171,0-	209,0				0,0
4- 3	136,0-	171,0				0,0
4- 2	99,0-	136,0				2,0
4- 1	65,0-	99,0				7,0
4- 4	158,0-	171,0	0,0	0,0		1,0
3- 3	121,0-	136,0	0,0	22,0		0,0
3- 2	86,0-	99,0	0,0	22,0		2,0
3- 1	53,0-	65,0	0,0	21,0		7,0
2- 4	145,0-	158,0	0,0	0,0		1,0
2- 3	106,0-	121,0	0,0	24,0		0,0
2- 2	73,0-	86,0	0,0	20,0		2,0
2- 1	41,0-	53,0	0,0	20,0		7,0
1- 4	107,0-	145,0	0,0	0,0		1,0
1-3	71,0-	106,0	0,0	1,0		0,0
1- 2	34,0-	71,0	2,0	0,0		0,0
1- 1	0,0-	34,0	7,0	0,0		0,0

KONIEC OBLICZEŃ

Tabela 19

Wydruki do rozdziału 7

WYNIKI SERII Nr 5

MACIERZ WEJŚCIOWA

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	35	38

CZAS WYKONANIA KOMPLEKSU ROBÓT DLA MACIERZY WEJŚCIOWEJ T = 575

OSIĄGNIĘTO GRANICZNE MOŻLIWE MINIMUM GMIN = 551

2	7	5	54	12	13	15	13
5	20	15	141	34	37	35	38
5	20	15	141	34	37	35	38
2	7	5	54	12	13	15	13

MINIMALNY CZAS WYKONANIA KOMPLEKSU ROBÓT TMIN = 553

WSKAŹNIK PRZEKROCZENIA LIMITU KOLUMN WSP R = 0

ILOŚĆ POWROTÓW 3

WIERSZE USTALONE INNYCH MACIERZY O GMM=GMIN

KONIEC OBLICZEŃ

WYNIKI SERII NR 1

MACIERZ WEJŚCIOWA

4	17	9	127	29	34	38	33
4	14	12	92	22	25	23	25
4	17	12	121	29	34	36	27
5	20	15	141	34	37	35	38

CZAS WYKONANIA KOMPLEKSU ROBÓT DLA MACIERZY WEJŚCIOWEJ T = 682

OSIĄGNIĘTO GRANICZNE MOŻLIWE MINIMUM GMIN = 660

4	17	9	127	29	34	38	33
5	20	15	141	34	37	35	38
4	17	12	121	29	34	36	27
4	14	12	92	22	25	23	25

MINIMALNY CZAS WYKONANIA KOMPLEKSU ROBÓT TMIN = 660

WSKAŹNIK PRZEKROCZENIA LIMITU KOLUMN WSP R = 0

WYNIKI SERII NR 1

DANE WEJŚCIOWE

4,0	17,0	9,0	127,0	29,0	34,0	38,0	33,0
5,0	20,0	15,0	141,0	34,0	37,0	35,0	38,0
4,0	17,0	12,0	121,0	29,0	34,0	36,0	27,0
4,0	14,0	12,0	92,0	22,0	25,0	23,0	25,0

WYNIKI

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI

INDEKSY	ROZP. - ZAK. .		SPRZĘŻENIE
1- 1	0,0-	4,0	0,0
2- 1	4,0-	9,0	0,0
3- 1	9,0-	13,0	0,0
4- 1	13,0-	17,0	0,0
1- 2	4,0-	21,0	0,0
2- 2	21,0-	41,0	12,0
3- 2	41,0-	58,0	28,0
4- 2	58,0-	72,0	41,0
1- 3	36,0-	43,0	15,0
2- 3	45,0-	60,0	4,0
3- 3	60,0-	72,0	2,0
4- 3	72,0-	84,0	0,0
1- 4	45,0-	172,0	0,0
2- 4	172,0-	313,0	112,0
3- 4	313,0-	434,0	241,0
4- 4	434,0-	526,0	350,0

1- 5	434,0-	463,0	262,0
2- 5	463,0-	497,0	150,0
3- 5	497,0-	526,0	63,0
4- 5	526,0-	548,0	0,0
1- 6	463,0-	497,0	0,0
2- 6	497,0-	534,0	0,0
3- 6	534,0-	568,0	8,0
4- 6	568,0-	593,0	20,0
1- 7	497,0-	535,0	0,0
2- 7	535,0-	570,0	1,0
3- 7	570,0-	606,0	2,0
4- 7	606,0-	629,0	13,0
1- 8	537,0-	570,0	2,0
2- 8	570,0-	608,0	0,0
3- 8	608,0-	635,0	2,0
4- 8	635,0-	660,0	6,0

WYNIKI SERII NR 5x

D A N E W E J Ś C I O W E

2,	7,0	5,0	54,0	12,0	13,0	15,0	13,0
5,0	20,0	15,0	141,0	34,0	37,0	35,0	38,0
5,0	20,0	15,0	141,0	34,0	37,0	35,0	38,0
2,0	7,0	5,0	54,0	12,0	13,0	15,0	13,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI

INDEKSY	ROZP.-ZAK.,	SPRĘŻENIE
1- 1	0,0-	2,0
2- 1	2,0-	7,0
3- 1	7,0-	12,0
4- 1	12,0-	14,0
1- 2	2,0-	9,0
2- 2	9,0-	29,0
3- 2	29,0-	49,0
4- 2	49,0-	56,0
1- 3	29,0-	34,0
2- 3	34,0-	49,0
3- 3	49,0-	64,0
4- 3	64,0-	69,0
1- 4	34,0-	88,C
2- 4	88,0-	229,0
3- 4	229,0-	370,0
4- 4	370,0-	424,0
1- 5	344,0-	356,0
2- 5	356,0-	390,0
3- 5	390,0-	424,0
4- 5	424,0-	436,0
1- 6	377,0-	390,0
2- 6	390,0-	427,0
3- 6	427,0-	464,0

4- 6	464,0-	477,0	28,0
1- 7	414,0-	429,0	24,0
2- 7	429,0-	464,0	2,0
3- 7	464,0-	499,0	0,0
4- 7	499,0-	514,0	22,0
1- 8	451,0-	464,0	22,0
2- 8	464,0-	502,0	0,0
3- 8	502,0-	540,0	3,0
4- 8	540,0-	553,0	26,0

Tabela 20

Wydruki do rozdziału 8

D A N E W E J Ś C I O W E

0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	30,0	19,0	7,0
0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	28,0	14,0	7,0
11,0	58,0	9,1	58,0	46,0	40,0	20,0	10,0
0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	30,0	19,0	7,0
17,0	85,0	9,0	45,0	30,0	25,0	15,0	7,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI

INDEKSY	ROZP.-ZAK.,	SPRZĘŻENIE
1- 1	0,0-	0,0
2- 1	0,0-	0,0
3- 1	0,0-	0,0
4- 1	11,0-	0,0
5- 1	11,0-	0,0
1- 2	11,0-	11,0
2- 2	11,0-	11,0
3- 2	11,0-	0,0
4- 2	69,0-	58,0
5- 2	69,0-	41,0
1- 3	145,0-	134,0
2- 3	145,0-	134,0
3- 3	145,0-	76,0
4- 3	144,0-	85,0
5- 3	154,0-	0,0
1- 4	154,0-	9,0
2- 4	154,0-	9,0
3- 4	154,0-	0,0
4- 4	212,0-	58,0
5- 4	212,0-	49,0
1- 5	154,0-	0,0
2- 5	191,0-	37,0
3- 5	222,0-	10,0
4- 5	268,0-	56,0
5- 5	305,0-	48,0

1- 6	210,0-	240,0		19,0			
2- 6	240,0-	268,0		18,0			
3- 6	268,0-	308,0		0,0			
4- 6	308,0-	338,0		3,0			
5- 6	338,0-	363,0		3,0			
1- 7	291,0-	310,0		51,0			
2- 7	310,0-	324,0		42,0			
3- 7	324,0-	344,0		16,0			
4- 7	344,0-	363,0		6,0			
5 -7	363,0-	378,0		0,0			
1- 8	347,0-	354,0		37,0			
2- 8	354,0-	361,0		30,0			
3- 8	361,0-	371,0		17,0			
4- 8	871,0-	378,0		8,0			
5- 8	378,0-	385,0		0,0			
DANE	WEJŚCIOWE						
0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	35,0	24,0	7,0
0,0	0,0	0,0	0,0	46,0	45,0	15,0	9,0
11,0	58,0	9,0	57,0	46,0	45,0	15,0	9,0
13,0	62,0	9,0	54,0	29,0	20,0	19,0	7,0
0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	20,0	19,0	7,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI

INDEKSY	ROZP.-ZAK.,	SPRZĘŻENIE
1- 1	0,0-	0,0
2- 1	0,0-	0,0
3- 1	0,0-	11,0
4- 1	11,0-	24,0
5- 1	24,0-	24,0
1- 2	11,0-	11,0
2- 2	11,0-	11,0
3- 2	11,0-	69,0
4- 2	69,0-	131,0
5- 2	131,0-	131,0
1- 3	122,0-	122,0
2- 3	122,0-	122,0
3- 3	122,0-	131,0
4- 3	131,0-	140,0
5- 3	140,0-	140,0
1- 4	131,0-	131,0
2- 4	131,0-	131,0
3- 4	131,0-	188,0
4- 4	188,0-	242,0
5- 4	242,0-	242,0
1- 5	131,0-	176,0
2- 5	176,0-	222,0
3- 5	222,0-	268,0
4- 5	268,0-	297,0
5- 5	297,0-	326,0

1- 6	188,0-	223,0	12,0
2- 6	223,0-	268,0	1,0
3- 6	268,0-	313,0	0,0
4- 6	313,0-	333,0	16,0
5- 6	333,0-	353,0	7,0
1- 7	280,0-	304,0	57,0
2- 7	304,0-	319,0	36,0
3- 7	319,0-	334,0	6,0
4- 7	334,0-	353,0	1,0
5- 7	353,0-	372,0	0,0
1- 8	340,0-	347,0	36,0
2- 8	347,0-	356,0	28,0
3- 8	356,0-	365,0	22,0
4- 8	365,0-	372,0	12,0
5- 8	372,0-	379,0	0,0

WYNIKI SERII NR 14

DANE WEJŚCIOWE

4,0	21,0	9,0	42,0	31,0	24,0	107,0	6,0
0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	31,0	28,0	7,0
4,0	22,0	9,0	43,0	32,0	24,0	18,0	7,0
13,0	63,0	9,0	54,0	29,0	25,0	15,0	7,0
0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	23,0	16,0	7,0

WYNIKI

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEN MIEDZY ŚRODKAMI I FRONTAMI

INDEKSY	WCZESNE	TERMINY	SPRZ. M ŚRODK.	SPRZ. M FRONT.
1- 1	0,0-	4,0		
1- 2	4,0-	25,0		
1- 3	25,0-	34,0		
1- 4	34,0-	76,0		
1- 5	76,0-	107,0		
1- 6	107,0-	131,0		
1- 7	131,0-	238,0		
1- 8	238,0-	244,0		
2- 1	4,0-	4,0	0,0	0,0
2- 2	25,0-	25,0	0,0	21,0
2- 3	34,0-	34,0	0,0	9,0
2- 4	76,0-	76,0	0,0	42,0
2- 5	107,0-	152,0	0,0	31,0
2- 6	152,0-	183,0	21,0	0,0
2- 7	238,0-	266,0	0,0	55,0
2- 8	266,0-	273,0	22,0	0,0
3- 1	4,0-	8,0	0,0	0,0
3- 2	25,0-	47,0	0,0	17,0
3- 3	47,0-	56,0	13,0	0,0
3- 4	76,0-	119,0	0,0	20,0
3- 5	152,0-	184,0	0,0	33,0

3- 6	184,0-	208,0	1,0	0,0
3- 7	266,0-	284,0	0,0	58,0
3- 8	284,0-	291,0	11,0	0,0
4- 1	8,0-	21,0	0,0	0,0
4- 2	47,0-	110,0	0,0	26,0
4- 3	110,0-	119,0	54,0	0,0
4- 4	119,0-	173,0	0,0	0,0
4- 5	184,0-	213,0	0,0	11,0
4- 6	213,0	238,0	5,0	0,0
4- 7	284,0-	299,0	0,0	46,0
4- 8	299,0-	306,0	8,0	0,0
5- 1	21,0	21,0	0,0	0,0
5- 2	110,0-	110,0	0,0	89,0
5- 3	119,0-	119,0	0,0	9,0
5- 4	173,0-	173,0	0,0	54,0
5- 5	213,0-	242,0	0,0	40,0
5- 6	242,0-	265,0	4,0	0,0
5- 7	299,0-	315,0	0,0	34,0
5- 8	315,0-	322,0	9,0	0,0

INDEKSY	POŽNE TERMINY		SPRZ. M ŠRODK.	SPRZ. M FRONT.	OG. REZER
5- 8	315,0-	322,0	0,0	0,0	0,0
5- 7	299,0-	315,0	7,0	0,0	0,0
5- 6	276,0-	299,0	23,0	0,0	34,0
5- 5	247,0-	276,0	46,0	0,0	34,0
5- 4	247,0-	247,0	75,0	0,0	74,0
5- 3	247,0-	247,0	75,0	0,0	128,0
5- 2	247,0-	247,0	75,0	0,0	137,0
5- 1	247,0-	247,0	75,0	0,0	226,0
4- 8	308,0-	315,0	0,0	0,0	9,0
4- 7	284,0-	299,0	0,0	9,0	0,0
4- 6	251,0-	276,0	0,0	8,0	38,0
4- 5	218,0-	247,0	0,0	4,0	34,0
4- 4	164,0-	218,0	29,0	0,0	45,0
4- 3	155,0-	164,0	83,0	0,0	45,0
4- 2	92,0	155,0	92,0	0,0	45,0
4- 1	79,0	92,0	155,0	0,0	71,0
3- 8	310,0-	308,0	0,0	0,0	17,0
3- 7	266,0-	284,0	0,0	17,0	0,0
3- 6	227,0-	251,0	0,0	15,0	43,0
3- 5	186,0-	218,0	0,0	9,0	34,0
3- 4	121,0-	164,0	0,0	22,0	45,0
3- 3	112,0-	121,0	34,0	0,0	65,0
3- 2	70,0-	92,0	0,0	20,0	45,0
3- 1	66,0-	70,0	9,0	0,0	62,0
2- 8	294,0-	301,0	0,0	0,0	28,0
2- 7	238,0-	266,0	0,0	28,0	0,0
2- 6	196,0-	227,0	0,0	11,0	44,0
2- 5	141,0-	186,0	0,0	10,0	34,0
2- 4	121,0-	121,0	0,0	20,0	45,0
2- 3	112,0-	112,0	0,0	9,0	78,0
2- 2	70,0-	70,0	0,0	42,0	45,0
2- 1	66,0-	66,0	0,0	4,0	62,0

1- 8	288,0-	294,0	0,0	0,0	50,0
1- 7	131,0-	239,0	0,0	50,0	0,0
1- 6	107,0-	131,0	65,0	0,0	0,0
1- 5	76,0-	107,0	34,0	0,0	0,0
1- 4	34,0-	76,0	45,0	0,0	0,0
1- 3	25,0-	34,0	78,0	0,0	0,0
1- 2	4,0-	25,0	45,0	0,0	0,0
1- 1	0,0-	4,0	62,0	0,0	0,0

KONIEC OBLICZEŃ

D A N E W E J Ś C I O W E

0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	33,0	26,0	8,0
0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	33,0	26,0	8,0
0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	33,0	26,0	8,0
25,0	45,0	9,0	56,0	32,0	30,0	12,0	8,0
0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	29,0	11,0	8,0

W Y N I K I

POTOK Z UWZGLĘDNIENIEM SPRZĘŻEŃ MIĘDZY ŚRODKAMI I FRONTAMI

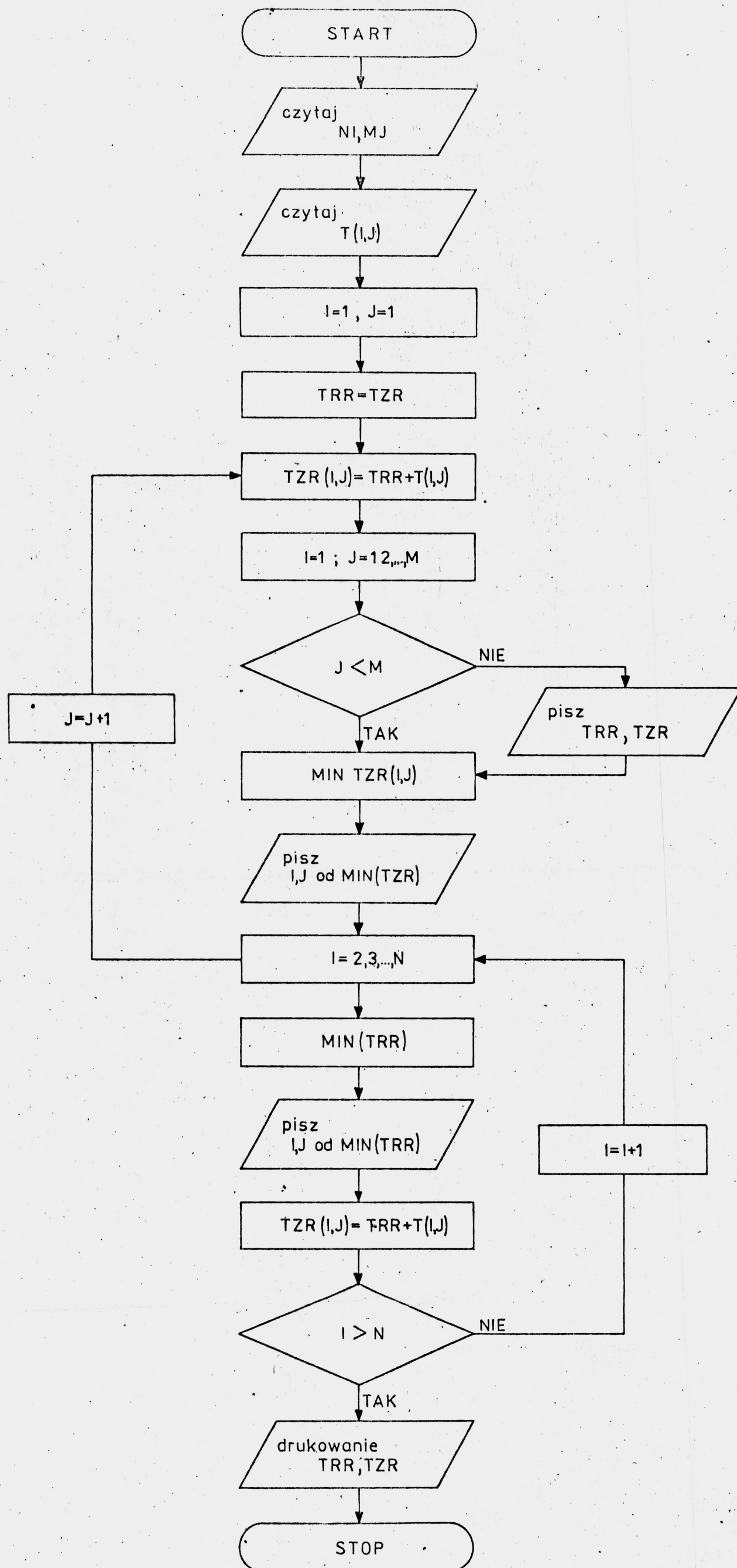
INDEKSY WCZESNE TERMINY SPRZ. M ŚRODK. SPRZ. M FRONT.

1- 1	0,0-	0,0		
1- 2	0,0-	0,0		
1- 3	0,0-	0,0		
1- 4	0,0-	0,0		
1- 5	0,0-	45,0		
1- 6	45,0-	78,0		
1- 7	78,0-	104,0		
1- 8	104,0-	112,0		
2- 1	0,0-	0,0	0,0	0,0
2- 2	0,0-	0,0	0,0	0,0
2- 3	0,0-	0,0	0,0	0,0
2- 4	0,0-	0,0	0,0	0,0
2- 5	45,0-	90,0	0,0	45,0
2- 6	90,0-	123,0	12,0	0,0
2- 7	123,0-	149,0	19,0	0,0
2- 8	149,0-	157,0	37,0	0,0
3- 1	0,0-	0,0	0,0	0,0
3- 2	0,0-	0,0	0,0	0,0
3- 3	0,0-	0,0	0,0	0,0
3- 4	0,0-	0,0	0,0	0,0
3- 5	90,0-	135,0	0,0	90,0
3- 6	135,0-	168,0	12,0	0,0
3- 7	168,0-	194,0	19,0	0,0
3- 8	194,0-	202,0	37,0	0,0
4- 1	0,0-	25,0	0,0	0,0
4- 2	25,0-	70,0	25,0	0,0
4- 3	70,0	79,0	70,0	0,0
4- 4	79,0-	135,0	79,0	0,0
4- 5	135,0-	167,0	0,0	0,0
4- 6	168,0-	198,0	0,0	1,0
4- 7	198,0-	210,0	4,0	0,0
4- 8	210,0-	218,0	8,0	0,0

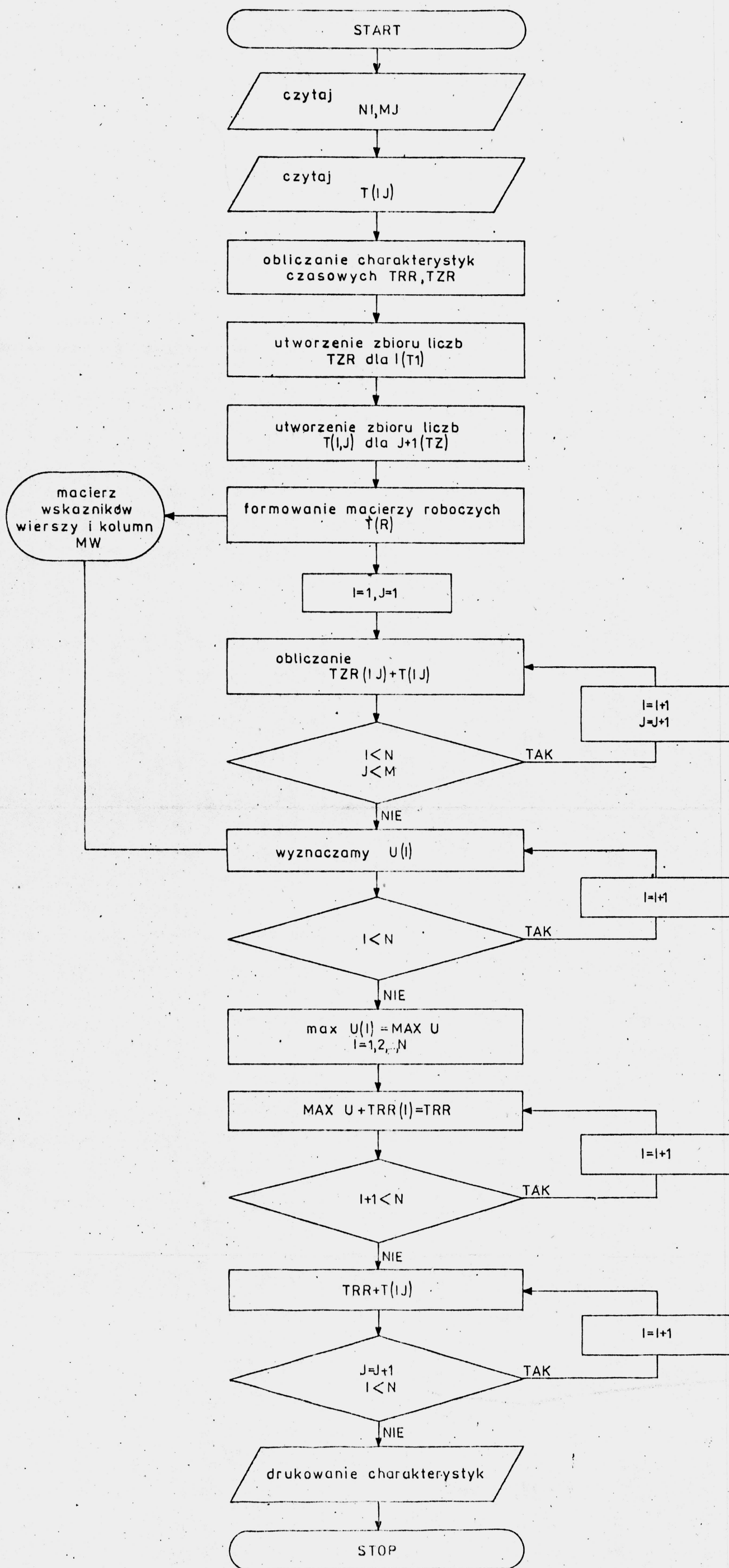
5- 1	25,0-	25,0	0,0	0,0
5- 2	70,0-	70,0	0,0	45,0
5- 3	79,0-	79,0	0,0	9,0
5- 4	135,0-	135,0	0,0	56,0
5- 5	167,0-	197,0	0,0	32,0
5- 6	198,0-	227,0	0,0	1,0
5- 7	227,0-	238,0	17,0	0,0
5- 8	238,0-	246,0	20,0	0,0

INDEKSY POZNE TERMINY SPRZ. M SRODK. SPRZ. M FRONT. OG. REZER.

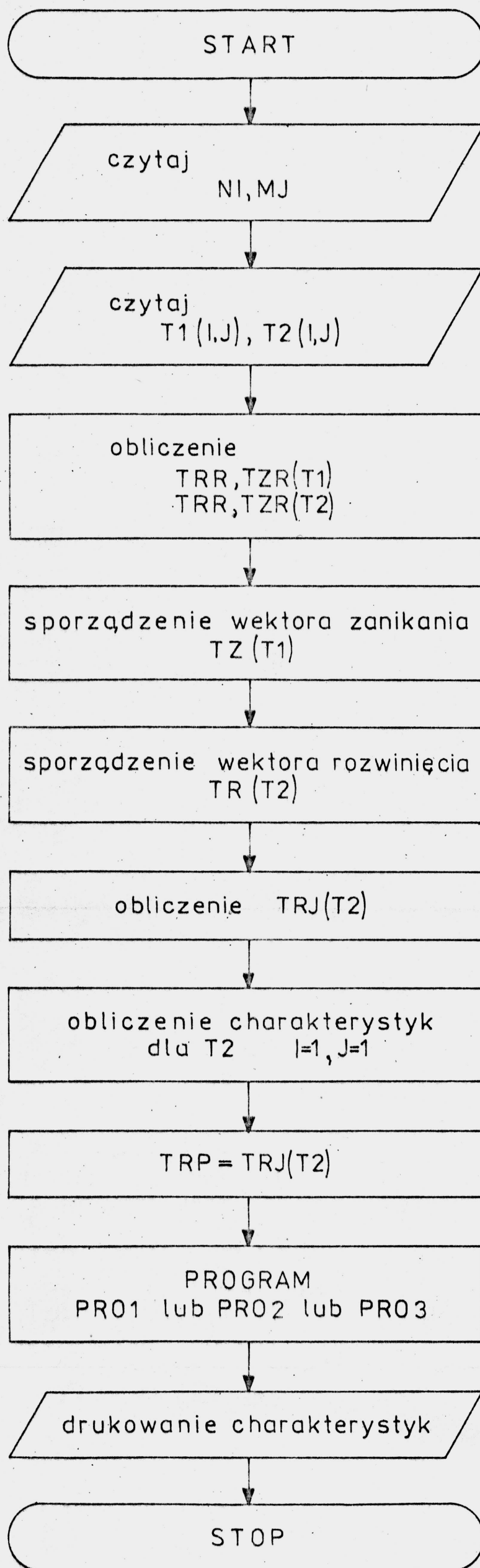
5- 8	238,0-	246,0	0,0	0,0	0,0
5- 7	227,0-	238,0	8,0	0,0	0,0
5- 6	198,0-	227,0	10,0	0,0	0,0
5- 5	168,0-	198,0	48,0	0,0	1,0
5- 4	168,0-	168,0	78,0	0,0	33,0
5- 3	168,0-	168,0	78,0	0,0	89,0
5- 2	168,0-	168,0	78,0	0,0	98,0
5- 1	168,0-	168,0	78,0	0,0	143,0
4- 8	230,0-	238,0	0,0	0,0	20,0
4- 7	215,0-	227,0	0,0	3,0	17,0
4- 6	168,0-	198,0	0,0	17,0	0,0
4- 5	136,0-	168,0	0,0	0,0	1,0
4- 4	80,0-	136,0	32,0	0,0	1,0
4- 3	71,0-	80,0	88,0	0,0	1,0
4- 2	26,0-	71,0	97,0	0,0	1,0
4- 1	1,0-	26,0	142,0	0,0	1,0
3- 8	222,0-	230,0	0,0	0,0	28,0
3- 7	189,0-	215,0	0,0	7,0	21,0
3- 6	135,0-	168,0	0,0	21,0	0,0
3- 5	90,0-	135,0	1,0	0,0	0,0
3- 4	80,0-	80,0	0,0	10,0	80,0
3- 3	71,0-	71,0	0,0	9,0	71,0
3- 2	26,0-	26,0	0,0	45,0	26,0
3- 1	1,0-	1,0	0,0	25,0	1,0
2- 8	214,0-	222,0	0,0	0,0	65,0
2- 7	163,0-	189,0	0,0	25,0	40,0
2- 6	102,0-	135,0	0,0	28,0	12,0
2- 5	45,0-	90,0	0,0	12,0	0,0
2- 4	45,0-	45,0	35,0	0,0	45,0
2- 3	45,0-	45,0	26,0	0,0	45,0
2- 2	26,0-	26,0	0,0	19,0	26,0
2- 1	1,0-	1,0	0,0	25,0	1,0
1- 8	206,0-	214,0	0,0	0,0	102,0
1- 7	137,0-	163,0	0,0	43,0	59,0
1- 6	69,0-	102,0	0,0	35,0	24,0
1- 5	0,0-	45,0	0,0	24,0	0,0
1- 4	0,0-	0,0	45,0	0,0	0,0
1- 3	0,0-	0,0	45,0	0,0	0,0
1- 2	0,0-	0,0	26,0	0,0	0,0
1- 1	0,0-	0,0	1,0	0,0	0,0



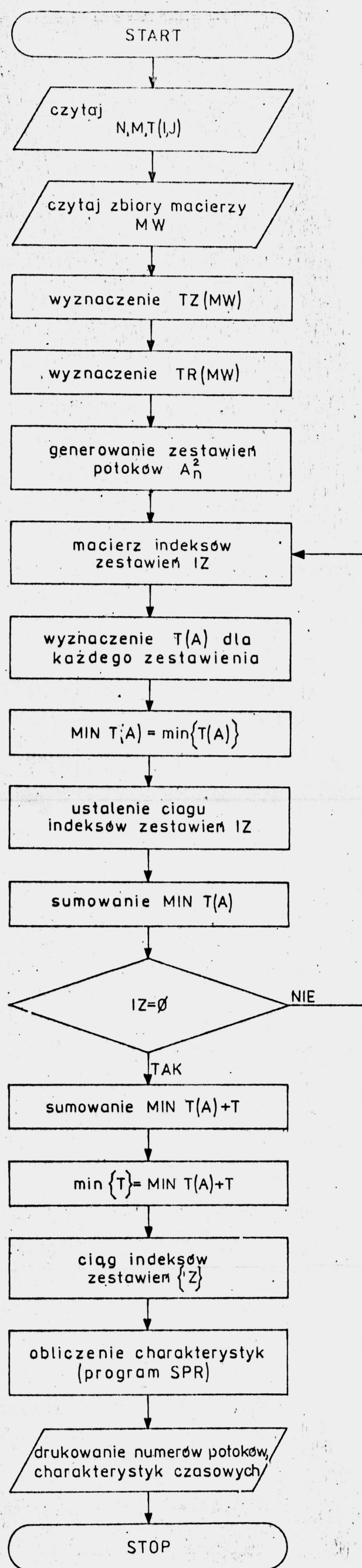
RYS. 18 SCHEMAT BLOKOWY DO PROGRAMU PLANOWANIA PRACY WIELU BRYGAD JEDNEJ SPECJALNOŚCI.



RYS. 19 SCHEMAT BLOKOWY DO PROGRAMU SYNCHRONIZACJI POTOKÓW O STRUKTURZE SZEREGOWEJ (SPS).



RYS. 20 SCHEMAT BLOKOWY PROGRAMU SYNCHRONIZACJI POTOKÓW
O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ (SPR).



RYS. 21 SCHEMAT BLOKOWY PROGRAMU USTALANIA KOLEJNOŚCI W ZBIORZE POTOKÓW (KZP).