

dr hab inż Magdalena Rogalska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-8408-3242

prof. dr hab inż Zdzisław Hejducki<sup>2)\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-2958-0128

# Zastosowanie metody sprzężeń czasowych TCM 1 w harmonogramowaniu robót budowlanych

## *Application of the TCM 1 time coupling method in construction works scheduling*

DOI: 10.15199/33.2022.12.15

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono sposób wykonania harmonogramu w postaci wykresu Gantta z zastosowaniem szeregowania zadań metodą sprzężeń czasowych i ciągłości pracy TCM 1 brygad roboczych. Tradycyjną metodą wizualizacji harmonogramu w TCM są cyklogramy. W artykule przedstawiono wykorzystanie programu MS Project do wykonania wykresów Gantta z zastosowaniem szeregowania zadań metodą TCM 1 ze względu na możliwość wykorzystania tego programu w analizie ryzyka i kosztów cyklu życia budowli, gdzie konieczne jest zastosowanie wykresu Gantta do obliczeń.

**Słowa kluczowe:** harmonogramowanie; sprzężenia czasowe.

**Abstract.** The purpose of this work is to present the method of making a schedule in the form of a Gantt chart with the use of task scheduling using the time coupling method while maintaining the continuity of work of TCM 1 working teams. The traditional method of schedule visualization in TCM are cyclograms, in this work MS Project was used to prepare Gantt charts using the TCM 1 task scheduling method due to the need to use this program in the risk and cost analysis of the building life cycle, where it is necessary to use the Gantt chart to calculations.

**Keywords:** scheduling; time coupling.

Metoda sprzężeń czasowych (TCM) polega na takim szeregowaniu zadań roboczych, aby osiągnąć z góry założony cel, czyli uporządkować w harmonogramie występujące kolejno procesy. W zależności od założonego celu wyróżnia się trzy podstawowe metody TCM:

- TCM 1 – zachowanie ciągłości pracy brygad;
- TCM 2 – zachowanie ciągłości pracy na działkach roboczych;
- TCM 3 – minimalizacja czasu realizacji przedsięwzięcia budowlanego, ale bez konieczności zachowania ciągłości pracy brygad i ciągłości pracy na działkach roboczych.

Metoda sprzężeń czasowych charakteryzuje się możliwością zapisu algorytmicznego, a zatem możliwością stosowania przy dowolnych ograniczeniach i nowych założeniach, z kontynuacją tego zapisu i automatyzacją obliczeń.

W artykule przedstawiono uproszczony sposób opracowania harmonogramów robót budowlanych metodami TCM [1].

<sup>1)</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

<sup>2)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

\*) Adres do korespondencji:

zdzislaw.hejducki@pwr.edu.pl

Jest on kontynuacją tematyki harmonogramowania tych robót [2–10] zapoczątkowanej i rozwijanej przez zespoły prof. V.A. Afanasjewa, J. Mrozowicza i innych i prezentuje podejście probabilistyczne. Tradycyjną metodą wizualizacji harmonogramu w TCM są cyklogramy, a w artykule omówiono zastosowanie programu MS Project do wykonania wykresów Gantta. Takie założenie przyjęto ze względu na konieczność wykorzystania tego programu w analizie ryzyka, gdzie niezbędne jest zastosowanie wykresu Gantta do obliczeń w programie Risky Project Professional.

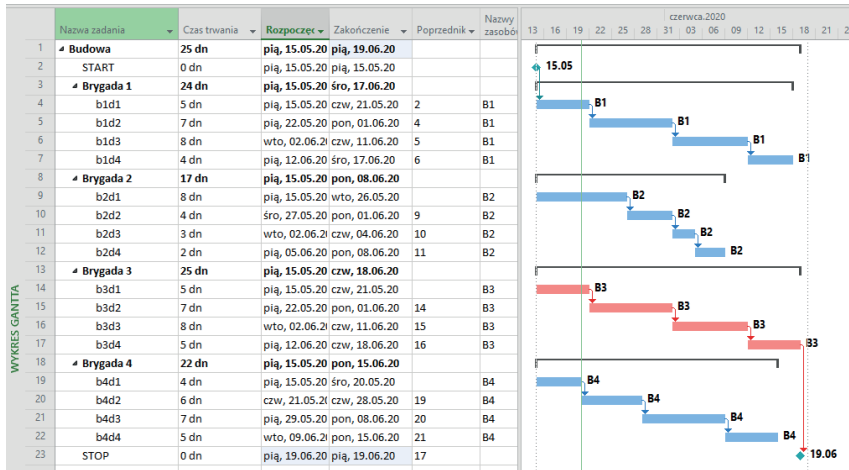
### Opis metody

Metoda TCM 1 bazuje na założeniu ciągłości pracy brygad, czyli każda brygada po wejściu na budowę ma pracować tak długo, aż skończy swoją pracę i nie może mieć zaplanowanych przerw w pracy. Wykonanie harmonogramu metodą TCM 1 rozpoczyna się od wprowadzenia danych, jak na rysunku 1. Wszystkie brygady rozpoczynają pracę jednocześnie. Brygada b1, podobnie jak pozostałe, pracuje bez przerw kolejno na działkach od d1 do d4.

Metoda TCM 1 stosowana jest w sytuacji, kiedy istnieją trudności w pozy-

skaniu brygad specjalistycznych, które nie są skłonne do przyjęcia innych warunków pracy lub koszt transportu brygad jest bardzo duży, a ich przestoje są płatne i przedsięwzięcie mogłoby okazać się nierentowne. Konieczność zachowania ciągłości pracy np. w przypadku betonowania komina przemysłowego w deskowaniu przesuwным wymaga również zastosowania szeregowania metodą TCM 1. Na fotografii pokazano plac budowy osiedla budynków wielorodzinnych przy ul. Jutrzenki w Lublinie, gdzie zastosowano metodę TCM 1.

Na podstawie obliczeń metodą TCM 1 określa się, w którym momencie mają wchodzić na budowę brygady b2, b3 i b4, aby zachować ciągłość pracy wszystkich zespołów. W tym celu należy wykonać obliczenia zaprezentowane w tabeli 1. Określa się minimalny odstęp czasowy pomiędzy potokami pracy brygad. Spośród obliczonych odstępów: b1b2, b2b3, b3b4 należy wybrać wartość maksymalną, którą przyjmuje się jako czas pomiędzy wejściem brygady poprzedzającej a następującej po niej. Na wykresie Gantta należy nanieść odstępy czasowe, przez zapis poprzednika zadania na pierwszej



Rys. 1. Wykres Gantta wg metody TCM 1 – krok pierwszy  
Fig. 1. Gantt's chart by TCM 1 method – step one

regowaniem zadań metodami TCM 1 i TCM 3 (rysunek 6). W przypadku metody TCM 1 wynosi on 65,92 dnia, a metody TCM 3 – 44,37 dnia. Z przeprowadzonej analizy wynika, że metoda TCM 1 powinna być stosowana jedynie w uzasadnionych technicznie i technologicznie warunkach realizacji. Należy spodziewać się znacznie dłuższego czasu realizacji przedsięwzięcia niż w przypadku szeregowania metodą TCM 3.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono uproszczony sposób tworzenia harmonogramów metodami TCM. Tradycyjną metodą wizualizacji harmonogramu



Budowa osiedla budynków wielorodzinnych w Lublinie  
Fot. M. Rogalska  
Multi-family housing estate under construction in Lublin  
Photo M. Rogalska

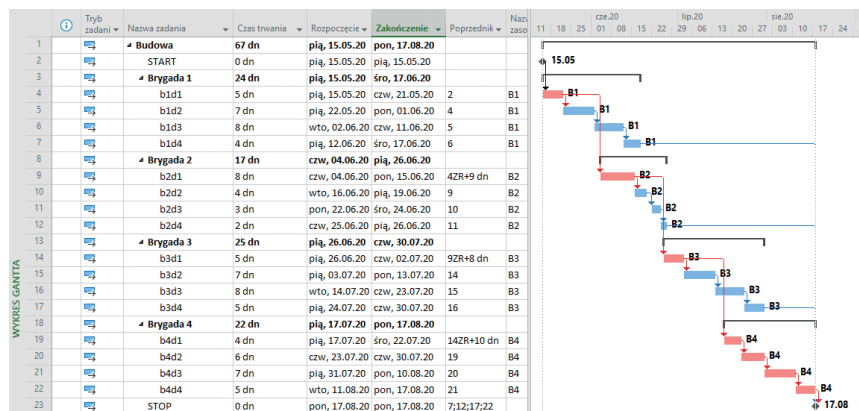
działce nowo wchodzącej brygady: poprzednik zadania b2d1 to 4ZR+9 dni, co oznacza, że po zwolnieniu działki d1 (zadanie 4) brygada b2 ma czekać jeszcze 9 dni (tabela 1), aż będzie mogła rozpocząć zadanie na działce d2. Na rysunku 2 przedstawiono wykres Gantta wykonany zgodnie z metodą TCM 1 i z oznaczoną ścieżką krytyczną, a na rysunku 3 sieć zależności odpowiadającą temu wykresowi.

## Analiza TCM 1 w ujęciu probabilistycznym

Bazując na harmonogramie deterministycznym (rysunek 2) obliczono czas realizacji poszczególnych procesów na działkach, przy założeniu 8, 10 i 16 h pracy na dobę. Przyjęto trójkątną funkcję gęstości prawdopodobieństwa i ryzyko

Tabela 1. Odstęp [dni] pomiędzy wejściem kolejnych brygad na plac budowy  
Table 1. Distance [day] between the entrances to the construction site of successive brigades

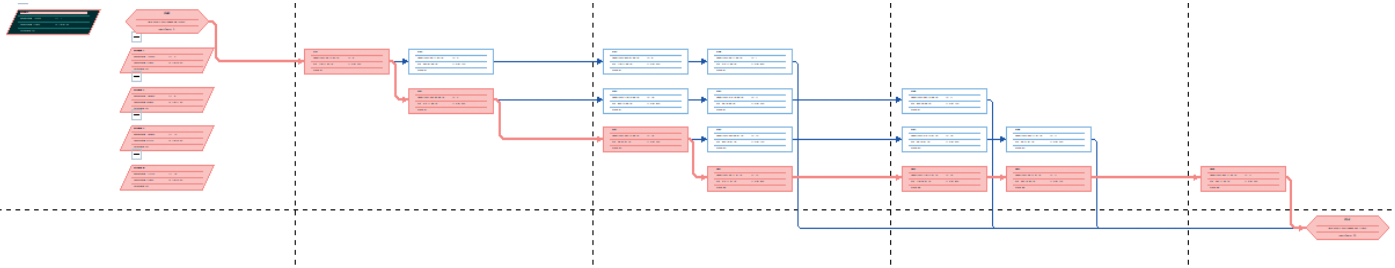
Działka robocza	Brygada b1	Odstęp b1b2	Brygada b2	Odstęp b2b3	Brygada b3	Odstęp b3b4	Brygada b4
d1	5	5	8	8	5	5	4
d2	7	5+7-8=4	4	8+4-5=7	7	5+7-4=8	6
d3	8	5+7+8-4-8=8	3	8+4+3-5-7=3	8	5+7+8-4-6=10	7
d4	4	5+7+8+4-3-4-8=9	2	8+4+3+2-8-7-5=5	5	5+7+8+5-4-6-7=8	5
		MAX = 9		MAX = 8		MAX = 10	



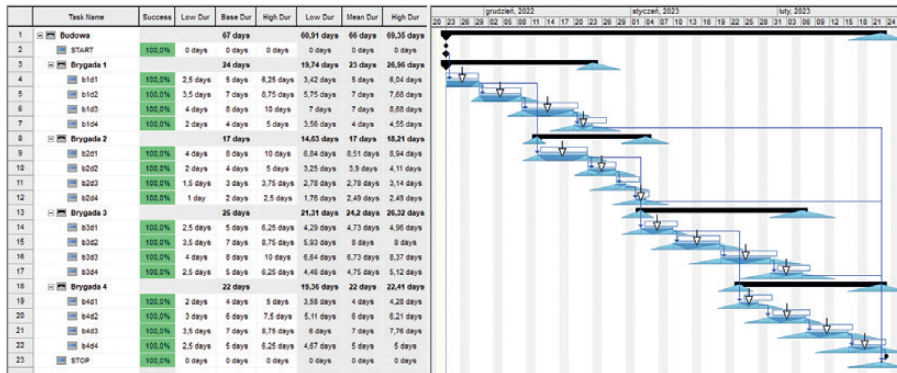
Rys. 2. Wykres Gantta wg metody TCM 1 z oznaczoną ścieżką krytyczną  
Fig. 2. Gantt's chart by TCM 1 method with marked critical path

o wartości 15% wynikające z wartości zysku. Obliczenia wykonano w programie Risky Project Professional. Otrzymano probabilistyczny wykres Gantta (rysunek 4). W celu porównania teoretycznej możliwości realizacji przedsięwzięcia budowlanego w najkrótszym czasie wykonano obliczenia metodą TCM 3 (rysunek 5). Obliczono najbardziej prawdopodobny czas ukończenia przedsięwzięcia budowlanego z sze-

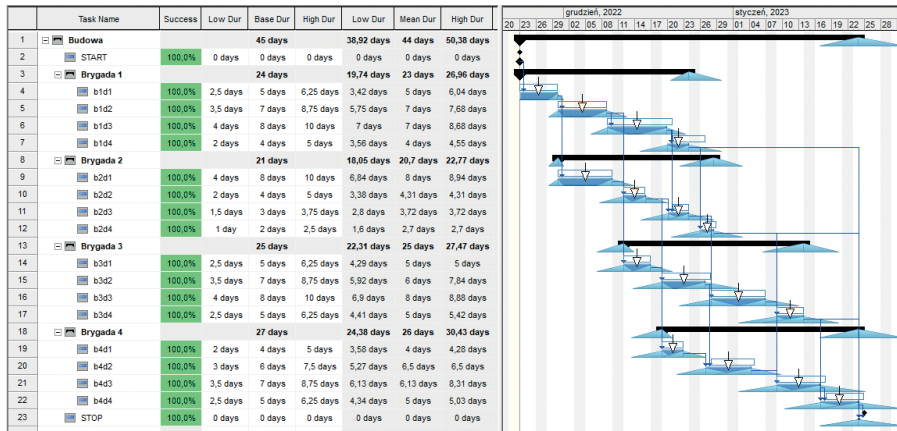
w TCM są cyklogramy, przedstawiające przebieg robót na działkach. Opracowano sposób obliczania terminów rozpoczęcia prac przez brygady, umożliwiającą zastosowanie programu MS Project do wykonania wykresów Gantta. Takie założenie przyjęto ze względu na możliwość wykorzystania w analizie ryzyka, np. programu Risky Project Professional, w przypadku którego konieczne jest zastosowanie wy-



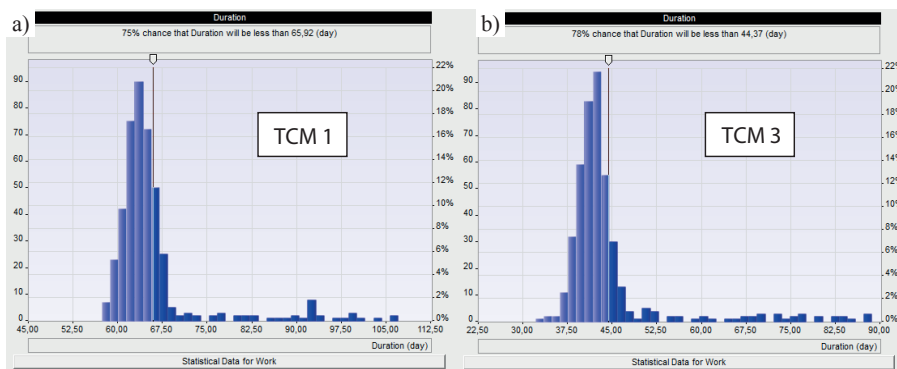
Rys. 3. Diagram sieciowy wg metody TCM 1 z oznaczoną ścieżką krytyczną  
Fig. 3. Network diagram by TCM 1 method with marked critical path



Rys. 4. Probabilistyczny wykres Gantta wg metody TCM 1  
Fig. 4. Probabilistic Gantt's chart by TCM 1 method



Rys. 5. Probabilistyczny wykres Gantta wg metody TCM 3  
Fig. 5. Probabilistic Gantt's chart by TCM 3 method



Rys. 6. Czas ukończenia przedsięwzięcia budowlanego wg metod: a) TCM 1; b) TCM 3  
Fig. 6. Time to complete a construction project by methods: a) TCM 1; b) TCM 3

kresu Gantta do obliczeń. Możliwe jest użycie innych metod obliczeniowych, np. teorii zbiorów rozmytych.

## Literatura

- [1] Hejducki Z, Rogalska M. Flow Shop scheduling of construction processes using time coupling methods/Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2021; 138. ISBN 978-83-7947-467-7.
- [2] Borne P. Evolutionary algorithms for job-shop scheduling Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2004, Vol. 14, No 1, 91-103.
- [3] Bożejko W, Wodecki M. A hybrid evolutionary algorithm for some discrete optimization problems, IEEE Computer Society P2286 ISBN 0-7695-2286-6, 2.
- [4] Leu SS, Yang CH, Huang JC Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application. Automation in Construction 2000; 10: 27-41.
- [5] Nassar K. Evolutionary optimization of resource allocation in repetitive construction schedules ITcon. 2005; 10:265.
- [6] Reewers CR, Yamada T. Genetic Algorithms Path Relinking on the Flowshop Sequencing Problem, Evolutionary Computation Journal MIT press. 1998; 6(1):230-234.
- [7] Afanasjev VA. Stream methods in construction work, Potocnaja organizacija robot v stroitelstwie, Sankt Petersburg. 2000.
- [8] Arditi D, Tokdemir OB, Suh K. Effect of learning on line-of-balance scheduling, International Journal of Project Management, 2001; 19(5): 265-277.
- [9] Grabowski J, Wodecki M. A very fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem with makespan criterion, Computers & Operations Research, 2004; 31: 1891-1909.
- [10] Gupta J, Stafford EF Jr. Flowshop scheduling research after five decades, European Journal of Operational Research 2006; 169: 699-711.

Przyjęto do druku: 28.10.2022 r.