

# Zastosowanie diagramów równoległobokowych w harmonogramowaniu procesów budowlanych

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Hejducki, mgr inż. Łukasz Łodożyński,  
Politechnika Wroclawska

## 1. Wprowadzenie

W planowaniu robót budowlanych wykorzystywane są m.in.: planowanie sieciowe (CPM/PERT), wykresy Gantta, wykresy cykliczne (LOB – Line of Balance), harmonogramowanie liniowe (LSM – Linear Scheduling Model, RSM – Repetitive Scheduling Method), metoda łańcucha krytycznego [4] i metody sprzężeń czasowych (Time Couplings Methods – TCM) [1, 8] oraz wiele innych metod. Celem artykułu jest przedstawienie nowego typu modelu graficznego – diagramu równoległobokowego. Zapewnia on odwzorowanie przebiegu procesów budowlanych, w których terminy rozpoczęcia i zakończenia należą do pewnego przedziału czasu oraz występują bufony czasowe [4]. Diagram równoległobokowy jest w zależności od dobranych parametrów zmodyfikowanym cyklogramem, figurą geometryczną. Podstawą modelowania figury równoległoboku jest możliwość wyznaczenia i odwzorowania czterech terminów brzegowych (najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów zarówno rozpoczęcia, jak i zakończenia) w układzie dwuosiowym.

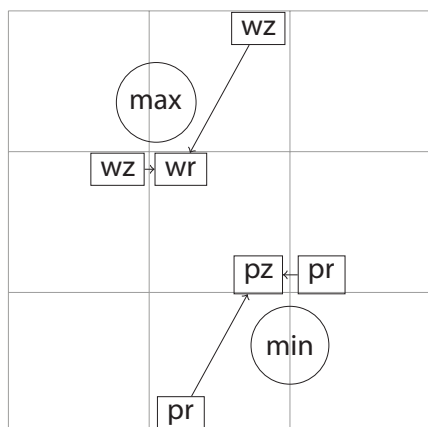
## 2. Podstawowy problem

W pracy zaproponowano alternatywne podejście do standardowej, graficznej prezentacji harmonogramów procesów budowlanych przy użyciu cyklogramów, wykresów Gantta i diagramów sieciowych. Dotychczasowe sposoby odwzorowania nie uwzględniały w postaci graficznej „rezerw czasu” (zapasów, buforów), w szczególności w modelach grafowych. Proponuje się zatem modyfikacje cyklogramów procesów budowlanych z modelu liniowego na powierzchniowy model geometryczny, uwzględniający dodatkowe niezbędne informacje. Można dokonać zamiany standardowego cyklogramu na ciąg figur – równoległoboków. Opracowano program komputerowy umożliwiający harmonogramowanie procesów budowlanych z zastosowaniem modelu graficznego – diagramów równoległobokowych. Szczególnie przydatne jest zastosowanie diagramów równoległobokowych do odwzorowania wyników obliczeń uzyskiwanych metodą TCM III [8]. Najczęściej odwzorowuje się je za pomocą grafu. Proponowana figura geometryczna – równoległobok pozwala w przyjętej skali odwzorować podstawowe parametry czasowe procesów budowlanych. Krawędzie i wysokości figury w zależności od potrzeb reprezentować mogą czasy trwania procesów lub rezerwy czasowe (bufory). Skala pionowa może być zmieniona w stosunku do skali poziomej tak, aby odwzorować żądane

wartości. Czas trwania operacji oznaczony jest przez  $t_{i,j}$ , a rezerw operacji to  $b_{i,j}$ . Ciąg równoległoboków umieszczony jest w zmodyfikowanym układzie współrzędnych.

## 3. Podstawowe założenia

Metoda sprzężeń czasowych (TCM III) [8] jest jedną z metod harmonogramowania robót budowlanych uwzględniającą jednoczesną zależność między dostępnymi frontami roboczymi i procesami budowlanymi. Jednoczesne uwzględnienie ograniczeń technologicznych i organizacyjnych umożliwia wyznaczenie minimalnego terminu realizacji robót. Zastosowanie sprzężeń między środkami realizacji i procesami pozwala wyznaczyć ciąg robót krytycznych, których sumaryczny czas wyznacza termin realizacji kompleksu robót. Roboty niekrytyczne mają bufony czasowe charakteryzowane przez najwcześniejsze i najpóźniejsze terminy. Obliczenia przeprowadza się za pomocą modelu macierzowego [8], w kolumnach znajdują się dane liczbowe dotyczące czasu wykonania procesów budowlanych, natomiast w wierszach oznacza się podział na fronty robocze. W pierwszej kolejności oblicza się najwcześniejsze terminy robót. W pierwszej kolumnie wprowadza się ograniczenia w postaci zerowych sprzężeń, co zapewnia ciągłość robót pierwszego rodzaju. W pierwszym wierszu uwzględnia się zerowe sprzężenia między frontami roboczymi, wymuszając tym ciągłość pracy na froncie. W pozostałych wierszach i kolumnach wczesne terminy wyznacza się wg schematu (rys. 1). Robota nie może rozpocząć się wcześniej niż zakończy się zarówno poprzednia robota na tym froncie (warunek technologiczny), jak i robota tego samego typu na froncie poprzedzającym (warunek organizacyjny). W drugim etapie należy wyznaczyć najpóźniejsze terminy robót. Tym razem w ostatniej kolumnie zakłada się ciągłość procesu budowlanego, a w ostatnim wierszu ciągłość pracy na froncie roboczym. W pozostałych wierszach i kolumnach najpóźniejsze terminy wyznacza się wg rysunku 1. Robota nie może zakończyć się później niż rozpocznie się zarówno następna robota na tym froncie (warunek technologiczny), jak i robota tego samego typu na froncie kolejnym (warunek organizacyjny). Po wyznaczeniu wszystkich czasów dostępne są m.in. takie charakterystyki jak rezerwy czasowe, technologiczne, organizacyjne oraz droga krytyczna. Proponuje się zastosowanie w procesie harmonogramowania procesów budowlanych powierzchniowy model geometryczny – diagram równoległobokowy. Schemat obliczeń, najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót, w postaci tabelarycznej przedstawiono na rysunku 1.



Oznaczenia: *wr* – najwcześniejszy termin rozpoczęcia roboty, *pr* – najpóźniejszy termin rozpoczęcia roboty, *wz* – najwcześniejszy termin zakończenia roboty, *pz* – najpóźniejszy termin zakończenia roboty.

Rys. 1. Schemat wyznaczania terminów robót

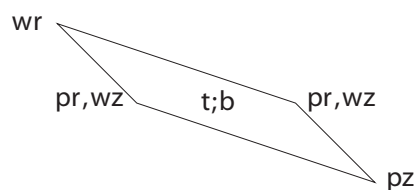
#### 4. Ogólny model obliczeniowy

Opracowano model obliczeniowy umożliwiający graficzne przedstawienie procesu realizacji robót budowlanych w postaci figur geometrycznych. Przekształcenie ich zachowuje podstawowe właściwości, zapewniając dodatkowe informacje, odwzorowując dane czasów realizacji robót, bufor i sprzężenia czasowe. W tym celu opracowany został program komputerowy umożliwiający modelowanie procesów realizacji i przekształcanie figur reprezentujących procesy budowlane i ich właściwości (bufory czasu, rezerwy, wartości liczbowe sprzężeń czasowych).

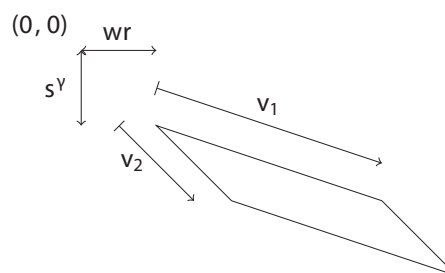
Pierwszym etapem jest wygenerowanie operacji graficznej przedstawionej przez równoległobok dla każdej z operacji (graficznego odwzorowania procesu budowlanego). Tworzony jest on z dwóch wektorów dobranych oznaczających czas trwania lub rezerwę procesu budowlanego bądź przyjętą stałą graficzną. Następnie generowany jest układ współrzędnych. Oś pozioma i pionowa to odpowiednio oś czasu i sektorów (frontów robót). Dodatkowo jedna z osi zawiera dodatkową informację o obliczonych rezerwach (buforach). Skala na osi pionowej związana jest przez współczynnik skali z podziałką osi poziomej. Jeżeli będzie to oś pozioma, to podziałka rezerwy dopasowana zostanie do podziałki osi czasu. Operacja obliczeniowa w układzie współrzędnych:  $(o_{i,p}^x, o_{i,j}^y) = (t_{i,j}^{wr}, (i-1) \times \gamma^s)$ . Oznacza to, że „zaczepona” jest ona terminem *wr* na osi czasu i odpowiednim sektorze. Rozmiar płaszczyzny potrzebnej do generowania wykresu to  $t_{n,m}^{pz} \times \Delta x$  w poziomie i  $n \times s^y$  w pionie.

#### 5. Model obliczeniowy – diagram równoległobokowy typ I

Diagram typu I ma budowę podobną do cyklogramu, gdzie dodatkową informacją umieszczoną na nim są bufor. W sytuacji, gdy występują – odłożone są na osi pionowej, czyli osi sektorów. Celem tak samo, jak w przypadku cyklogramu, jest



Rys. 2. Płaszczyzna operacji graficznej – oznaczenia



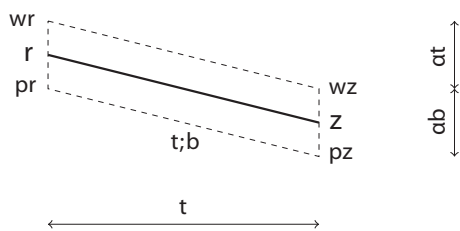
Oznaczenia: *i* – indeks zadania, *j* – indeks procesu, *n* – liczba zadań, *m* – liczba procesów, *wr* – termin rozpoczęcia operacji, *z* – termin zakończenia operacji, *wr* – najwcześniejszy termin rozpoczęcia operacji, *pr* – najpóźniejszy termin rozpoczęcia operacji, *wz* – najwcześniejszy termin zakończenia operacji, *pz* – najpóźniejszy termin zakończenia operacji,  $t_{i,j}$  – czas trwania operacji; odległość między najwcześniejszym lub najpóźniejszym terminem brzegowym  $t_{i,j} = wz_{i,j} - wr_{i,j} = pz_{i,j} - pr_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$  – bufor operacji; rezerwy czasowe – odległość między skrajnymi terminami rozpoczęcia lub zakończenia  $b_{i,j} = pr_{i,j} - wr_{i,j} = pz_{i,j} - wz_{i,j}$ ,  $\gamma$  – oznaczenie graficzne,  $s^y$  – graficzny rozmiar sektora,  $b^y$  – graficzny rozmiar buforu (czasowej),  $\Delta x$  – podziałka (graficzny rozmiar jednostki) czasu na osi *x*,  $\alpha = \Delta x / \Delta y$  – współczynnik proporcji podziałki (skala).

Rys. 3. Płaszczyzna operacji graficznej – wymiarowanie

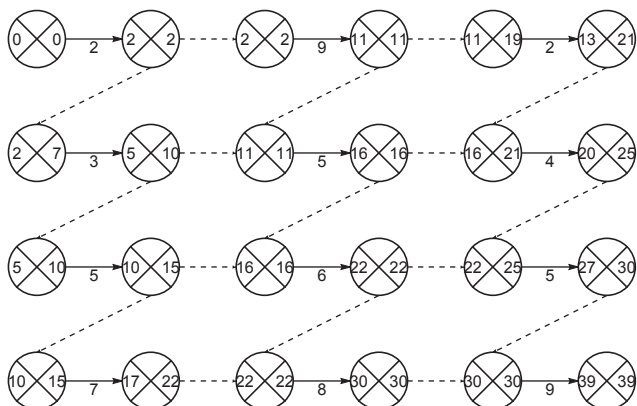
przedstawienie czasów trwania operacji, a dodatkową informacją są alternatywne terminy brzegowe.

#### 5.1. Płaszczyzna operacji graficznej

Równoległobok tworzony jest z pary wektorów  $(v_1, v_2) = ((t, \alpha t), (0, \alpha b))$ , w którego narożnikach umieszczone są terminy brzegowe operacji zgodnie z rysunkiem 4. Pionowa krawędź to przeskalowany bufor operacji, a odpowiadająca jej wysokość to czas jej trwania. Równoległobok stanowi powierzchnię możliwych przebiegów procesów budowlanych. Jest on linią równoległą do wektora  $v_1$  przesuniętą o wektor  $v_{2,b} = (0, \alpha u)$ ,  $u \in (0, b)$ , gdzie *u* oznacza rezerwę czasu (bufory czasu). Krawędź górna i dolna to odpowiednio najwcześniejszy i najpóźniejszy czas trwania procesu. W przypadku wyboru terminu pośredniego graficzna reprezentacja procesu budowlanego będzie znajdowała się wewnątrz pola figury. W przypadku kiedy  $wr = pr$  i  $wz = pz$ , operacje są bez buforów i płaszczyzna operacji graficznej sprowadzona jest do graficznej operacji. Graficznie powoduje to sprowadzenie równoległoboku do wektora  $v_1 = (t, \alpha t)$ , gdyż  $v_2 = (0, 0)$ . Zmiana współczynnika proporcji  $\alpha$  powoduje zmianę długości boków i kątów w taki sposób, że krawędź pionowa skraca się, a kąty wewnętrzne dążą do kątów prostych, czyli figura dąży do przekształcenia się w prostokąt. Zmienia się w ten sposób wymiar



Rys. 4. Płaszczyzna operacji graficznej typu I



Rys. 5. Diagram sieciowy

buforu. Zmniejsza się przez to zaburzenie diagramu spowodowane wprowadzeniem dodatkowej wartości, jaką są bufor.

5.2. Generowanie diagramu

Układ współrzędnych złożony jest z dwóch osi. Pozioma – to oś czasu o podziałce  $\Delta x$ . Pionowa zawiera dwie skale, dotyczące odpowiednio osi sektorów i buforów. Zbudowana jest w taki sposób, że dzieli sektory, gdzie każdy jest osią buforu operacji graficznej osi poziomej stanowiącej początek sektora. Graficzny rozmiar sektora wynosi  $s^y = \Delta y \times \max(t_{ij})$ . Podziałka osi drugiego poziomu wynosi  $\Delta y = \alpha \Delta x$ .

5.3. Przykład obliczeniowy

Przykład obliczeniowy dotyczy czterech zadań, a każde z nich – trzech procesów budowlanych. Dane liczbowe przyjęto losowo do ilustracji obliczeń graficznych (tab. 1).

Po wyznaczeniu wszystkich potrzebnych charakterystyk, wg założeń MSC III, można przedstawić je za pomocą diagramu sieciowego zgodnie z rysunkiem 5. Każda operacja graficzna składa się z lewego okręgu z najwcześniejszymi czasami rozpoczęcia i zakończenia, prawego okręgu z odpowiednio najpóźniejszymi czasami oraz ciągłej strzałki łączącej je i czasu trwania operacji. Strzałki przerywane poziome oznaczają zależności technologiczne, a ukośne – organizacyjne. Z diagramu można odczytać przebieg drogi krytycznej, która złożona jest z ciągu równoległoboków. W takim przypadku jeden z wektorów jest zerowy, co oznacza brak buforów. Procesy niekrytyczne mają bufor, ich wielkość oznaczona jest przez jeden z wektorów. Graficznie im „wyższy” równoległobok, tym większa swoboda w wyborze terminów brzegowych.

6. Model obliczeniowy – diagram równoległobokowy typ II

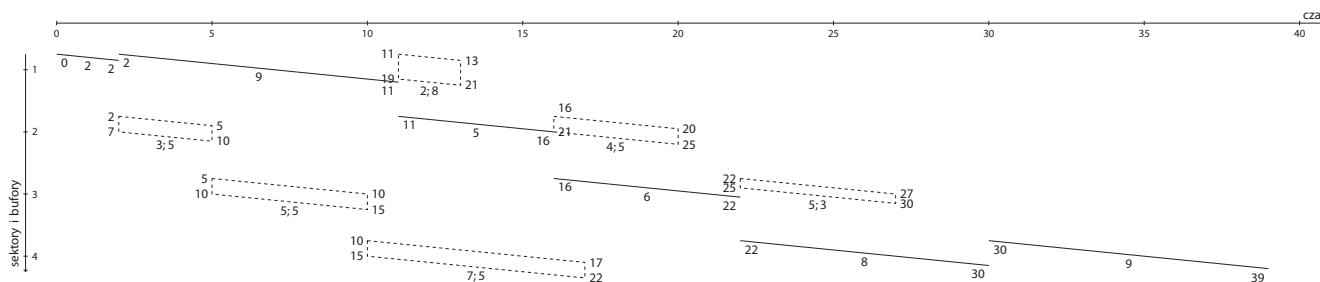
Diagram typu II ma budowę podobną do klasycznego cyklogramu, z uwzględnieniem buforów czasu (rezerw), na osi poziomej, czyli osi czasu. Celem obliczeń jest przedstawienie czasów trwania operacji z uwzględnieniem alternatywnych terminów brzegowych.

6.1. Płaszczyzna operacji graficznej

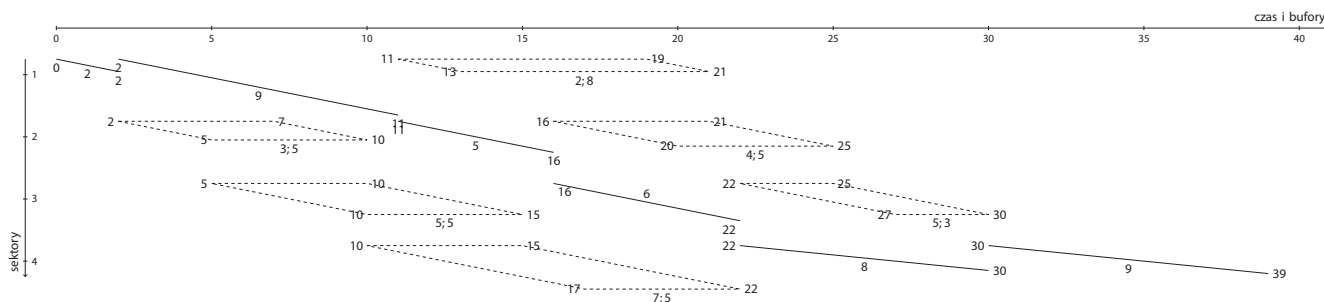
Równoległobok tworzony jest z pary wektorów  $(v_1, v_2) = ((t, \alpha t), (b, 0))$ , w którego narożnikach umieszczone są terminy brzegowe operacji zgodnie z rysunkiem 8. Pozioma krawędź to bufor operacji, a odpowiadająca jej wysokość to przeskalowany czas jej trwania. Równoległobok stanowi powierzchnię możliwych przebiegów operacji. Proces budowlany oznaczony jest linią równoległą do wektora  $v_1$  przesuniętą o wektor  $v_{2,t} = (u, 0)$ ,  $u \in (b, 0)$ , gdzie  $u$  oznacza stopień wykorzystania buforów. Krawędź lewa i prawa to odpowiednio najwcześniejszy

Tabela 1. Przykład obliczeniowy

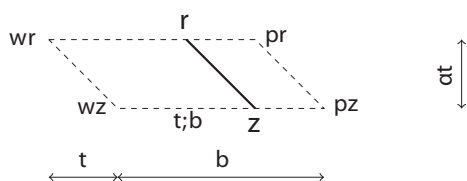
		Procesy		
		A	B	C
Zadania	I	2	9	2
	II	3	5	4
	III	5	6	5
	IV	7	8	9



Rys. 6. Diagram równoległobokowy typu I



Rys. 7. Diagram równoległobokowy typu II



Rys. 8. Płaszczyzna operacji graficznej typu II

i najpóźniejszy czas trwania procesu. W przypadku wyboru terminu pośredniego linia będzie leżała wewnątrz pola figury. W przypadku kiedy  $wr = pr$  i  $wz = pz$ , procesy są pozbawione buforów i płaszczyzna operacji graficznej sprowadzona jest do podstawowej. Powoduje to sprowadzenie równoległoboku do wektora  $v_1 = (t, at)$ , gdyż  $v_2 = (0,0)$ . Zmiana współczynnika proporcji  $\alpha$  powoduje zmianę długości boków i kątów w taki sposób, że krawędź pionowa skraca się, a kąty wewnętrzne dążą do kątów prostych, czyli figura dąży do przekształcenia się w prostokąt.

### 6.2. Generowanie diagramu

Układ współrzędnych złożony jest z dwóch osi. Oś pionowa to oś sektorów (bez skali) o graficznym rozmiarze sektora  $s' = \Delta y \times \max(t_{ij})$  i podziałce  $\Delta y = \alpha \Delta x$ . Oś pozioma to hybrydowa oś czasu i buforów o podziałce  $\Delta x$ . Zbudowana jest w taki sposób, że można na niej odwzorować zarówno czasy trwania procesu, jak i bufor.

## 7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono alternatywne podejście do standardowej, graficznej prezentacji danych przedstawianych zwykle przy użyciu cyklogramów, diagramów Gantta i diagramów sieciowych. Zaprezentowano nowy typ wykresu – diagram równoległobokowy. Może być stosowany do przedstawienia procesów budowlanych, w których terminy rozpoczęcia i zakończenia przyjmują wartości z określonego przedziału czasu. Do harmonogramowania procesów budowlanych opracowano program komputerowy umożliwiający zastosowanie modelu graficznego – diagramów równoległobokowych. Stosowany może być w planowaniu przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem metod sprzężeń czasowych (TCM) [8]. Wyniki z zastosowania modelu obliczeniowego przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Praca powstała w ramach międzynarodowego grantu dotyczącego projektu badawczego PWr – RUDN 2017, umowa: 0/0180/524/2017.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Afanasev V. A., Afanasev A. V., Stream scheduling of works in civil engineering (Потоchnая организация работ в строительстве), St. Petersburg (in Russian), 2000
- [2] Arditi D., Tokdemir O. B. & Suh K., Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Illinois Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Honan University, Honan, South Korea, 2001, str. 433–446
- [3] El-Rayes K. and Moselhi O., Optimal Resource Utilization for Repetitive Construction Projects, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, tom 127, 1/2001, str. 18–27
- [4] Goldratt E.M., Critical Chain, Great Barrington, MA: The North River Press, 1997
- [5] Hamerlink D. J., Rowings J. E., Linear scheduling model: Development of controlling activity path, Journal of Construction Engineering and Management, 124(4)/1998, str. 266–268
- [6] Harris R. B. and Ioannou P.G., Scheduling Projects with Repeating Activities, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, tom 124, 4/1998, str. 269–278
- [7] Hegazy T., Optimization of construction time – cost trade – off analysis using genetic algorithms, Canadian Journal of Civil Engineering, 26/1999, str. 685–697
- [8] Hejducki Z., Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych, Monografie, WPWr., 2000
- [9] Hejducki Z., Rogalska M., Metody sprzężeń czasowych TCM, Przegląd budowlany 2/2005, str. 38–45
- [10] Hejducki Z., Rogalska M., Time coupling methods, Construction scheduling and time/cost optimization, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011
- [11] Hejducki Z., Rogalska M., Harmonogramowanie procesów budowlanych metodami sprzężeń czasowych, Monografie, Politechnika Lubelska, 2017
- [12] Johnston D. W., Linear scheduling methods for highway construction, J. Constr. Div., ASCE, 107(C02), str. 247–261, 1981
- [13] Lucko G., Flexible Modeling of Linear Schedules for Integrated Mathematical Analysis Proceedings of the 2007, 39th Winter Simulation Conference, eds. Henderson S. G., Biller B., Hsieh M.-H., Shortle J., Tew J. D., Barton R. R., Washington, District of Columbia, December 9–12, 2007, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, New Jersey, str. 2159–2167
- [14] Lucko G., Productivity Scheduling Method Compared to Linear and Repetitive Project Scheduling Methods, Journal of Construction Engineering and Management 134(9)/2008, str. 711–720,
- [15] Lucko G., Productivity Scheduling Method: Linear Schedule Analysis with Singularity Functions, Journal of Construction Engineering and Management, 135(4)/2009, str. 246–253
- [16] Marcinkowski R., Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynierijno-budowlanej, Warszawa, WAT, 2002
- [17] Mrozowicz J., Methods of organizing construction activities taking into account time couplings (in Polish), Wrocław University of Technology Publishing House, 1997
- [18] Połński M., Application of the work breakdown structure in determining cost buffers in construction schedules, Archives of Civil Engineering, 1/2015, str. 147–161
- [19] Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z., Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling, Automation in Construction 18/2008, str. 24–31