

# ZARZĄDZANIE RYZYKIEM PROJEKTU

---

**Sławomir Biruk**  
**Piotr Jaśkowski**  
Politechnika Lubelska

## PROJEKTOWANIE REALIZACJI OBIEKTÓW BUDOWLANYCH W WARUNKACH RYZYKA\*

### Wprowadzenie

Optymalne projektowanie pracy jednostek wykonawczych w funkcji czasu wymaga zapewnienia ich harmonizacji poprzez ich odpowiedni dobór i rozmieszczenie (zsynchronizowanie) działań w czasie [Dyżewski 1965, s. 866; Jaworski 1999, s. 17; Rowiński 1982, s. 46]. Celem harmonizacji jest wyeliminowanie nieuzasadnionych przerw w pracy zasobów (w odniesieniu do całego planu zadań przedsiębiorstwa oraz w skali poszczególnych inwestycji i budów).

Przedsięwzięcia budowlane, z uwagi na odmienny sposób modelowania ich struktury organizacyjnej, klasyfikuje się na dwa podstawowe rodzaje: przedsięwzięcia typu kompleks operacji i przedsięwzięcia, które mogą być zorganizowane zgodnie z zasadami metody pracy równomiernej, której określone wersje nazywa się coraz częściej potokowymi metodami organizacji pracy [Jaworski 1999, s. 39-40]. Przedsięwzięcia typu kompleks operacji obejmują niejednorodne pod względem technologicznym procesy, które nie charakteryzują się cyklicznością i rytmicznością realizacji. W metodach potokowych te same brygady robocze (w niezmiennym składzie) wykonują procesy budowlane na kolejnych obiektach w tej samej kolejności (cyklicznie, równomiernie i równolegle). Następny proces może być rozpoczęty po zakończeniu pracy poprzedniej brygady na danym obiekcie.

---

\* Wyniki prac były finansowane ze środków statutowych przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2013).

Zasady projektowania realizacji przedsięwzięć zgodnie z zasadami metody pracy równomiernej przedstawił Dyżewski [1965, s. 947-984], a następnie rozwinął Rowiński [1982, s. 112-152]. W literaturze angielskojęzycznej ta metoda harmonogramowania nosi nazwę LOB – *Line of Balance* lub *Linear Scheduling Method*. Harris i Ioannou [1998, s. 269-278] na podstawie analizy sprzężeń pomiędzy procesami realizowanymi na kolejnych działkach roboczych ustalili ciąg czynności (*controlling sequence*) wpływający na termin realizacji całego przedsięwzięcia, który ma takie samo znaczenie praktyczne, jak ścieżka krytyczna w metodzie CPM. Podejście to nazwano metodą RSM (*Repetitive Scheduling Method*).

Najwyższy stopień harmonizacji pracy brygad jest osiągany w warunkach pracy równomiernej i rytmicznej, gdy pracochłonność robót jednego rodzaju na poszczególnych obiektach jest taka sama (obiekty i procesy jednotypowe) lub proporcjonalna do wielkości obiektu (obiekty jednorodne). Przy zastosowaniu tej metody organizacji uzyskuje się minimalizację czasu wykonania wszystkich obiektów, ciągłość pracy brygad i ciągłość pracy na obiektach jednotypowych. W przypadku obiektów niejednorodnych (różnych pod względem wielkości, rzutu, konstrukcji i technologii procesów podstawowych) na czas i inne parametry organizacji wpływa kolejność zajmowania obiektów przez brygady.

Problem ustalenia optymalnej kolejności realizacji niejednorodnych obiektów, w celu skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia remontowego przy ciągłej pracy brygad, analizował Orłowski [1997]. Zastosował on w tym celu algorytm S. Johnsona, mający zastosowanie w problemie harmonogramowania pracy dwóch brygad roboczych.

Mrozowicz [1997] i Hejducki [2000] opracowali metody optymalnego planowania, projektowania i sterowania realizacją złożonych procesów niejednorodnych (zgodnie z założeniami międzynarodowej szkoły potokowych metod pracy). W metodach tych eksponuje się jakościowy charakter sprzężeń występujących między poszczególnymi robotami. Rodzaje występujących sprzężeń stanowią podstawę klasyfikacji tych metod. Przedstawiono rozwiązanie zagadnienia kombinatorycznego szeregowania dowolnej liczby zadań w poszczególnych metodach (z wykorzystaniem algorytmu podziału i ograniczeń), co umożliwia wyznaczenie optymalnej, według różnych kryteriów, kolejności prowadzenia robót na frontach roboczych.

Problem poszukiwania optymalnej kolejności realizacji obiektów i terminów realizacji procesów przez brygady specjalistyczne na obiektach realizowanych metodami potokowymi był przedmiotem prac również Marcinkowskiego [1990, 2002]. Opracował on metodę harmonogramowania przedsięwzięć reali-

zowanych sposobem potokowym dla kryterium czasowo-kosztowego w celu jak najefektywniejszego wykorzystania brygad w dostępnym programie inwestycyjnym. Jaśkowski i Biruk [2005, 2010] do rozwiązania problemu ustalania kolejności realizacji obiektów dla różnych kryteriów optymalizacji i z uwzględnieniem różnych ograniczeń zastosowali algorytmy opracowane dla problemu komiwojażera.

Większość opracowanych modeli i metod harmonogramowania ma zastosowanie w deterministycznych warunkach realizacji. Znacznie ułatwia to modelowanie złożonych przedsięwzięć, jednak tak opracowane harmonogramy są podatne na dezaktualizację w rzeczywistych warunkach realizacji. Szczególnie dotyczy to produkcji budowlanej, której specyficzne cechy (zmiennie fronty robót, oddziaływanie warunków atmosferycznych, zmienność produktu, współpraca wielu wykonawców wymagająca koordynacji itd.) znacznie odróżniają ją od masowej produkcji przemysłowej, powtarzanej w stabilnych warunkach techniczno-organizacyjnych. Projekt realizacji powinien być opracowany dla dopuszczalnego poziomu ryzyka. Powszechnie stosowanym sposobem zwiększania odporności harmonogramów na zakłócenia jest alokacja buforów (rezerw) czasu. Celem ich stosowania jest zapewnienie terminowej realizacji poszczególnych procesów, etapów lub całego przedsięwzięcia. Istotnym problemem jest określenie wielkości buforów czasu i ich lokalizacji w harmonogramie [Jaśkowski, Biruk 2011].

Próby rozwiązania problemu projektowania realizacji jednorodnych procesów w metodzie pracy równomiernej z uwzględnieniem stochastycznego charakteru przebiegu ich realizacji podjął Kapliński [1974]. Wykorzystał on w tym celu teorię masowej obsługi oraz badania symulacyjne. Przeprowadzone badania modelu pozwoliły na wyjaśnienie mechanizmu powstawania zakłóceń. Autor wskazał na potrzebę stosowania różnego rodzaju rezerw (opóźnień) we włączaniu ciągów procesów do realizacji w celu zwiększenia niezawodności dotrzymania terminu zakończenia przedsięwzięcia.

Zakłócenia losowe wpływają nie tylko na czas realizacji przedsięwzięcia, lecz również są źródłem kosztów (strat) związanych z niewykorzystaniem potencjału wykonawczego jednostek organizacyjnych na skutek przerw w ich pracy. Z tego powodu opracowano metodę analityczną określania wielkości rezerw w celu zapewnienia ciągłości w pracy brygad przy ustalonym dopuszczalnym poziomie prawdopodobieństwa wystąpienia przestojów. Ze względu na złożoność analizowanego problemu w artykule jest rozpatrywany jedynie przypadek harmonizacji dwóch ciągów produkcyjnych.

## 1. Metoda analityczna określania buforów czasu

Przedsięwzięcie obejmuje realizację złożonego procesu budowlanego na  $m$  niejednorodnych działkach roboczych.

Złożony proces budowlany podzielono na dwa procesy prostsze, powierzone do wykonania dwóm brygadam roboczym (o niezmiennym składzie kwalifikacyjnym i liczebności), zajmującym w ustalonej kolejności poszczególne działki robocze (wydzielone fronty robót na obiektach).

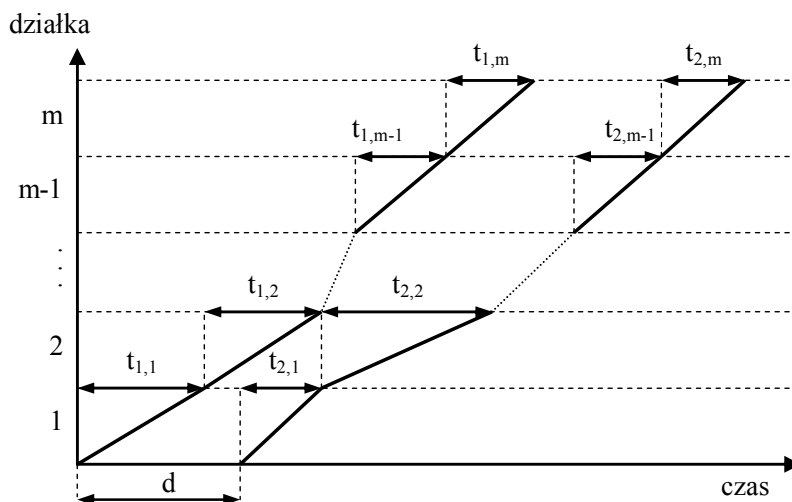
Szybka realizacja zadań na działkach roboczych wymaga maksymalnego stopnia wykorzystania dostępnych frontów robót.

Liczebności poszczególnych brygad – zgodnie z zasadami projektowania pracy równomiernej [Rowiński 1982, s. 141-152] – należy ustalać jako maksymalne tak, aby długości ich frontów pracy były równe długości frontów robót na działkach o najmniejszych pracochłonnościach.

Na każdej działce  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) musi być zrealizowany ciąg procesów  $i$  ( $i = 1, 2$ ) w niezmienniej kolejności technologicznej.

Czas wykonania robót przez brygadę  $i$  na działce  $j$  wynosi  $t_{ij}$ . Termin rozpoczęcia pierwszego procesu na pierwszej działce jest równy 0 –  $t'_{11} = 0$  (rys. 1).

Najkrótszy cykl budowy uzyskuje się przy krytycznym (maksymalnym) zbliżeniu sąsiadujących ze sobą linii łamanych (odcinków cyklogramu), które odwzorowują przebieg realizacji poszczególnych procesów technologicznych.



Rys. 1. Cyklogram dla ciągłej realizacji dwóch procesów

Proces 2 powinien być rozpoczęty z opóźnieniem  $d$ , które można obliczyć na podstawie następującej zależności:

$$d = \max \left\{ \begin{array}{l} t_{11} \\ t_{11} + t_{12} - t_{21} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^m t_{1j} - \sum_{j=1}^{m-1} t_{2j} \end{array} \right. .$$

Terminy zakończenia procesów ciągu pierwszego na kolejnych działkach  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) określa się na podstawie zależności:

$$t_{1j}^z = \sum_{k=1}^j t_{1k} ,$$

natomiast termin rozpoczynania kolejnego procesu można określić w sposób następujący:

$$t_{2j}^r = d + \sum_{k=1}^{j-1} t_{2k} .$$

W warunkach losowych czasy  $t_{ij}$  wykonania procesów  $i$  ( $i = 1, 2$ ) na kolejnych działkach  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) są zmiennymi losowymi z wartością oczekiwaną (przeciętną)  $E(t_{ij})$  oraz odchyleniem standardowym  $\sigma(t_{ij})$ . Parametry zmiennych losowych można określić analogicznie do metody *PERT*, na podstawie oszacowań:  $t_{ij}^a$  – optymistycznego,  $t_{ij}^m$  – najbardziej prawdopodobnego i  $t_{ij}^b$  – pesymistycznego. Przyjmując założenie, że zmienne losowe  $t_{ij}$  są wzajemnie niezależne oraz pomijając wpływ ewentualnych przestojów brygady 2 na działkach poprzednich, wartość oczekiwana zapasu czasu na działce  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) będzie równa:

$$E(\psi_j) = \sum_{k=1}^{j-1} E(t_{2k}) - \sum_{k=1}^j E(t_{1k}) + d ,$$

a jej wariancja:

$$D^2(\psi_j) = \sum_{k=1}^j D^2(t_{1k}) + \sum_{k=1}^{j-1} D^2(t_{2k}).$$

W celu przeciwdziałania losowym wahaniom czasu realizacji należy w szczególności zabezpieczyć ciągłość pracy brygady wykonującej proces 2 oraz wprowadzić dodatkową rezerwę czasu  $x$  zwiększającą termin włączenia ciągu technologicznego 2 (opóźniająca rozpoczęcie procesu 2 na pierwszej działce).

W artykule wielkość tej rezerwy jest ustalana tak, aby prawdopodobieństwo braku przerwy w pracy brygady 2 na skutek oczekiwania na zakończenie robót przez brygadę 1 na każdej działce było co najmniej równe wartości zdefiniowanej przez decydenta, określanej w literaturze mianem niezawodności dopuszczalnej [Jaworski 1999]. Dla każdej działki wymaganą wielkość opóźnienia  $x_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) w rozpoczęciu procesu 2 należy wyznaczyć tak, aby skutecznie przeciwdziałać losowym wahaniom czasu realizacji procesów. Wartości te można wyznaczyć z następującej zależności:

$$P(\psi_j \leq E(\psi_j) + x_j) = R_{dop}, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Zgodnie z centralnym twierdzeniem granicznym rozkład zmiennych losowych  $\psi_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) dąży do rozkładu normalnego.

Po dokonaniu standaryzacji rozkładu zmiennej losowej  $\psi_j$  warunek przybiera zatem następującą postać:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{u_j} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = R_{dop}, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

gdzie  $R_{dop}$  to założona wartość niezawodności dopuszczalnej.

Górna granica całkowania odpowiadająca zmiennej standaryzowanej rozkładu normalnego jest wyznaczana z zależności:

$$u_j = \frac{x_j}{\sqrt{D^2(\psi_j)}}.$$

Korzystając z tablic rozkładu  $N(0, 1)$ , można obliczyć wartości  $u_j$ , a następnie poszukiwane wartości wymaganych opóźnień na poszczególnych działkach roboczych.

Opóźnienie  $d$  ciągu 2 należy zwiększyć o rezerwę równą:

$$x = \max_{j=1,2,\dots,m} x_j,$$

tak aby w wymaganym stopniu chronić ciągłość pracy brygady 2 i zapewnić dostępność frontu robót na każdej działce.

## 2. Weryfikacja metody

W celu weryfikacji poprawności przyjętych założeń w proponowanej metodzie przeprowadzono badania symulacyjne realizacji dwóch przedsięwzięć (przykład 1 i 2). Dane do przykładów zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1

Oszacowania czasów wykonania procesów na działkach roboczych [j.cz.] (przykład 1)

Nr działki $j$	Czas wykonania procesu 1			Czas wykonania procesu 2		
	$t_{1j}^a$	$t_{1j}^m$	$t_{1j}^b$	$t_{2j}^a$	$t_{2j}^m$	$t_{2j}^b$
1	3,00	4,00	6,00	1,00	3,00	6,00
2	5,00	7,00	11,00	5,00	6,00	8,00
3	6,00	8,00	12,00	7,00	10,00	11,00
4	7,00	9,00	12,00	7,00	8,00	9,00
5	4,00	6,00	9,00	5,00	7,00	11,00

Tabela 2

Oszacowania czasów wykonania procesów na działkach roboczych [j.cz.] (przykład 2)

Nr działki $j$	Czas wykonania procesu 1			Czas wykonania procesu 2		
	$t_{1j}^a$	$t_{1j}^m$	$t_{1j}^b$	$t_{2j}^a$	$t_{2j}^m$	$t_{2j}^b$
1	15,00	24,00	30,00	23,50	28,00	31,00
2	20,00	27,00	32,00	26,67	19,00	24,00
3	18,00	22,00	26,00	22,00	16,00	22,00
4	16,00	19,00	25,00	19,50	19,00	25,00
5	30,00	35,00	42,00	35,33	23,00	26,00

Symulator został sporządzony w języku *GPSS*, a badania symulacyjne zostały przeprowadzone w programie *GPSS World* firmy *Minuteman Software*.

Rozkłady generowano, wykorzystując predefiniowane generatory w postaci:  $beta(RN, t_a, t_b, \alpha, \beta)$ , gdzie  $RN$  – numer generatora liczb pseudolosowych. Aby zapewnić niezależność zmiennych losowych czasu trwania procesów, wykorzystano generatory liczb pseudolosowych o różnych numerach.

Parametry kształtu rozkładu *beta* PERT czasów wykonania procesów określono według następujących formuł [Davis 2008]:

$$\alpha = \left( \frac{t_{ij}^m - t_{ij}^a}{t_{ij}^b - t_{ij}^a} \right) \left( \frac{(t_{ij}^m - t_{ij}^a)(t_{ij}^b - t_{ij}^m)}{\sigma_{ij}^2} - 1 \right),$$

$$\beta = \left( \frac{t_{ij}^b - t_{ij}^m}{t_{ij}^m - t_{ij}^a} \right) \cdot \alpha.$$

Wyniki obliczeń i badań symulacyjnych zestawiono w tabelach 3 oraz 4. W obu przykładach przeprowadzono taką samą liczbę przebiegów symulacyjnych (1000 przebiegów; szerokość przedziału ufności dla wartości średniej czasu realizacji przedsięwzięcia około 0,4 j.cz.). Maksymalne wymagane wielkości opóźnień  $x_j$  uzyskano w przykładzie 1 na działce nr 3, natomiast w przykładzie 2 – na działce nr 5.

W obu przykładach częstość przestoju w pracy brygady 2 na działkach, ustalona w badaniach symulacyjnych, jest najbardziej zbliżona do założeń w przypadku dużej wartości ryzyka dopuszczalnego. Mniejsze wartości częstości od założonych (lepszą ochronę ciągłości pracy brygady 2 na działce z maksymalną wartością opóźnienia  $x_j$ ) uzyskano w przypadku mniejszych poziomów ryzyka dopuszczalnego. Wynika to z wpływu przerw w pracy brygady 2 na działkach poprzedzających działkę z największą wartością obliczonego opóźnienia.

Przerwy te powodują przesunięcie terminów rozpoczynania procesu 2 na kolejnych frontach, zatem zwiększają rzeczywistą wielkość rezerwy czasu. Z drugiej strony zakłócenia ciągłości realizacji procesu 2 (przy małej wartości ryzyka dopuszczalnego) są źródłem zwiększenia wartości oczekiwanej czasu realizacji przedsięwzięcia w stosunku do wartości ustalonej analitycznie, bez uwzględnienia tego wpływu.



Tabela 3

Wyniki obliczeń i badań symulacyjnych (przykład 1)

$R_{dop}$	$x$ [j.cz.]	Wartość oczekiwana czasu realizacji przedsięwzięcia ustalona analitycznie [j.cz.]	Wartość oczekiwana czasu realizacji przedsięwzięcia ustalona w badaniach symulacyjnych [j.cz.]	Częstość przerw w pracy brygady 2 pomiędzy zakończeniem robót na działce nr 2 i rozpoczęciem pracy na działce nr 3
0,500	0	44,68	45,79	0,513
0,600	0,45	45,28	46,02	0,594
0,700	0,93	45,78	46,41	0,697
0,800	1,50	46,33	46,72	0,795
0,900	2,29	47,12	47,35	0,876
0,950	2,93	47,76	47,91	0,936
0,990	5,54	50,37	50,44	0,997

Tabela 4

Wyniki obliczeń i badań symulacyjnych (przykład 2)

$R_{dop}$	$x$ [j.cz.]	Wartość oczekiwana czasu realizacji przedsięwzięcia ustalona analitycznie [j.cz.]	Wartość oczekiwana czasu realizacji przedsięwzięcia ustalona w badaniach symulacyjnych [j.cz.]	Częstość przerw w pracy brygady 2 pomiędzy zakończeniem robót na działce nr 4 i rozpoczęciem pracy na działce nr 5
0,500	0	153,33	156,35	0,564
0,600	1,49	153,83	156,90	0,613
0,700	3,11	156,44	157,77	0,694
0,800	5,02	158,36	159,15	0,792
0,900	7,65	160,99	161,36	0,888
0,950	9,81	163,14	163,33	0,933
0,990	17,34	170,67	170,70	0,999

## Podsumowanie

Uwzględnienie wpływu warunków losowych przy harmonogramowaniu przedsięwzięć pozwala na lepsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków realizacyjnych i zwiększenie odporności planów na zakłócenia. Zastosowanie w praktyce modeli i metod probabilistycznych i symulacyjnych jest ograniczone m.in. ze względu na dostęp do wiarygodnych danych. Normy pracochłonności, które stanowią zwykle podstawę do ustalenia czasu realizacji procesów, dostar-

czają jedynie informacji o wartości mediany rozkładu nakładów czasu pracy. Dokładne ustalenie parametrów i typu rozkładów wymagałoby przeprowadzenia odpowiedniej (dużej) liczby badań chronometrycznych procesów dla przyjętego poziomu ufności, zapewniającej uzyskanie właściwej wiarygodności statystycznej wyników. Niezbędne jest zatem rozwijanie metod uproszczonych, o małej złożoności obliczeniowej, lecz jednocześnie mniej dokładnych ze względu na założenia upraszczające.

W proponowanej metodzie wpływ na dokładność ustalenia niezbędnej rezerwy mają: opinie ekspertów przy określaniu czasu pesymistycznego, optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego, założenie o typie rozkładu czasu procesów i ciągu czynności, nieuwzględnienie wpływu przestoju brygady na działkach poprzedzających oraz korelacji między zmiennymi losowymi czasu. Błąd oszacowania rezerwy (wynikający z założeń upraszczających), zweryfikowany w badaniach symulacyjnych, wydaje się być dopuszczalny na poziomie zastosowań inżynierskich.

## Bibliografia

- Biruk S., Jaśkowski P., 2010: Harmonogramowanie przedsięwzięć wieloobektowych z ciągłą realizacją procesów na działkach roboczych. „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki we Wrocławiu”, Rocznik XLII, 3(157), lipiec-wrzesień.
- Davis R., 2008: Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions. „INFORMS Transactions on Education” 2008, Vol. 8(3).
- Dyżewski A., 1965: Technologia i organizacja budowy. Arkady, Warszawa.
- Harris R.B., Ioannou P.G., 1998: Scheduling Project with Repeating Activities. „Journal of Construction Engineering and Management”, Vol. 124 (4).
- Hejducki Z., 2000: Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 34, Wrocław.
- Jaworski K.M., 1999: Metodologia projektowania realizacji budowy. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Jaśkowski P., Biruk S., 2005: Analiza algorytmów minimalizacji przestoju brygad roboczych przy ciągłej realizacji obiektów budowlanych. „Przegląd Budowlany”, nr 11.
- Jaśkowski P., Biruk S., 2011: The Method for Improving Stability of Construction Project Schedules through Buffer Allocation. „Technological and Economic Development of Economy”, Vol. 17, No. 3.

- Kapliński O., 1974: Niektóre problemy metody pracy równomiernej w warunkach stochastycznych. Materiały XX Jubileuszowej Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Kraków-Krynica.
- Marcinkowski R., 1990: Harmonogramowanie zadań inżynierjno-budowlanych według wybranych kryteriów decyzyjnych. WAT, Warszawa (praca doktorska).
- Marcinkowski R., 2002: Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynierjno-budowlanej. WAT, Warszawa.
- Mrozowicz J., 1997: Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Orłowski Z., 1997: Harmonogramowanie realizacji robót remontowych metodą programowania dynamicznego. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej z cyklu: Mieszkanie XXI wieku, Białystok 8-10 V.
- Rowiński L., 1982: Organizacja produkcji budowlanej. Arkady, Warszawa.

## CONSIDERING RISK IN PROJECT SCHEDULING

### Summary

Scheduling projects of linear or repetitive character (roads, pipelines, high-rise buildings) involves harmonizing a number of continuous construction processes to be conducted by specialized crews or machine sets executed at the same time in a number of work sections. Such projects are often modeled by time-distance diagrams that are represented graphically as an X-Y plot where one axis represents location, and the other time. Project planning involves allowing for construction-specific risks and is aimed at providing reliable schedules. These are to help the manager to assure that the project is completed by the predefined due date and, at the same time, that interruptions in work flow are avoided. In the case of repetitive processes, schedule robustness can be improved by providing time buffers between consecutive activities. The paper proposes an analytic method of sizing these buffers that assumes (as in PERT) that activity durations are stochastic variables whose distribution parameters can be defined on the basis of optimistic, pessimistic and most likely estimates. The method was used to construct a case-study schedule, and the schedule quality was tested by means of simulation.