

# OCENA PORÓWNAWCZA MIERNIKÓW ODPORNOŚCI HARMONOGRAMÓW BUDOWLANYCH

Piotr JAŚKOWSKI\*, Sławomir BIRUK

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin

**Streszczenie:** Na czas realizacji procesów budowlanych wpływa wiele czynników, których częstość i siła oddziaływania zależą od warunków realizacji – specyficznych dla danej budowy, przedsiębiorstwa, lokalizacji. Większość dotychczasowych prac z zakresu harmonogramowania koncentrowała się na modelowaniu przedsięwzięć i poszukiwaniu dokładnych oraz heurystycznych metod rozwiązywania modeli, w celu projektowania optymalnych (lub suboptymalnych) harmonogramów w warunkach deterministycznych. Podejście, zmierzające do opracowania harmonogramów odpornych na zakłócenia (stabilnych) jest określane mianem proaktywnego. Powinno ono zapewnić minimalizację odchyleń rzeczywistych terminów realizacji procesów od terminów zaplanowanych. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową rozwiązania tego problemu w przedsięwzięciach realizowanych w praktyce (model stochastyczny), w literaturze przedmiotu są poszukiwane zastępcze mierniki odporności harmonogramów. Mierniki o potwierdzonej wiarygodności mogą stanowić podstawę tworzenia efektywnych algorytmów harmonogramowania. Celem pracy jest analiza porównawcza jakości różnych miar odporności harmonogramów z zastosowaniem metody symulacji Monte Carlo i propozycja nowego miernika oraz metody określania wielkości buforów czasu.

**Słowa kluczowe:** odporne harmonogramy budowlane, ryzyko realizacji przedsięwzięć budowlanych, symulacja komputerowa.

## 1. Wprowadzenie

Przedsięwzięcia budowlane są narażone na oddziaływanie różnych czynników ryzyka (są to między innymi warunki pogodowe, gruntowe, różne doświadczenie, kwalifikacje i wydajność brygad oraz podwykonawców, wypadki, niezetelni dostawcy, braki materiałowe, konieczność wykonywania robót poprawkowych). Warunki środowiska, w którym przedsięwzięcia są realizowane, nie są statyczne. Ich zmienność jest źródłem niepewności i ryzyka w odniesieniu do kosztu, czasu i jakości wykonania obiektu budowlanego.

Prawdopodobieństwo, że harmonogram bazowy (opracowany przy założeniu, że wszystkie parametry są znane i niezmiennie w czasie) nie ulegnie dezaktualizacji jest małe, bowiem przebieg realizacji poszczególnych procesów zakłóca wiele czynników niekontrolowanych.

Ryzyko czasu powinno być uwzględnione już na etapie projektowania realizacji przedsięwzięć i budowy harmonogramu, w celu zwiększenia prawdopodobieństwa dotrzymania kluczowych terminów – zakończenia etapów, zatrudnienia podwykonawców, wynajmu maszyn czy zakończenia przedsięwzięcia. Harmonogram bazowy

(opracowany przed rozpoczęciem realizacji) powinien zakładać realistyczne terminy nie tylko zakończenia całego przedsięwzięcia, ale również terminów rozpoczęcia niektórych procesów, ponieważ ułatwia to zarządzanie zasobami, kontraktowanie podwykonawców i planowanie dostaw.

Dostępna wiedza statystyczna o losowych warunkach realizacji powinna być uwzględniona na etapie projektowania harmonogramu. Podejście zmierzające do zwiększenia odporności terminów rozpoczęcia realizacji poszczególnych procesów w harmonogramie i terminu zakończenia przedsięwzięcia na zakłócenia losowe w literaturze przedmiotu jest określane mianem harmonogramowania proaktywnego (Lambrechts i in., 2008). Harmonogram powinien charakteryzować się zarówno dużą odpornością jakości, jak i stabilnością (Van de Vonder i in., 2005). Tzw. odporność jakości harmonogramu (*Quality robustness*) jest definiowana jako prawdopodobieństwo dotrzymania zaplanowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia. Odporność harmonogramu (*solution robustness*) lub stabilność jest mierzona za pomocą kosztu niestabilności harmonogramu – sumy ważonych wartości bezwzględnych odchyleń wartości oczekiwanej terminów rozpoczęcia procesów

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: p.jaskowski@pollub.pl

od terminów zaplanowanych (Schatteman i in., 2008). Wagi można interpretować jako jednostkowe koszty opóźnień rozpoczęcia procesów i zakończenia przedsięwzięcia, wynikające z kar umownych np. za przekroczenia terminów dyrektywnych, zwiększonych kosztów magazynowania materiałów, wynajmu maszyn itp.

W artykule autorzy pomijają koszty i ewentualne przychody związane z wcześniejszym rozpoczynaniem procesów.

Zastosowanie metod programowania stochastycznego do rozwiązania modelu zagadnienia budowy odpornych harmonogramów, z funkcją celu minimalizującą koszt niestabilności i czasami realizacji procesów, będącymi zmiennymi losowymi o ustalonych typach i parametrach rozkładów prawdopodobieństwa, jest złożone numerycznie. Z tego względu w literaturze przedmiotu poszukuje się zastępczych mierników odporności harmonogramów, które mogą stanowić podstawę do budowy efektywnych algorytmów harmoniogramowania.

W harmonogramowaniu proaktywnym są stosowane techniki bazujące na redundancji i kontyngencji, polegające na odpowiedniej alokacji buforów czasu. Bufor na końcu procesu (kontyngencja czasu) stanowi jego integralną część i zwiększa prawdopodobieństwo jego zakończenia w zaplanowanym terminie. W przypadku technik bazujących na redundancji, bufor ma charakter czasu bezczynności (przerw) i są umieszczane na początku lub na końcu procesu, w celu ochrony terminów rozpoczęcia procesów i przeciwdziałania propagacji zakłóceń w harmonogramie. Koncepcja alokacji zapasu swobodnego jest zatem ściśle skorelowana ze zwiększaniem odporności harmonogramu. Wielkości istniejących zapasów całkowitych wpływają natomiast na odporność jakości harmonogramu (Hazir i in., 2010).

W niewielu pracach proponuje się i bada jakość/adekwatność mierników odporności harmonogramów. M.in. Al.-Fawzan i Haouari (2005) zdefiniowali odporność harmonogramów jako sumę zapasów swobodnych procesów, ulokowanych w celu zwiększenia możliwości przeciwdziałania małym wydłużeniom czasu realizacji niektórych procesów, spowodowanych oddziaływaniem niekontrolowanych czynników. Badania Gorena i Sabuncuoglu (2008) potwierdziły występowanie dużej korelacji między odpornością i sumą zapasów swobodnych (lub równoważnie wartością średnią zapasu swobodnego) w przypadku przedsięwzięć przemysłowych realizowanych w systemie gniazdowym (*job shop*). Kobylański i Kuchta (2007) proponują, aby – w celu zwiększenia odporności jakości harmonogramu i jego stabilności – maksymalizować minimalną wartość zapasu swobodnego lub iloraz: zapas swobodny / czas realizacji procesu. Lambrechts i in. (2008) zaproponowali jako miernik odporności nieliniową funkcję użyteczności. Chtourou i Haouari (2008) zastosowali wiązkę dwunastu mierników do wyboru najbardziej odpornych harmonogramów z ograniczeniami zasobowymi.

## 2. Proponowany miernik odporności harmonogramów

Odporność harmonogramu jest uzależniona od wielkości buforów czasu i zapasów swobodnych. Przy ustalaniu wielkości buforów umieszczonych przed terminem rozpoczęcia procesu należy uwzględnić: podatność na wpływ zjawisk losowych procesów poprzedzających (co wpływa na prawdopodobieństwo rozpoczęcia procesu w założonym terminie), jednostkowy koszt (wagę) opóźnienia rozpoczęcia procesu.

Przyjmijmy, że przedsięwzięcie jest modelowane za pomocą skierowanego, niecyklicznego i spójnego unigrafu  $G = \langle V, E \rangle$ , bez pętli, w którym wyróżniono jeden wierzchołek początkowy o numerze  $j = 1$  i jeden końcowy  $n$ .  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  jest zbiorem wierzchołków grafu (procesów budowlanych),  $E \subset V \times V$  to relacja dwuczłonowa określająca zależności kolejnościowe między procesami (łuki grafu).

Czas realizacji procesu (oprócz wierzchołka końcowego) jest zmienną losową. Analiza modelu sieciowego w funkcji czasu (przeprowadzona dla planowanych czasów  $d_j$  realizacji procesów  $j = 1, 2, \dots, n$ ; czasów równych wartościom oczekiwany zmiennych losowych) umożliwia utworzenie harmonogramu bazowego.

Procesom jest przypisany  $c_j$  – jednostkowy koszt opóźnień ich terminów rozpoczęcia w stosunku do terminów określonych w harmonogramie bazowym. Jednostkowy koszt procesu  $n$  jest kosztem opóźnienia terminu zakończenia przedsięwzięcia w stosunku do terminu dyrektywnego  $T_d$ . Procesy dla których  $c_j > 0$  ( $j \in H$ , gdzie  $H = \{j : c_j > 0\}$ ), rozpoczynają się zgodnie z polityką *railway* – nie wcześniej niż w terminie ustalonym w harmonogramie.

Bufory są lokowane w celu zwiększenia odporności harmonogramu z ustalonym dyrektywnym terminem zakończenia przedsięwzięcia  $T_d$ , co jest równoważne zmniejszeniu kosztu niestabilności harmonogramu.

Zadaniem buforów czasu  $\delta_j$  dla procesów  $j \in H$  jest zabezpieczanie przed propagacją zakłóceń w harmonogramie. Są to przerwy / czasy bezczynności między planowanymi a najwcześniejszymi możliwymi terminami rozpoczęcia procesów. Wielkość buforów czasu w proponowanej metodzie jest określana z uwzględnieniem jednostkowych kosztów opóźnień procesów i możliwych wartości przesunięcia ich rozpoczęcia w stosunku do terminów w harmonogramie bazowym. W celu określenia opóźnień terminów rozpoczęcia procesów są przeprowadzane badania symulacyjne.

Wielkość buforów jest określana według procedury obejmującej następujące etapy:

1. Obliczenie minimalnego czasu trwania przedsięwzięcia  $T_{\min}$ , najwcześniejszych terminów  $s_j^0$  rozpoczynania wszystkich procesów  $j \in V$  i ich całkowitego zapasu czasu  $zc_j^0$ , na podstawie wstępnego harmonogramu bazowego (bez buforów), sporządzonego dla wartości oczekiwanych czasów  $d_j$  wykonania procesów  $j = 1, 2, \dots, n$ .

2. Przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych modelu sieciowego, przy założeniu, że czasy wykonania procesów są zmiennymi losowymi o wcześniej ustalonych rozkładach (na przykład  $\beta$ -PERT lub trójkątny, których parametry są określane na podstawie oszacowań ekspertów), a procesy rozpoczynają się zgodnie z przyjętą polityką. Na podstawie symulacji można określić wartość oczekiwaną opóźnień procesów w stosunku do terminów zaplanowanych  $\Delta s_j = s_j^1 - s_j^0$ , gdzie  $s_j^1$  jest średnim terminem rozpoczęcia procesu  $j \in V$  z poszczególnych przebiegów symulacyjnych.

Przy założeniu, że znany jest dyrektywny czas trwania przedsięwzięcia  $T_d$ , całkowity zapas czasu procesów jest równy  $zc_j = zc_j^0 + T_d - T_{\min}$  dla  $j = 1, 2, \dots, n$ . Istniejący całkowity zapas czasu ciągów procesów w harmonogramie bazowym powinien być rozdzielony (w postaci buforów ulokowanych na początku procesów) pomiędzy wszystkie procesy z uwzględnieniem wag obliczanych zgodnie z wyrażeniem:

$$w_j = c_j \cdot (\Delta s_j + 3\sigma_j) \quad (1)$$

gdzie  $\sigma_j$  jest odchyleniem standardowym terminów rozpoczęcia procesów uzyskanych techniką symulacji;

3. Jako miarę odporności harmonogramu proponuje się minimalną wartość ilorazu  $\delta_j / (zc_j \cdot w_j)$ . Model matematyczny problemu określania wielkości buforów

czasu, w celu zwiększenia odporności harmonogramu, ma postać następującą:

$$\max z: z = \min_{j \in H} \left\{ \frac{\delta_j}{zc_j w_j} \right\} \quad (2)$$

$$s_1 = 0 \quad (3)$$

$$s_j - \delta_j \geq s_i + d_i, \quad \forall (i, j) \in E \quad (4)$$

$$s_n \leq T_d \quad (5)$$

$$s_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (6)$$

$$\delta_j \geq 0, \quad \forall j \in V \quad (7)$$

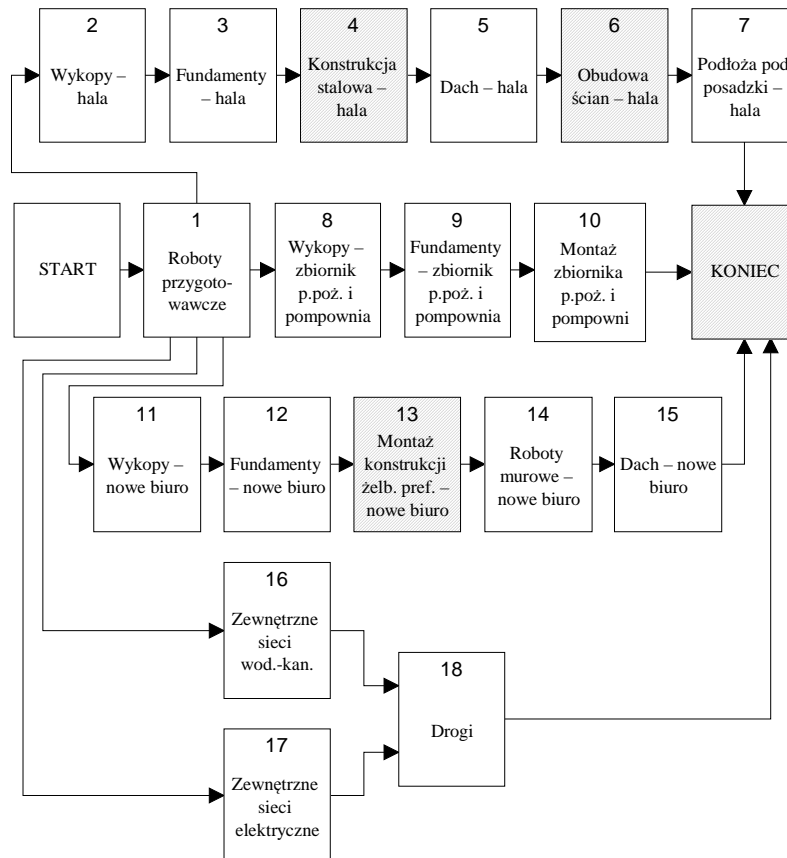
$$\delta_j = 0, \quad \forall j \in V \setminus H \quad (8)$$

$$\delta_j \in \text{int}, \quad \forall j \in H \quad (9),$$

gdzie  $s_j$  jest to termin rozpoczęcia procesu  $j, j = 1, 2, \dots, n$  w harmonogramie bazowym (z buforami).

### 3. Ocena jakości mierników odporności harmonogramów – przykład

Na rysunku 1 przedstawiono graf zależności technologiczno-organizacyjnych przedsięwzięcia budowlanego.



Rys. 1. Graf zależności kolejnościowych (przykład); wyróżniono procesy  $j$ , dla których  $c_j > 0$

W tabeli 1 zestawiono oszacowania parametrów zmiennych losowych czasów wykonania poszczególnych procesów, przy założeniu rozkładów trójkątnych ( $a_j$  – czas minimalny,  $m_j$  – najbardziej prawdopodobny,  $b_j$  – maksymalny,  $d_j$  – wartość oczekiwana), oraz  $c_j$  – jednostkowe koszty opóźnień ich rozpoczynania. Minimalny czas realizacji przedsięwzięcia, obliczony w wyniku analizy modelu sieciowego z uwzględnieniem wartości oczekiwanych zmiennych losowych czasu wykonania procesów, wynosi 277 dni.

W przykładzie oceniono jakość ośmiu zastępczych mierników odporności oraz kosztu niestabilności harmonogramu opracowanego z zastosowaniem heurystyki *adapted float factor* (Van de Vonder i in.,

2005). Poszukiwano maksymalnych wartości wszystkich mierników w celu zwiększenia odporności harmonogramu. Termin zakończenia przedsięwzięcia ustalono na 290 dzień po jego rozpoczęciu. Wartość oczekiwaną opóźnień procesów i ich odchylenia standardowe określono w badaniach symulacyjnych Monte Carlo (30000 przebiegów). Badania symulacyjne przeprowadzono za pomocą pakietu symulacyjnego GPSS World<sup>tm</sup> Personal Version firmy Minuteman Software (licencja edukacyjna).

Wielkości zapasów swobodnych  $zs_j$  i buforów  $\delta_j$  ustalono rozwiązując modele programowania liniowego, stosując program LINGO 12.0 Optimization Modeling Software. Wyniki badań i obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Oszacowania czasów realizacji procesów i jednostkowych kosztów opóźnień terminów ich rozpoczęcia (przykład)

j	Process / work package	Czas minimalny	Czas najbardziej prawdopodobny	Czas maksymalny	Wartość oczekiwana czasu	Jednostkowy koszt opóźnień
		$a_j$	$m_j$	$b_j$	$d_j$	$c_j$
1	Roboty przygotowawcze	24	25	29	26	0
2	Wykopy – hala	19	20	24	21	0
3	Fundamenty – hala	34	35	41	37	0
4	Konstrukcja stalowa – hala	47	50	56	51	1
5	Dach – hala	34	40	51	42	0
6	Obudowa ścian – hala	52	58	68	59	1
7	Podłóża pod posadzki – hala	34	40	49	41	0
8	Wykopy – zbiornik p.poż. i pompownia	2	3	5	3	0
9	Fundamenty – zbiornik p.poż. i pompownia	4	5	7	5	0
10	Montaż zbiornika p.poż. i pompowni	15	20	37	24	0
11	Wykopy – nowe biuro	5	7	10	7	0
12	Fundamenty – nowe biuro	18	20	25	21	0
13	Montaż konstrukcji żelb. pref. – nowe biuro	12	15	29	19	1
14	Roboty murowe – nowe biuro	22	25	30	26	0
15	Dach – nowe biuro	10	12	16	13	0
16	Zewnętrzne sieci wod.-kan.	22	25	30	26	0
17	Zewnętrzne sieci elektryczne	70	75	90	78	0
18	Drogi	44	50	60	51	0
19	Koniec	0	0	0	0	1

Tab/ 2. Koszty niestabilności harmonogramów utworzonych w wyniku maksymalizacji różnych miar odporności

Lp.	Miernik odporności	$zs_3$	$zs_5$	$zs_{12}$	$zs_7$	$zs_{10}$	$zs_{15}$	$zs_{18}$	$\delta_4$	$\delta_6$	$\delta_{13}$	$\delta_{19}$	Koszt niestabilności
1	Suma zapasów swobodnych	13	0	178	0	232	0	135	13	0	178	0	5,2750
2	Ważona suma zapasów swobodnych <sup>1</sup>	13	0	178	0	232	0	135	13	0	178	0	5,2750
3	Suma buforów	13	0	178	0	232	0	135	13	0	178	0	5,2750
4	Minimalny zapas swobodny <sup>2</sup>	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	1,0639
5	Minimalny bufor <sup>3</sup>	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	1,0639
6	Minimalny zapas swobodny <sup>4</sup>	5	4	174	4	232	4	135	5	4	174	4	1,2865
7	Minimalny bufor <sup>5</sup>	5	4	174	4	232	4	135	5	4	174	4	1,2865
8	Proponowany miernik	2	4	17	7	232	161	135	2	4	17	7	0,7727
9	Adapted float factor heuristic	4	5	89	4	232	89	135	4	5	89	4	0,8666
10	Harmonogram bazowy (bez buforów)	0	0	0	13	232	178	135	0	0	0	0	3,7411

<sup>1</sup> wagi procesów są obliczane jako suma jednostkowych kosztów opóźnień danego procesu i jego następników;

<sup>2</sup> suma zapasów swobodnych pozostałych procesów (dla których  $c_j > 0$ ) jest minimalna;

<sup>3</sup> suma buforów pozostałych procesów (dla których  $c_j > 0$ ) jest minimalna;

<sup>4</sup> suma zapasów swobodnych pozostałych procesów (dla których  $c_j > 0$ ) jest maksymalna;

<sup>5</sup> suma buforów pozostałych procesów (dla których  $c_j > 0$ ) jest maksymalna;

W przypadku mierników 1, 2, 4 i 6 (tab. 2), zapasy swobodne były przydzielane tylko bezpośrednim poprzednikom procesów, dla których  $c_j > 0$ . Bufory umieszczano na początkach procesów z  $c_j > 0$  w przypadku stosowania mierników 3, 5, 7, 8, 9.

Koszt niestabilności harmonogramu z buforami, których wielkość określono poprzez maksymalizację zaproponowanego miernika, jest najmniejszy. Zaproponowany sposób rozdziału zapasu czasu uwzględnia informacje o zmienności czasów realizacji procesów poprzedzających w ciągu oraz dane o propagacji zakłóceń w sieci i zapewnia lepsze rezultaty niż przy zastosowaniu innych klasycznych mierników. Zauważono jednak, iż przyjęta formuła (zapewniająca możliwość przekształcenia zadania (2) do postaci liniowej) powoduje nadmierną ochronę terminów rozpoczęcia procesów na końcach dróg sieci. Sposobem przeciwdziałania temu zjawisku może być wprowadzenie dodatkowych ograniczeń wielkości buforów w modelu matematycznym.

Maksymalizacja minimalnych wielkości buforów i zapasów czasu zmniejsza koszty niestabilności harmonogramu bazowego. Większą odporność posiadają harmonogramy, w których wielkości zapasów i buforów są wyrównane. Maksymalizacja sumy wielkości buforów i zapasów prowadzi do nadmiernej ochrony terminów rozpoczęcia niektórych procesów i jednocześnie nie zapewnia dostatecznej ochrony terminu zakończenia przedsięwzięcia. W rezultacie koszty niestabilności takich harmonogramów mogą być większe niż harmonogramów bez buforów.

#### 4. Podsumowanie

W artykule analizowano jakość prezentowanych w literaturze zastępczych mierników odporności harmonogramów. Zaproponowano miernik umożliwiający harmonogramowanie przedsięwzięć z zastosowaniem metod programowania liniowego. Jego maksymalizacja zapewnia zmniejszenie kosztu niestabilności harmonogramu.

Odporny harmonogram, w którym terminy realizacji poszczególnych etapów są ustalone z dużym prawdopodobieństwem, gwarantuje sprawną realizację przedsięwzięcia w zakresie produkcji podstawowej, pomocniczej i usług. Zmiany terminów następujące w wyniku oddziaływania zjawisk losowych utrudniają koordynację zatrudnienia podwykonawców i zarządzanie dostawami. Niedotrzymywanie terminów umownych jest źródłem kar i strat finansowych wykonawców.

Niska stabilność harmonogramu może zakłócać ciągłość pracy brygad i w efekcie oddziaływać na koszty realizacji przedsięwzięcia. Alokacja buforów czasu umożliwia zabezpieczenie harmonogramu przed negatywnym wpływem czynników ryzyka.

#### Literatura

- Al-Fawzan M.A., Haouari M. (2005). A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Economics*, Vol. 96, No. 2, 175-187.
- Chtourou H., Haouari M. (2008). A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 1, 183-194.
- Goren S., Sabuncuoglu I. (2008). Robustness and stability measures for scheduling: single machine environment. *IIE Transactions*, Vol. 40, No. 1, 66-83.
- Hazir Ö., Haouari M., Erel E. (2010). Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 201, No. 2, 633-643.
- Kobylański P., Kuchta D. (2007). A note on the paper by M.A. Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Economics*, Vol. 107, No. 2, 496-501.
- Lambrechts O., Demeulemeester E., Herroelen W. (2008). A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules. *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, No. 2, 493-508.
- Schatteman D., Herroelen W., Van de Vonder S., Boone A. (2008). Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, No. 11, 885-893.
- Van de Vonder S., Demeulemeester E., Leus R., Herroelen W. (2005). The use buffers in project management: The trade-off between stability and makespan. *International Journal of Production Economics*, Vol. 97, No. 2, 227-240.

#### EVALUATING SURROGATE MEASURES OF CONSTRUCTION PROJECT SCHEDULE ROBUSTNESS

**Abstract:** The actual completion time of construction projects is reported to be rarely in accordance with initial plans. A schedule considered optimal with respect to project duration may become infeasible due to disruptions caused by uncontrollable factors. Deficiencies of the existing methods of project scheduling gave rise to the worldwide search for predictive (or proactive) scheduling that is expected to provide robust schedules (immune to disturbances), thus counteracting instability and "nervousness" of a project plan. A stable schedule with acceptable makespan performance should minimize the instability cost function, defined as the weighted sum of the expected absolute deviations between the predicted start times and the value that the random variable of start time will assume during schedule execution. Computational burden of optimizing this direct measure of schedule robustness in a real-life project environment is quite high. Developing surrogate quantitative measures to provide a good estimate of schedule robustness is essential for building efficient robust scheduling algorithms. For this reasons, the aim of this paper is to evaluate the quality of free-slack-based measures for a benchmark project using Monte Carlo simulation technique. The new approach, to increasing schedule robustness, based on buffer sizing and allocation, is proposed and tested against the existing free-slack times allocation approaches.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy

