

Monitoring C-S i S-C odchyłeń czasowych i kosztowych harmonogramu przy użyciu złożonych wskaźników metody wartości uzyskanej

C-S and S-C monitoring time and cost deviations of the schedule using complex indicators of the value earned method

mgr inż. Ewa Zarzeczna (ORCID: 0000-0001-8641-2230), dr inż. Daniel Przywara (ORCID: 0000-0002-1722-6140), dr hab. inż. Adam Rak (ORCID: 0000-0002-8112-1618), prof. uczelni, Wydział Mostów, Geotechniki i Architektury, Politechnika Opolska w Opolu

DOI 10.5604/01.3001.0053.6972

Streszczenie: Planowanie i realizacja przedsięwzięć budowlanych są procesami trudnymi i obciążonymi wieloma elementami ryzyka. Budżet rozłożony w czasie, który opracowuje się na podstawie harmonogramu, przedstawia oczekiwany rozkład kosztów przez cały okres trwania robót, który w trakcie realizacji przedsięwzięcia podlega ustawicznym zmianom, wynikającym z czynników czasowych, kosztowych i organizacyjnych. Zarządzanie kontraktami budowlanymi wymaga od menedżerów umiejętności bieżącej analizy odchyłeń ponoszonych kosztów produkcji – od wartości skalkulowanych kosztorysem ofertowym i założonych w harmonogramie rzeczowo-finansowym. W artykule podjęto próbę analizy powstających odchyłeń czasowych i kosztowych autorskim monitoringiem C-S i S-C, bazującym na złożonych wskaźnikach metody EVM. W badaniu odchyłeń kosztów planowanych i kosztów poniesionych przez wykonawcę posłużono się przykładem budowy osiedla wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej.

Słowa kluczowe: metoda wartości uzyskanej, odchylenia czasowe, odchylenia kosztowe, harmonogram.

Abstract: Planning and implementation of construction projects are difficult processes and are burdened with many elements of risk. The budget spread over time, which is developed on the basis of a schedule, presents the expected distribution of costs throughout the duration of the works, which is subject to constant changes during the implementation of the project, resulting from time, cost and organizational factors. The management of construction contracts requires managers to be able to analyze the deviations of production costs on an ongoing basis – from the values calculated with the offer cost estimate and assumed in the material and financial schedule. The article attempts to analyze the emerging time and cost deviations using the proprietary C-S and S-C monitoring, based on the complex indicators of the EVM method. In the study of deviations of planned costs and costs incurred by the contractor, the example of the construction of a multi-family housing estate was used.

Keywords: earned value method, time variance, cost variance, schedule.

1. Wprowadzenie

Wzrastająca liczba i rosnące znaczenie niepowtarzalnych, często złożonych przedsięwzięć budowlanych, skutkuje nieślabnącym zainteresowaniem zarządzaniem projektami.

Mimo niekwestionowanego, znaczniejszego niż kiedykolwiek, rozwoju skutecznych metod planowania, koordynowania i kontrolowania, wzrost komplikacji warunków funkcjonowania organizacji powoduje, że osiągnięcie sukcesu w zarządzaniu projektami nie jest łatwiejsze.

Dobór metod sterowania produkcją zależy od wielu czynników – przede wszystkim od stopnia powtarzalności produkcji, a także od stopnia szczegółowości dostępnych danych, szczegółowości prowadzonej ewidencji, stosowania

dokumentacji planistyczno-ewidencyjnej, stopnia wykorzystania technik komputerowych oraz kultury organizacyjnej panującej w przedsiębiorstwie. Produkcja budowlana cechuje się znacznymi wahaniem sezonowymi. Stanowią one cykl powtarzających się zmian, w mniej więcej równych okresach czasu, ze zbliżonym nasileniem. Ich identyfikacja i uwzględnienie znacznie podnosi precyzję przewidywań [7].

Metoda Wartości Uzyskanej (ang. *Earned Value Method* – EVM) jest uznawana za zaawansowaną metodę kontrolną przedsięwzięć produkcyjnych, która dostarcza wyniki robocze w formie ilościowych i jakościowych wskaźników.

Celem opracowania metody EVM było powiązanie rzeczowego stanu zaawansowania robót i ponoszonych kosztów

– na tle wartości planowanych. Narzędzie to „wprowadzone” na place budów zostało w nich efektywnie zaimplementowane i upowszechnione.

Menedżerowie zarządzający skomplikowanymi kontraktami budowlanymi, w ocenie stanu zaawansowania ich harmonogramów posługują się słowami-kluczami, w pełni opisującymi planowy i faktyczny przerób, budżet i terminowość realizacji. Należą do nich złożone wskaźniki kontrolne metody wartości uzyskanej, wykorzystane w strategicznej ocenie kondycji przedsięwzięcia – przy monitorowaniu stanu zaawansowania prac metodą wskaźnikową.

Metoda EVM należy do metod zarządzania przez pomiar wydajności (ang. *Performance Based Project Management*) i stanowi skuteczne narzędzie kontroli projektów w zakresie kosztów, czasu i zakresu wykonanej pracy [13]. Polega na kontroli realizacji projektu przez porównanie wykonanego zakresu prac oraz rzeczywiście poniesionych kosztów z przyjętymi w planie bazowym harmonogramem i budżetem projektu.

W porównaniu z tradycyjną metodą kontroli postępów projektu metoda EVM uwzględnia w ocenie stanu przedsięwzięcia – oprócz kosztów planowanych i rzeczywiście poniesionych – trzeci wymiar: wartość wypracowaną, która przedstawia planowaną wartość rzeczywiście wykonanego zakresu prac. Rozwijając tę metodę, uzyskano możliwości nie tylko pomiaru i oceny rzeczywistego wyniku działalności, opierającego się na danych stwierdzonych w okresach kontrolnych, lecz także analizy trendów wydajności realizacji oraz prognozy przyszłego kosztu działań projektowych i predykcji końcowego budżetu przedsięwzięcia. Odpowiednie wskaźniki pozwalają w każdej fazie realizacji robót ocenić aktualny stan przedsięwzięcia oraz możliwość jego wykonania w ramach planowanego budżetu i harmonogramu. Wskaźniki wykorzystane w metodzie EVM mogą być obliczone zarówno dla pojedynczych zadań, jak i całego projektu, jako tzw. skumulowana wartość wypracowana.

Podstawę metody wartości uzyskanej stanowi wskaźnik wartości wypracowanej (ang. *Budgeted Cost of Work Performed – BCWP*). Pokazuje on, ile zgodnie z planem kosztuje wykonana praca. Chcąc go obliczyć, należy dysponować informacjami o planowanym koszcie prac, jaki należy ponieść do dnia kontroli, oraz o ilości pracy rzeczywiście wykonanej do danego dnia.

Do grupy złożonych wskaźników kontrolnych w metodzie EVM należą [13]:

- wskaźnik wydajności kosztów (ang. *Cost Performance Index – CPI*):

$$CPI = \frac{BCWP}{ACWP} \quad (1)$$

- wskaźnik wykonania harmonogramu (ang. *Schedule Performance Index – SPI*):

$$SPI = \frac{BCWP}{BCWS} \quad (2)$$

gdzie:

BCWS – planowany koszt planowanej pracy do dnia kontroli ilości prac przy danym zadaniu,

ACWP – rzeczywisty koszt wykonanej pracy do dnia kontroli ilości prac przy danym zadaniu,

BCWP – planowany koszt wykonanej pracy do dnia kontroli prac przy tym zadaniu; wartość sprawdzająca, ile, zgodnie z planem, zapłacono za rzeczywiście wykonaną pracę.

Wskaźnik *CPI* przedstawia dotychczasowy stosunek planowanych do rzeczywistych kosztów jednostkowych, a także pozwala skorygować całkowite koszty projektu, przy założeniu stałych stawek cen, które wystąpiły do tej pory.

Metoda wartości uzyskanej dla wielu ośrodków naukowych na świecie stanowi podstawę do szeroko zakrojonych badań nad innowacjami. Pomimo ustawicznie proponowanych udoskonaleń jej wskaźników złożonych (*CPI*, *SPI*) prognozy EVM znajdują się wciąż pod wpływem ryzyka projektowego i niepewności. Prowadzi to do rozbieżności pomiędzy wynikami ostatecznych faktycznych kosztów przedsięwzięć, a ich prognozami przy użyciu tej metody [12].

W pracy [1] zaproponowano uproszczenie metody EVM w kontekście jej wskaźników *CPI* i *SPI*. Technika ta polega na zastąpieniu jej złożonych parametrów kontrolnych współczynnikiem określonym jako „krytyczny stosunek” (*CR: Critical Ratio*) który nazywany był także wskaźnikiem kosztowo-planistycznym (*CSI: Cost-Schedule Index*) [14].

Współczynnik ten obliczany jest następującą zależnością:

$$CR = CPI \cdot SPI \quad (3)$$

Jeśli jeden ze wskaźników ukazuje wartości mniejsze od jedności, sygnalizujące niedoszacowanie lub opóźnienie, drugi z nich winien osiągać poziom powyżej jedności, tak by finalnie *CR* było bliskie jedności. W przypadku gdy obydwa wskaźniki przyjmują niepożądane relacje (*CPI*, *SPI* < 1), współczynnik *CSI* przedstawia ich wypadkową wartość ujmującą jednocześnie obydwa przypadki powstałych odchyłeń. Sytuacja taka wskazuje, iż ogólna wydajność przedsięwzięcia jest słaba.

W pracy tej dokonano także klasyfikacji uzyskanych wyników współczynnika *CR*, podając trzy przedziały otrzymanych wartości (rys. 1).

Szczegółową analizę wskaźnika wykonania harmonogramu *SPI* podjęto w pracach [8], proponując nowe spojrzenie na EVM, oznaczone jako *ES* (*Earned Schedule*).

Podstawowym założeniem metody *ES* jest analiza porównawcza wskaźnika wartości wypracowanej *BCWP* i kosztów planowanych *BCWS*. Wyniki algorytmu stanowią wartości odchyłeń czasowych w poszczególnych momentach trwania przedsięwzięcia *t*, odzwierciedlające okresy, w których miała zachodzić równość: *BCWP* = *BCWS*, określana wskaźnikiem wartości wypracowanej harmonogramu (*ES*). Wskaźnik czasowy metody oblicza się jako:

Rys. 1. Docelowy wykres wydajności na podstawie wskaźnika kosztowo-planistycznego CSI (opis w tekście); źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

$$SPI(t) = \frac{ES}{AT} \quad (4)$$

gdzie:

ES – wskaźnik wartości uzyskanej harmonogramu,

AT – czas, jaki upłynął od rozpoczęcia do momentu rejestracji robot.

Rezultaty badań nad stabilnością wskaźnika $SPI(t)$ przedstawiono na rysunku 2.

Wyniki obrazują analogię w monotoniczności porównywanych wskaźników, z których drugi SPI pokazano w wartościach skumulowanych.

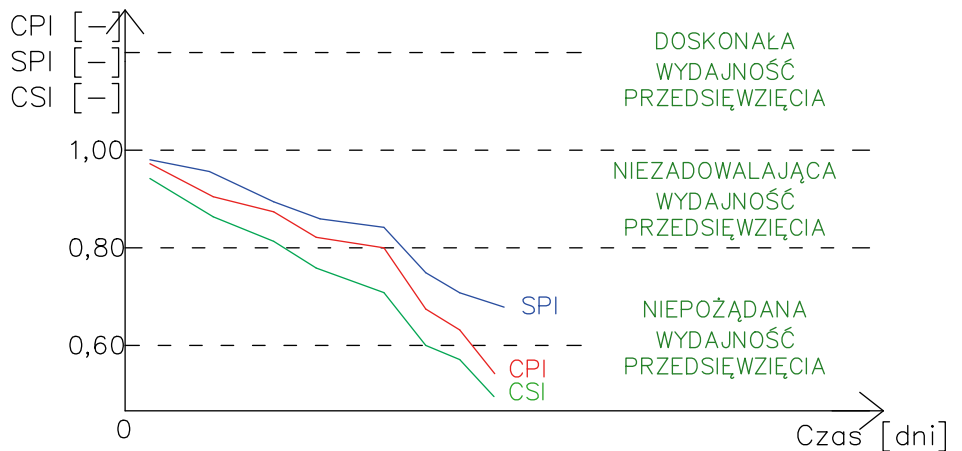
Niestabilność wskaźnika wykonania harmonogramu analizowanego po czasie – $SPI(t)$ w pierwszej fazie przedsięwzięcia (do ok. 20% zaangażowania) wskazuje tu na jedną z wad EVM, określaną jako niestabilność jej wskaźników w początkowej fazie analizy.

W pracy [2] szacując doświadczalnie prognozy ostatecznego kosztu przedsięwzięć (EAC), poszerzono analizę EVM o „Indeks Wydajności Ryzyka” (RPI : Risk Performance Index). Tradycyjne ujęcie EVM skupia swe przewidywania na dwóch parametrach złożonych: wydajności kosztów CPI i wydajności harmonogramu SPI , nie odnosząc się do innych ważnych aspektów. Stworzono więc zintegrowany model, obejmujący trzy identyfikatory jakości realizacji przedsięwzięć: CPI , SPI oraz RPI .

Wyniki badań autorów w sposób oczywisty wpłynęły na poprawę efektywności prognoz, choć w równie oczywisty sposób przyczyniły się do podniesienia puli kosztów planowanych $BCWS$ podrażających przedsięwzięcia budowlane. Autorzy wnioskuje, iż rozbudowanie analizy EVM o wskaźnik RPI w pomiarach kluczowych parametrów przedsięwzięć zapewni zainteresowanym lepsze narzędzie do monitorowania i podejmowania decyzji menedżerskich.

Z kolei w pracy [6] poddając w wątpliwość dokładność szacunków prognozy, stanowiących wynik metody EVM, zmodyfikowano ją o dodatkowy parametr: wskaźnik prognozy harmonogramu (SFI : Schedule Forecast Indicator). Rolą tego wskaźnika jest wspieranie

Rys. 2. Różnica pomiędzy wskaźnikami SPI (EVM) oraz $SPI(t)$ (ES) (opis w tekście); źródło: opracowanie własne na podstawie [8]



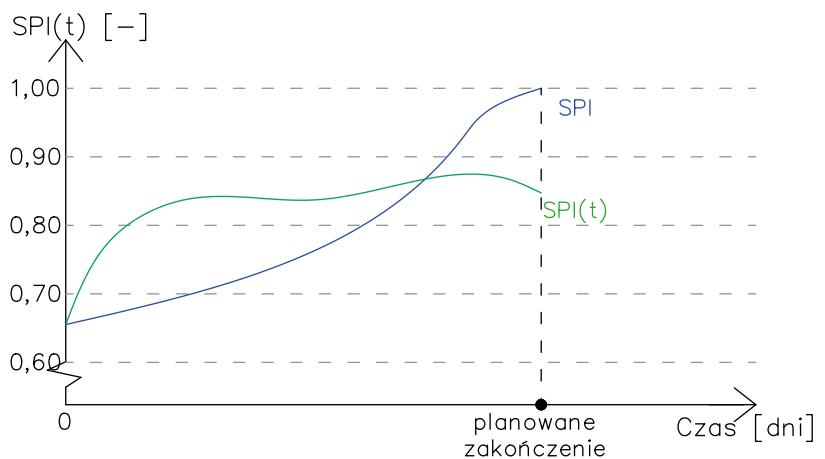
decyzji zarządczych dotyczących przedsięwzięcia na poziomie strategicznym.

Odmienne podejście do monitorowania produkcji zaproponowano w pracy [10] w metodzie EDM (*Earned Duration Management*). Rolą tej techniki jest zastąpienie jednego z narzędzi metody EVM, wskaźnika wykonania harmonogramu SPI własnym indeksem EDI (*Earned Duration Index*), w postaci funkcji wykładniczej z argumentem czasowym. Wskaźnik ten pozwala na ocenę tempa prac w dowolnym momencie czasowym harmonogramu.

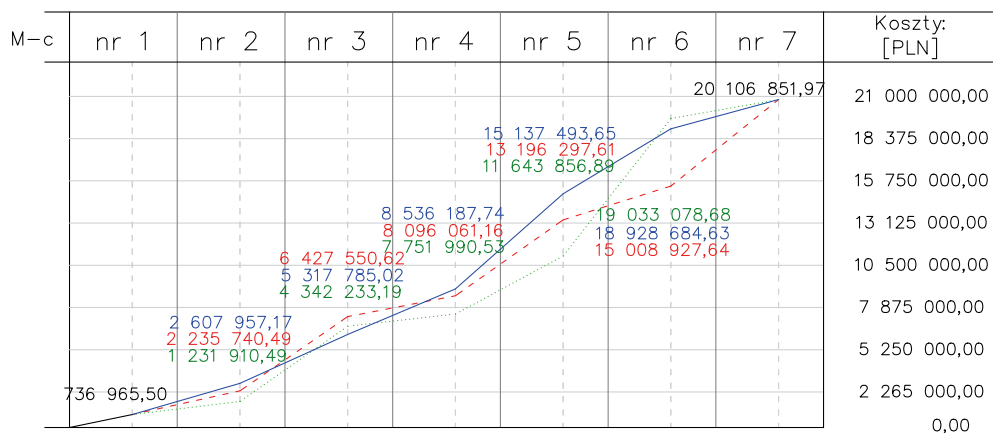
W odniesieniu do analizowanych wskaźników CPI oraz SPI , w pracy [9] zwrócono uwagę na konieczność włączenia do analizy EVM wpływu wartości pieniądza w czasie, zwłaszcza w przypadku przedsięwzięć długoterminowych oraz zdyskontowanych przepływów pieniężnych. Autorzy zaproponowali implementację w EVM tzw. wskaźnika wariacji inflacji (IV : *Inflation Variance*), uwzględniającego oddziaływanie przeszacowania inflacyjnego budżetów kosztorysowych.

W pracy [4] zaproponowano rozbudowanie EVM o trzy dodatkowe parametry: wskaźnik wczesnego początku (ESR : *Early Start Rate*), wskaźnik wczesnego ukończenia (ECR : *Early Completion Rate*) oraz ocenę przekroczenia kosztu (COR : *Cost Overrun Rate*).

Analizę wskaźników złożonych EVM prowadzono też w pracy [5], zauważając, że monitorowanie przedsięwzięcia i związany



Rys. 3. Skumulowane wartości kosztów planowanych (BCWS) harmonogramów – w metodach realizacji według: równomiernego (wykres kropkowy), równoległego (wykres ciągły), kolejnego (wykres przerywany) wykonania robót [11]



z nim proces decyzyjny, dotyczący wprowadzenia działań naprawczych, stanowią istotny składnik wspomaganie decyzji kontrolnych.

Dlatego też zaproponowano innowacyjny wielowymiarowy wskaźnik kontroli harmonogramu *SPE*, umożliwiający monitorowanie dynamiki zmian w realizacji przedsięwzięcia.

Reasumując, metoda wartości uzyskanej, od czasu wdrożenia jej do praktyki zarządzania przedsięwzięciami poddawana była wielu modyfikacjom. Równocześnie podlegała też ustawicznej krytyce, dotyczącej efektywności działania jej wskaźników. Choć ciągła obecność tego algorytmu w badaniach poświadcza fakt, iż jest nadal aktualnym i popularnym narzędziem pomiaru wydajności czasu i kosztów przedsięwzięć na całym świecie.

2. Monitoring C-S i S-C

Na bazie złożonych wskaźników metody EVM proponuje się rozwiniętą analizę czasowo-kosztową, badającą wpływ czasu realizacji przedsięwzięcia na ponoszone koszty, oraz kosztów na planowany czas – poprzez stosunek powyższych miar efektywności realizacji harmonogramu. Wprowadzono następujące parametry oceny wskaźników [11]:

- wskaźnik monitoringu tempa narastania kosztów (C-S):

$$C - S = \frac{CPI}{SPI} = \frac{BCWP}{ACWP} = \frac{BCWP}{ACWP} \cdot \frac{BCWS}{BCWP} = \frac{BCWS}{ACWP} \quad (5)$$

- wskaźnik monitoringu wydajności robót w kontekście ponoszonych kosztów (S-C):

$$S - C = \frac{SPI}{CPI} = \frac{BCWS}{ACWP} = \frac{BCWP}{ACWP} \cdot \frac{ACWP}{BCWS} = \frac{ACWP}{BCWS} \quad (6)$$

Monitoring tempa narastania kosztów (wzór 5) polega na analizie monotoniczności wskaźnika wydajności kosztów *CPI* w trakcie realizacji zadań harmonogramu, przy uwzględnieniu faktycznej wydajności prac *SPI*.

Podobnie w przypadku monitoringu wydajności robót w kontekście ponoszonych kosztów (wzór 6). Analiza

monotoniczności wskaźnika wydajności tempa prac *SPI* z uwzględnieniem wielkości wskaźnika wydajności kosztów *CPI* pozwala na ocenę szybkości realizacji harmonogramu z zachowaniem miary kosztów.

3. Zastosowanie inżynierskie

3.1. Opis badanego harmonogramu

Do przeprowadzenia analizy odchyień czasowych i kosztowych posłużono się harmonogramem rzeczowo-finansowym zrealizowanego przedsięwzięcia budowlanego, polegającego na budowie osiedla wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej, zaplanowanego na okres siedmiu miesięcy, z budżetem o wartości ponad dwudziestu milionów złotych.

Alokację środków produkcji zaplanowano za pomocą trzech podstawowych struktur realizacji przedsięwzięć – metody równomiernego, równoległego i kolejnego wykonania. Uzyskane trzy scenariusze realizacji robót przedstawiono na rysunku 3.

3.2. Zastosowanie monitoringu C-S i S-C

Monitoring C-S i S-C odchyień, powstających w trakcie realizacji robót objętych harmonogramem, podzielono na trzy scenariusze jego wykonania, według przyjętych powyżej metod.

Przyjęte modele obliczeniowe charakteryzuje dziesięcioprocentowy wzrost budżetu kosztów (C(1, 2, 3, 4) = 110, 120, 130, 140%) oraz odpowiednio pięcioprocentowy wzrost czasu realizacji robót (S(1, 2, 3, 4) = 105, 110, 115, 120%). Modele te opisano symbolami A1B1–A4B4, wskazującymi przyrost odchyień [11].

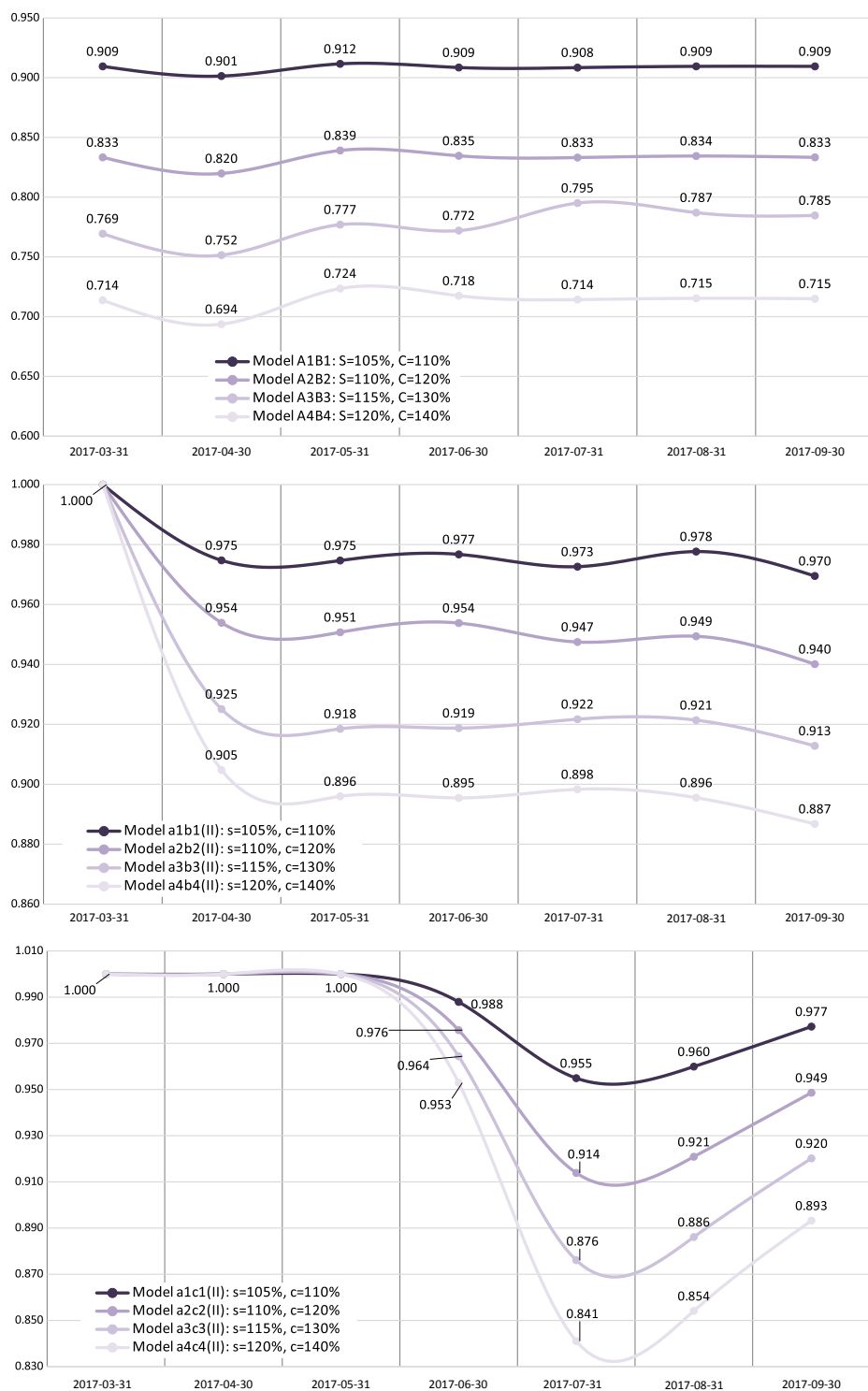
W metodzie równomiernego wykonania założono globalny (całościowy) wpływ odchyień A, B – na wszystkie procesy harmonogramu. W metodach równoległego i kolejnego wykonania przyjęto lokalny (częściowy) wpływ odchyień (a, b) – na wybrane ciągi procesów.

Wynika to z oczywistej charakterystyki tych metod, szeroko opisaną w literaturze (opóźnienia analizowanych ciągów procesów nie zawsze mają wpływ na opóźnienia ich następników).

Tabela 1. Modele harmonogramów według przyjętej struktury realizacji robót [11]

Etap rejestracji/ Scenariusz odchyień	Metoda równomiernego wykonania				Metoda równoległego wykonania				Metoda kolejnego wykonania			
	Model A1B1: S=105%, C=110%				Model a1b1(II): s=105%, c=110%				Model a1c1(II): s=105%, c=110%			
	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C
31.03.2017	0,864	0,950	0,909	1,100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30.04.2017	0,850	0,943	0,901	1,109	0,964	0,989	0,957	1,026	1,000	1,000	1,000	1,000
31.05.2017	0,866	0,950	0,912	1,097	0,962	0,987	0,975	1,026	1,000	1,000	1,000	1,000
30.06.2017	0,864	0,951	0,909	1,101	0,965	0,988	0,977	1,024	0,982	0,994	0,988	1,012
31.07.2017	0,863	0,950	0,908	1,101	0,959	0,986	0,973	1,028	0,932	0,976	0,955	1,047
31.08.2017	0,864	0,950	0,909	1,100	0,963	0,985	0,978	1,023	0,934	0,973	0,960	1,042
30.09.2017	0,864	0,950	0,909	1,100	0,954	0,984	0,970	1,031	0,945	0,967	0,977	1,023
Etap rejestracji/Scenariusz odchyień	Model A2B2: S=110%, C=120%				Model a2b2(II): s=110%, c=120%				Model a2c2(II): s=110%, c=120%			
	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C
31.03.2017	0,750	0,900	0,833	1,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30.04.2017	0,728	0,888	0,820	1,220	0,931	0,976	0,954	1,048	1,000	1,000	1,000	1,000
31.05.2017	0,756	0,901	0,839	1,192	0,926	0,974	0,951	1,052	1,000	1,000	1,000	1,000
30.06.2017	0,752	0,901	0,835	1,198	0,929	0,974	0,954	1,048	0,964	0,988	0,976	1,025
31.07.2017	0,749	0,899	0,833	1,200	0,920	0,971	0,947	1,055	0,870	0,952	0,914	1,094
31.08.2017	0,751	0,900	0,834	1,198	0,919	0,968	0,949	1,053	0,873	0,948	0,921	1,086
30.09.2017	0,750	0,900	0,833	1,200	0,910	0,968	0,940	1,064	0,886	0,934	0,949	1,054
Etap rejestracji/Scenariusz odchyień	Model A3B3: S=115%, C=130%				Model a3b3(II): s=115%, c=130%				Model a3c3(II): s=115%, c=130%			
	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C
31.03.2017	0,654	0,850	0,769	1,300	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30.04.2017	0,626	0,833	0,752	1,331	0,889	0,961	0,925	1,081	1,000	1,000	1,000	1,000
31.05.2017	0,662	0,852	0,777	1,287	0,879	0,957	0,918	1,089	1,000	1,000	1,000	1,000
30.06.2017	0,657	0,851	0,772	1,295	0,882	0,960	0,919	1,088	0,947	0,982	0,964	1,037
31.07.2017	0,675	0,849	0,795	1,258	0,883	0,958	0,922	1,085	0,813	0,928	0,876	1,141
31.08.2017	0,669	0,850	0,787	1,271	0,879	0,954	0,921	1,085	0,817	0,922	0,886	1,129
30.09.2017	0,667	0,850	0,785	1,274	0,869	0,952	0,913	1,096	0,830	0,902	0,920	1,087
Etap rejestracji/Scenariusz odchyień	Model A4B4: S=120%, C=140%				Model a4b4(II): s=120%, c=140%				Model a4c4(II): s=120%, c=140%			
	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C	CPI	SPI	C-S	S-C
31.03.2017	0,571	0,800	0,714	1,401	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30.04.2017	0,539	0,777	0,694	1,442	0,855	0,945	0,905	1,105	1,000	1,000	1,000	1,000
31.05.2017	0,581	0,803	0,724	1,382	0,844	0,942	0,896	1,116	1,000	1,000	1,000	1,000
30.06.2017	0,574	0,800	0,718	1,394	0,848	0,947	0,895	1,117	0,930	0,976	0,953	1,049
31.07.2017	0,570	0,798	0,714	1,400	0,848	0,944	0,898	1,113	0,762	0,906	0,841	1,189
31.08.2017	0,573	0,801	0,715	1,398	0,840	0,938	0,896	1,117	0,767	0,898	0,854	1,171
30.09.2017	0,572	0,800	0,715	1,399	0,830	0,936	0,887	1,128	0,778	0,871	0,893	1,120

Rys. 4. Wykresy wskaźnika monitoringu tempa narastania kosztów (C-S) w modelach ze stopniowo wzrastającym odchyleniem czasowym i kosztowym – w metodach realizacji według (od góry): równomiernego, równoległego, kolejnego wykonania robót [11]



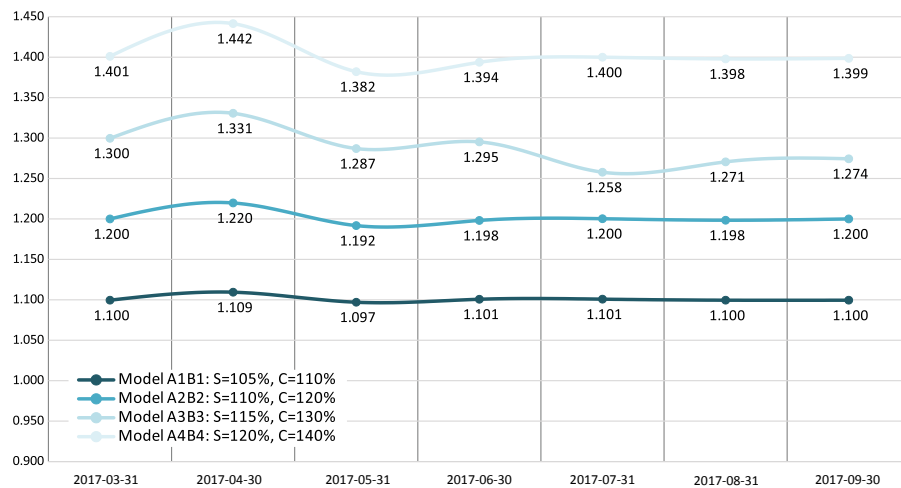
Analiza tempa narastania nieplanowanych kosztów i odbiegającej od planu wydajności robót polega na stopniowym narastaniu wydatków na produkcję C, z jednoczesnym systematycznym obniżaniem tempa tej produkcji S. Zjawiska te znajdują odzwierciedlenie w obniżeniu wartości złożonych wskaźników metody wartości uzyskanej: wskaźnika wykonania kosztów *CPI* i wskaźnika wykonania harmonogramu *SPI*, które determinują monotoniczność wskaźników monitoringu C-S oraz S-C. Wyniki analizy, z opisem wprowadzonych zakłóceń czasowych i kosztowych oraz podziałem na cztery scenariusze odchylenia, przedstawiono w tabeli 1.

Obraz powstających zakłóceń przedstawiono na rysunkach 4 (wskaźnik tempa narastania kosztów C-S) i 5 (wskaźnik wydajności robót w kontekście ponoszonych kosztów S-C).

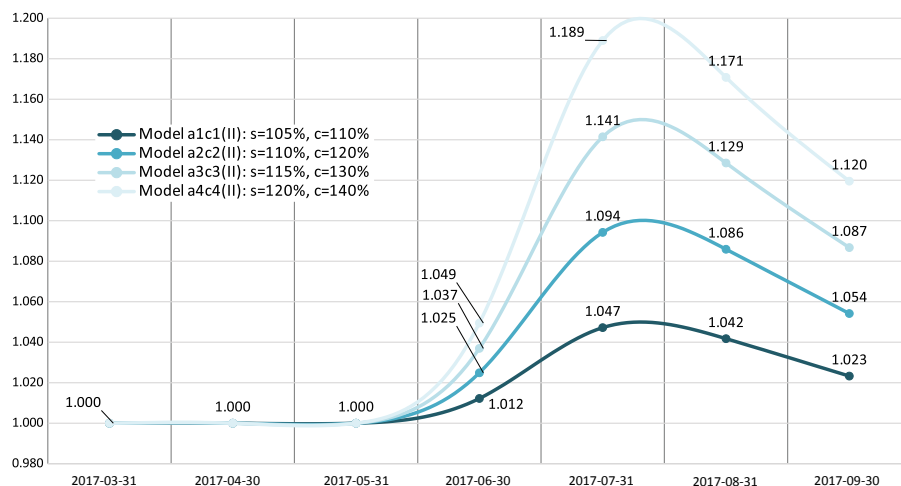
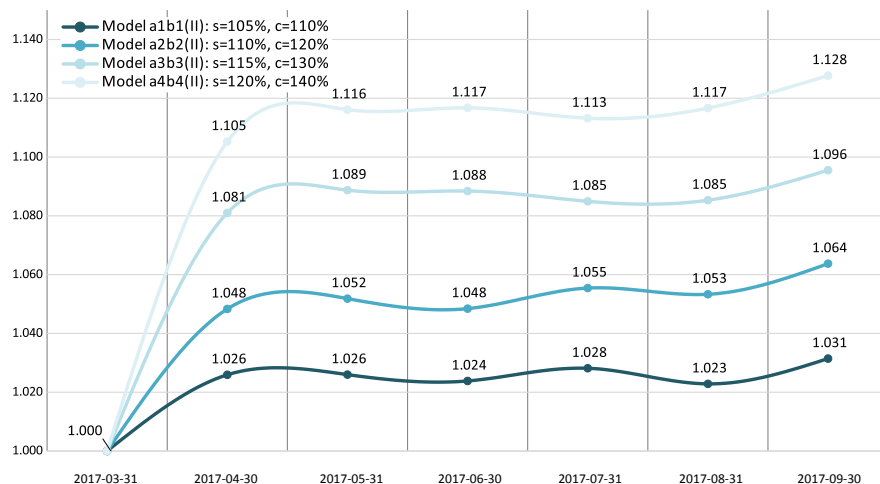
Monitoring C-S

Wskaźnik monitoringu tempa narastania kosztów C-S (rys. 4) w metodzie równomiernego wykonania obrazuje wykresy w postaci czasowego przebiegu czterech scenariuszy opóźnień harmonogramu. Ich położenie uzależnione jest od wielkości zakłóceń.

Ze względu na sposób oddziaływania zakłóceń, obejmujących cały harmonogram, funkcje opisujące dane scenariusze przyjmują bliskie sobie wartości koniecznego spadku tempa narastania kosztów w kolejnych etapach rejestracji



Rys. 5. Wykresy wskaźnika monitoringu wydajności robót w kontekście ponoszonych kosztów (S-C) w modelach ze stopniowo wzrastającym odchyleniem czasowym i kosztowym – w strukturach realizacji według (od góry): równomiernego, równoległego, kolejnego wykonania robót [11]



– w przedziale od 9% dla modeli A1B1 do 28% dla A4B4. Monitoring tempa narastania kosztów C-S w metodzie równoległego wykonania przedstawia, zgodnie z założeniem, planowy przebieg robót w pierwszym miesiącu. Począwszy od drugiego etapu kontrolnego do ostatniego, obraz prędkości narastania kosztów obrazuje pulę planowanych budżetów miesięcznych na tle kosztów ponoszonych, które winny zostać do niej obniżone, by przedsięwzięcie mogło zakończyć się oczekiwanym wynikiem ekonomicznym. Monitoring wykazuje wymagane 3–4% zwolnienie

tempa wzrostu kosztów, dla zamknięcia kontraktu w jego budżecie początkowym. Załamanie wykresu funkcji w piątym etapie rejestracji robót odzwierciedla planowany, najwyższy przerób miesięczny. Monitoring tempa narastania kosztów w metodzie kolejnego wykonania, obrazuje planowy przebieg robót w trzech pierwszych etapach rejestracji ich postępu. Po rozpoczęciu prac w czwartym miesiącu budowy, tempo wydatków winno zostać ograniczone, w zależności od scenariusza przekroczenia kosztów (1, 2, 3, 4) do poziomu z przedziału

95,3–98,8% – by zmieścić budżet w planowanym przerobie tego okresu. W piątym etapie rejestracji, kończącym ciąg czynności poddany lokalnym odchyleniom, wartości funkcji modelowanych scenariuszy spadają do wymaganych poziomów 84,1–95,5%. W szóstym i siódmym etapie kontrolnym, dotyczącym robót nie poddanych odchyleniom, monitoring C-S rozkłada narosłe straty finansowe.

Monitoring S-C

Wskaźnik monitoringu wydajności robót S-C w kontekście ponoszonych kosztów (rys. 5) rejestruje odwrotne postaci analizy, w porównaniu z monitoringiem C-S.

Dla metody równomiernego wykonania odnotowano, w skoku dziesięcioprocentowym, zwwyżki faktycznych kosztów ACWP w stosunku do harmonogramu BCWS. Sygnalizują one zarządzającemu harmonogramem, na jakim poziomie – w zależności od występującego scenariusza (1, 2, 3, 4) – winna plasować się rzeczywista wydajność robót w poszczególnych okresach – by kontrakt mógł zostać zrealizowany w planowanym budżecie.

Analiza wskaźnika monitoringu wydajności robót S-C w metodzie równoległego wykonania przedstawia zbiór scenariuszy tempa prac, wskazując prawidłową ich wydajność, przy różnych wartościach procentowych zakłóceń, która pozwala na terminowe zakończenie.

Wyniki obrazują tu kumulujące się nadwyżki kosztów poniesionych ACWP w stosunku do planowanych BCWS. Analiza wskaźnika S-C wskazuje konieczne przyspieszenia robót w danych okresach, przywracające terminowość całego przedsięwzięcia.

Wskaźnik monitoringu, analizujący wydajność robót w kontekście ponoszonych kosztów S-C dla metody kolejnego wykonania przedstawia, podobnie jak w dwóch wcześniejszych metodach, odwrotnie proporcjonalne wartości do analizy C-S. Wskazują one wymagany (w ujęciu procentowym) stopień zwiększenia wydajności robót dla poszczególnych poziomów modelowanych parametrów (1, 2, 3, 4), jaki winien być zrealizowany w stosunku do planu. Wówczas przedsięwzięcie nie przyniesie ujemnego wyniku ekonomicznego.

Spadek wartości zbioru funkcji S-C następuje, zgodnie z występowaniem zakłóceń czasowych i kosztowych, w czwartym etapie rejestracji (1,2–4,9%), jego wartości maksymalne – w piątym etapie (4,7–18,9%), po czym maleje, lecz nie do jedności. Świadczy to o wpływie cząstkowych przekroczeń budżetu na jego wartość całkowitą.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty miały na celu próbę implementacji skonstruowanych narzędzi C-S i S-C, bazujących na wskaźnikach CPI oraz SPI metody wartości uzyskanej, w harmonogramie utworzonym w oparciu o trzy klasyczne struktury realizacyjne przedsięwzięć budowlanych.

Analiza przedstawionych wyników testowych obrazuje wymagane spowolnienie szybkości wzrostu kosztów w danych okresach C-S, by badane przedsięwzięcie mogło zostać zakończone w planowanym budżecie finansowym (BCWS).

Z kolei rozwiązania wskaźnika monitoringu wydajności robót w kontekście ponoszonych kosztów S-C sygnalizują jednostce sterującej realizowanym harmonogramem, jak wzorcowo winno plasować się tempo robót, by analizowany kontrakt mógł zostać zamknięty w nałożonym terminie dyrektywnym.

W pierwszym przypadku monitoring generował wartości mniejsze lub równe jedności. W drugim natomiast otrzymano wyniki większe lub równe jedności.

Warto zwrócić uwagę, że skonstruowana metoda wskaźnikowa może zostać również wykorzystana przy monitoringu scenariuszy odwrotnych do zamodelowanych, tak w ujęciu globalnych, jak i lokalnych oddziaływać: przeszacowania procesów na etapie wyceny przedsięwzięcia lub nieplanowanego przyspieszenia prac w stosunku do harmonogramu. W tym przypadku rozwiązania dadzą przeciwne relacje powyższych nierówności.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anbari T., Earned Value project method and extensions, *Project Management Journal* 12/2003
- [2] Babar S., Thaheem M. J., Ayub B., Estimated cost at completion: integrating risk into EVM, *Journal of Construction Engineering and Management*, tom 143, 3/2017
- [3] Barr Z., Earned Value analysis: a case study, *P. M. Network*, X (12), maj 1996, str. 31–37
- [4] Chen Q., Jin Z., Xia B., Skitmore M., Time and cost performance of design build projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 142(2), luty 2016, str. 162–169
- [5] Colin J., Martens A., Vanhoucke M., Wauters M., A multivariate approach for top-down project control using earned value management, *Decision Support Systems* tom 79, listopad 2015, str. 65–76
- [6] Czemplik A., Application of Earned Value Method to Progress control of construction projects. XXIII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (23RSP) *Procedia Engineering*, 91(2014), maj 2014, str. 424–428
- [7] Czyżewski A., Analiza ekonomiczna w realizacji projektów inwestycyjnych, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, 2011
- [8] De Koning P., Vanhoucke M., Stability of earned value management: Do project characteristics influence the stability moment of the cost and schedule performance index, *Journal of Modern Project Management* 4(1), sierpień 2016, str. 8–25
- [9] Farid F., Karshenas S., Cost/Schedule control systems criteria under inflation, *Project Management Journal*, XIX (5), listopad 1998, str. 23–29
- [10] Khamooshi H., Abdi A., Project duration forecasting using Earned duration management with exponential techniques, *Journal of Management in Engineering*, tom 33, 1/2017
- [11] Przywara D., Analiza czasowo-kosztowa w monitoringu robót harmonogramu budowlanego. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska w Opolu, 2019
- [12] Przywara D., Rak A., Ocena odchyżeń czasowych i kosztowych za pomocą metody wartości uzyskanej, *Materiały Budowlane* 6/2016, str. 29–31
- [13] Trocki M., Nowoczesne zarządzanie projektami, Warszawa, Wydawnictwo P.W.E., 2012
- [14] Vanhoucke M., Vereecke A., Gemmel P., The project scheduling game (PSG): simulating time/cost trade-offs in projects, *Project Management Journal*, 36(1)2005, str. 51–59