

Phd.D. Eng. Daniel Przywara¹⁾

ORCID: 0000-0002-1722-6140

Sensitivity of the earned value indicator in the EVM analysis in various methods of organizing works

Wrażliwość wskaźnika wartości wypracowanej w analizie EVM w różnych metodach organizacji robót

DOI: 10.15199/33.2024.09.09

Abstract. Management of construction projects at a strategic level requires managers of the managerial degree to adopt an appropriate structure for their implementation. The choice of the method of execution of the works is determined by many factors, among others the deadline for their completion and the availability of the means of production. These factors are directly reflected in the monotonicity of the basic indicators of the earned value method, used to assess the progress of works implementation, in selected periods of their control. The article attempts to analyze the sensitivity of the Earned Value Indicator (BCWP – *Budget Cost of Work Performed*) in the EVM method, depending on the adopted structure of implementation of a construction project, using the original concept of monitoring deviations from the assumed duration. In the study of the degree of sensitivity of the analyzed indicator, an example of construction of a multi-family housing development was used.

Keywords: earned value method; time-cost deviation; schedule.

Streszczenie. Zarządzanie przedsięwzięciami budowlanymi na poziomie strategicznym wymaga od decydentów stopnia menedżerskiego przyjęcia odpowiedniej metody ich realizacji. Wybór tej metody determinowany jest wieloma czynnikami, m.in. terminem dyrektywnym zakończenia robót oraz dostępnością środków produkcji. Czynniki te znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w monotoniczności podstawowych wskaźników metody wartości wypracowanej, służącej ocenie postępu realizacji robót w wybranych okresach ich kontroli. W artykule podjęto próbę analizy wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej (BCWP – *Budget Cost of Work Performed*) w metodzie EVM, w zależności od przyjętej struktury realizacji przedsięwzięcia budowlanego, przy użyciu autorskiej koncepcji monitoringu odchyłeń od założonego czasu jego trwania. W badaniu stopnia wrażliwości analizowanego wskaźnika posłużono się przykładem budowy osiedla wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej.

Słowa kluczowe: metoda EVM; monitoring realizacji robót; wskaźnik wartości wypracowanej.

It is a very complex issue to search for the scenario of the project implementation, favorable for the contractor from the point of view of implementation costs [1, 2, 3]. In practice, this problem is solved on the basis of a simplified cost accounting, taking into account only cost characteristics, determined by costing analyzes. They are supposed to be used to evaluate organizational solutions and not to evaluate the financial results of the company's operations.

Earned Value Management consists in controlling the implementation of the project by comparing the scope of works completed to date and the dates of their implementation and the actual costs incurred with those assumed in the schedule. This method belongs to management methods by measuring performance (*performance based project management*) and is an effective control tool in terms of costs, time and scope of work performed [4]. Depending on the data obtained at individual stages of the project, management at the managerial level, analyzing the results obtained using this method, has the ability to take remedial measures to improve the current progress of works at the construction site. The essence of the earned value method is shown in Figure 1.

Poszukiwanie scenariusza realizacji przedsięwzięcia, korzystnego dla wykonawcy z punktu widzenia kosztów realizacji, jest zagadnieniem złożonym [1 ÷ 3]. Problem ten w praktyce jest rozwiązywany na bazie uproszczonego rachunku kosztów, uwzględniającego jedynie charakterystyki kosztowe, określane przez analizy kosztorysowe. Mają one bowiem służyć wartościowaniu rozwiązań organizacyjnych, a nie ocenie finansowych wyników działalności firmy.

Metoda Earned Value Management (EVM) polega na kontroli realizacji przedsięwzięcia przez porównanie wykonanego do danej chwili zakresu prac i terminów ich przeprowadzenia, oraz rzeczywiście poniesionych kosztów z przyjętymi w harmonogramie. Jest to metoda zarządzania przez pomiar wydajności (ang. *performance based project management*) i stanowi skuteczne narzędzie kontroli kosztów, czasu i zakresu wykonanej pracy [4]. W zależności od uzyskiwanych danych na poszczególnych etapach przedsięwzięcia, kierownictwo szczebla menedżerskiego, analizując otrzymane wyniki tej metody, może podejmować środki zaradcze, usprawniające bieżący przebieg robót na placu budowy. Istotę metody wartości uzyskanej przedstawiono na rysunku 1.

Krzywa ilustrująca przebieg BCWS planowanego kosztu planowanej pracy (koszty planowane) wyznaczana jest podczas fazy planowania przedsięwzięcia. Jej końcową warto-

¹⁾ Opole University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering and Construction Processes; d.przywara@po.edu.pl

The curve illustrating the course of BCWS – „Budgeted Cost of Work Scheduled” is determined during the project planning phase, its final value is BAC – „Budget At Completion” [5]. The curves illustrating the course of BCWP – „Budgeted Cost of Work Performed” (earned value) and ACWP – „Actual Cost of Work Performed” (costs incurred), are determined during the implementation of the works and can be determined only until the date of inspection. Data from the BCWS, BCWP, ACWP curves are the basis for calculating further indicators.

The element that distinguishes EVM from other control techniques is the third dimension of its analysis, expressed in its basic BCWP indicator. This indicator combines a quantitative assessment of the progress of works in EVM against the background of their actual performance and costs incurred. In such an analysis it can also be used as a final forecast describing the „planned cost of work done” on the last day of the project.

Existing state of research

The course of the curves in Fig. 1 also allows to see the variances from the budget and the schedule: both on the day of the inspection and forecast values on the day of completing the project. In the study [6] a different approach was proposed to the final forecasts in the earned value method, related to the project costs. It applies to its end time (EAC), the required pool of costs up to this point, calculated at any duration (ETC), and variance at completion (VAC). The time parameter in these forecasts was analyzed here, modeling the time value at the time of completion of the project (TEAC: *Time Estimate at Completion*), the required time to completion, calculated for any value (TETC: *Time Estimate to Complete*), and the variance of time at completion (TVAC: *Time Variance at Completion*). These values were determined on the basis of the planned completion time of the work schedule (SAC: *baseline Schedule at Completion*). A distinction was also made in the context of the approach to monitoring works, assuming the occurrence of a number of scenarios. A simplification of the EVM method was proposed in the context of its CPI and SPI indicators. This technique consists in replacing its complex control parameters with a factor defined as Critical Ratio (CR) which was also called the Cost-Schedule Index (CSI). If one of the indicators shows values smaller than one, signaling an underestimation or delay, the other one should reach a level above one, so that finally CR is close to one. In the case when both indicators assume undesirable relations ($CPI, SPI < 1$), the CSI coefficient represents their resultant value capturing both cases of the resulting variances simultaneously. This situation indicates that, the overall performance of the project is poor.

With reference to the above research, in the study [3, 5] the need to include in the EVM analysis the impact of time value

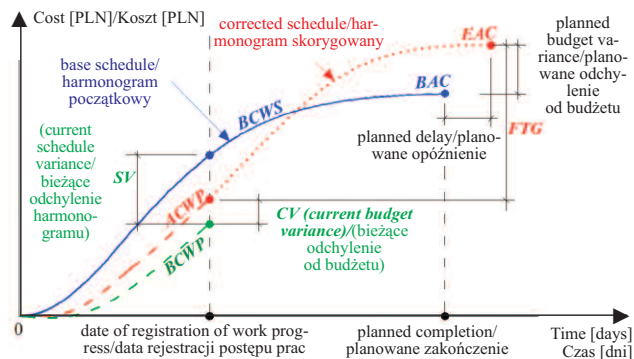


Fig. 1. Elements of EVM method (description in text)

Rys. 1. Elementy metody EVM (opis w tekście)

Fig. [3]

Rys. [3]

ścią jest BAC – planowany budżet przedsięwzięcia [5]. Krzywe ilustrujące przebieg BCWP – planowanego kosztu wykonanej pracy (wartość wypracowana) oraz ACWP – rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (koszty poniesione), wyznaczane są podczas realizacji robót i mogą zostać ustalone jedynie do dnia kontroli. Dane z krzywych BCWS, BCWP, ACWP są podstawą do obliczenia dalszych wskaźników.

Elementem odróżniającym metodę EVM od innych technik kontrolnych jest trzeci wymiar jej analizy, wyrażony w podstawowym wskaźniku BCWP. Wskaźnik ten łączy ilościową ocenę postępu robót w EVM na tle ich faktycznej wydajności i poniesionych kosztów. W takiej analizie może także służyć jako prognoza końcowa, opisująca „planowany koszt wykonanej pracy” w ostatnim dniu trwania przedsięwzięcia.

Stan badań

Analizując rysunek 1, można zapoznać się z odchyleniami od budżetu i harmonogramu zarówno w dniu kontroli, jak również wartościami prognozowanymi w dniu zakończenia przedsięwzięcia. W pracy [6] zaproponowano odmienne podejście do prognoz końcowych w metodzie EVM, odniesione do rachunku kosztów przedsięwzięcia. Dotyczy ono chwili jego zakończenia (EAC), wymaganej puli kosztów do tego momentu, liczonej w dowolnym czasie trwania (ETC), oraz wariacji na ukończeniu (VAC). Analizie poddano parametr czasowy w tych prognozach, modelując odpowiednio wartość czasu w momencie zakończenia przedsięwzięcia (TEAC: *Time Estimate at Completion*), wymagany okres do zakończenia, liczony przy dowolnej wartości t (TETC: *Time Estimate to Complete*) oraz wariację czasu na ukończeniu (TVAC: *Time Variance at Completion*). Wielkości te wyznaczano na podstawie planowanego czasu zakończenia harmonogramu robót (SAC: *baseline Schedule at Completion*). W ramach monitoringu robót założono wystąpienie wielu scenariuszy. Zaproponowano uproszczenie metody EVM polegające na zastąpieniu jej złożonych parametrów kontrolnych współczynnikiem określonym jako „krytyczny stosunek” (CR: *Critical Ratio*). Jeśli jeden z jej wskaźników (CPI, SPI) ma wartości mniejsze od jedności, sygnalizujące niedoszacowanie lub opóźnienie, drugi z nich powinien osiągać poziom powyżej jedności, aby finalnie krytyczny stosunek CR był bliski jedności. W przypadku, gdy wskaźniki CPI, SPI są mniejsze od 1, to współczynnik CSI przedstawia ich wypadkową wartość ujmującą jednocześnie oba przypadki powstałych odchyżeń. Sytuacja taka wskazuje, iż ogólna wydajność przedsięwzięcia jest słaba.

W odniesieniu do opisanych badań, w pracach [3, 5] zwrócono uwagę na konieczność włączenia do analizy EVM wpływu wartości pieniądza w czasie, szczególnie w przypadku

of money, especially in the case of long-term ventures and discounted cash flows, was highlighted. The authors proposed the implementation of the so-called inflation variance index (*IV: Inflation Variance*), taking into account the impact of the inflation revaluation of cost budgets. Another type of classification of EVM prognostic indicators was proposed in the study [8] – introducing their diverse forms depending on the scenarios of the works implementation (optimistic, pessimistic and realistic). Among the weaknesses of the common algorithmic design of Earned Value Management is the failure of its indicators is mentioned. It has been proved that, they do not describe the quality of implemented processes, but only the conversion efficiency, i.e. how much was achieved from what was planned, and how much time and quantity of production remained to be analyzed to continue analyzing the project as not delayed. In addition, the method's incompatibility in the early stages of work progress during the first stages of project registration was also pointed out.

A detailed analysis of the time variance of the schedule was undertaken in the study [9 ÷ 11], proposing a new look at the EVM method, marked as ES (*Earned Schedule*). The basic assumption is a **comparative analysis of the earned value ratio BCWP and the planned costs BCWS**. The algorithm results are the values of time variances at individual moments of the project (t), reflecting the periods in which the equality was to take place: $BCWP = BCWS$, determined with the indicator of the earned schedule value (ES). In turn, in the study [12], the EVM analysis was extended to include „qualitative” indicators, proposing a qualitative technique in this method – (QEV: *Quality Earned Value*). For this purpose, quality assessment parameters (QR: *Quality Requirements*) have been introduced. The methodology for calculating the QEV assumes formulas for assessing the quality of its components. Its purpose is to measure the project's ability to provide the assumed qualitative levels of the indicated tasks of the examined schedule. An additional research objective was an attempt to link the quality management process with monitoring of works progress. Data was collected on the day each schedule task was completed. The results prove that, taking into account the parameter of assumed quality levels reduces the projected earned value of the project.

In the study [13], in order to increase the accuracy of early forecasting of the Estimated At Completion (EAC) project cost of the EVM method, its analysis was extended with the introduction of an innovative parameter of estimation of non-linear final cost regression (CEAC: *nonlinear Cost Estimate at Completion*). The methodology introduces the concept of „interim schedule” (ES: *Earned Schedule*) and ensures that, the CEAC indicator is determined at each stage of project implementation. In the course of the algorithm implementation tests, the equations of time and cost models (logistic, Gompertz, Bass, Weibull) are built, followed by the selection of one that best describes the implementation of the project, which is determined by the CEAC level. The proposed methodology allows to determine in a more realistic way the parameter sought for the final cost of the project, by creating a wider field of analysis taking into account extensive mathematical models.

przedsięwzięć długoterminowych. Autorzy zaproponowali implementację w tej metodzie tzw. **wskaźnika wariacji inflacji IV** (*Inflation Variance*), uwzględniającego oddziaływanie przeszacowania inflacyjnego budżetów kosztorysowych. Inny rodzaj klasyfikacji wskaźników prognostycznych EVM zaproponowano w pracy [8], wprowadzając ich zróżnicowane postacie uzależnione od scenariuszy przebiegu realizacji robót (optymistyczny, pesymistyczny i realistyczny). Wśród słabych stron powszechnej konstrukcji algorytmicznej Earned Value Management wymieniono niewydolność jej wskaźników. Dowiedziono, że nie opisują jakości realizowanych procesów, a jedynie wydajność konwersji, czyli ile osiągnięto z tego, co zostało zaplanowane oraz ile pozostało czasu i produkcji do wykonania, by nadal analizować przedsięwzięcie jako nieopóźnione. Ponadto wskazano na niekompatybilność metody we wczesnych stadiach zaawansowania prac, tzn. podczas pierwszych etapów rejestracji przedsięwzięcia.

Szczegółową analizę odchylenia czasowego harmonogramu podjęto w pracach [9 ÷ 11], proponując nowe spojrzenie na metodę EVM, oznaczone jako ES (*Earned Schedule*). Podstawowym założeniem jest **analiza porównawcza wskaźnika wartości wypracowanej BCWP i planowanych kosztów BCWS**. Wyniki algorytmu stanowią wartości odchyżeń czasowych w poszczególnych momentach trwania przedsięwzięcia (t), odzwierciedlające okresy, w których miała zachodzić równość $BCWP = BCWS$, określana wskaźnikiem wartości wypracowanej harmonogramu (ES). Z kolei w pracy [12] poszerzono analizę EVM o wskaźniki „jakościowe”, proponując technikę jakościową QEV (*Quality Earned Value*). W tym celu wprowadzone zostały jakościowe parametry oceny QR (*Quality Requirements*). Metoda obliczania jakości wartości uzyskanej QEV zakłada formuły oceny jakości jej składników. Celem jest pomiar zdolności przedsięwzięcia do dostarczenia zakładanych poziomów jakości zadań harmonogramu. Dodatkowy cel badań stanowiła próba powiązania procesu zarządzania jakością z monitoringiem postępu robót. Wyniki dowodzą, że uwzględnienie parametru zakładanych poziomów jakości obniża prognozowaną wartość wypracowaną.

W celu zwiększenia dokładności wczesnego prognozowania ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC), w pracy [13] rozszerzono jego analizę o wprowadzenie innowacyjnego parametru oszacowania regresji nieliniowej ostatecznego kosztu CEAC (*nonlinear Cost Estimate at Completion*). Metoda wprowadza pojęcie „harmonogramu przejściowego” ES (*Earned Schedule*) i zapewnia wyznaczenie wskaźnika CEAC w każdym stadium realizacji. W toku badań implementacyjnych algorytmu budowane są równania modeli wzrostu czasu i kosztów (logistyczny, Gompertz, Bassa, Weibulla). Następnie dokonywany jest wybór jednego, najlepiej opisującego realizację przedsięwzięcia, czego wyznacznikiem jest poziom CEAC. Proponowana metoda pozwala w bardziej realistyczny sposób wyznaczyć poszukiwany parametr ostatecznego kosztu przedsięwzięcia przez stworzenie szerszego pola analizy, uwzględniającego rozbudowane modele matematyczne.

Another approach to expanding EVM analysis is the method of time-cost analysis described in the study [11], assessing the progress of works based on three additional assessment parameters: *Early Start Rate* (ESR), *Early Completion Rate* (ECR) and *Cost Overrun Rate* (COR). These studies show that, the same orders, which are characterized with for example the purpose of the object, have an impact on their delivery time.

A different approach to production monitoring has been proposed in the study [14] in the EDM (*Earned Duration Management*) method. The role of this technique is to replace one of the tools of the EVM method, the schedule performance index (SPI) with its own EDI (*Earned Duration Index*) index in the form of an exponential function with a time argument. The analysis of composite EVM indicators was also carried out in the study [15, 16], noting that, project monitoring and the related decision-making process regarding the implementation of corrective actions are an important component of supporting audit decisions. Therefore, an innovative multidimensional schedule control indicator (SPE) has been proposed to monitor the dynamics of changes in project implementation. The sensitivity study of the earned value ratio (BCWP) was also addressed in the paper [17], modeling scenarios of interruption of works on the construction site in various stages of implementation.

Although the continuous presence of this algorithm in research confirms the fact that, it is still an up-to-date and popular tool for measuring the efficiency of time and cost of projects around the world.

Methodology of the author's approach to testing the sensitivity of the BCWP indicator

Description of the schedule examined. To perform a sensitivity analysis of earned value ratio (BCWP) in the EVM method, the works schedule of the implemented construction project was used, consisting in the construction of a multi-family housing development, planned for a period of seven months, with a budget of over PLN 20 million. The allocation of the means of production was planned using three basic structures of project implementation – **methods of steady, parallel and sequence execution**. Below (Figure 2), there are three scenarios of works implementation, in the form of cumulative planned costs (BCWS) in the project.

Application of T/S monitoring deviations from the assumed duration of the project. In order to assess the degree of sensitivity of the analyzed indicator under each

Innym podejściem do poszerzenia analizy EVM jest opisana w pracy [11] metoda oceny stanu zaawansowania robót na podstawie trzech parametrów: wskaźnika wczesnego początku ESR (*Early Start Rate*); wskaźnika wczesnego ukończenia ECR (*Early Completion Rate*) i oceny przekroczenia kosztu COR (*Cost Overrun Rate*). Badania wykazują, że tożsame przedsięwzięcia, ale o różnym przeznaczeniu obiektu, mają wpływ na czas ich realizacji.

Odmienne podejście do monitorowania produkcji z zastosowaniem metody EDM (*Earned Duration Management*) zaproponowano w pracy [14]. Rolą tej techniki jest zastąpienie jednego z narzędzi metody EVM, a mianowicie wskaźnika wykonania harmonogramu (SPI), własnym indeksem EDI (*Earned Duration Index*) w postaci funkcji wykładniczej z argumentem czasowym. Analizę wskaźników EVM prowadzono też w pracach [15, 16]. Stwierdzono, że monitorowanie przedsięwzięcia i związany z nim proces decyzyjny, dotyczący wprowadzenia działań naprawczych, stanowią istotny składnik wspomaganie decyzji kontrolnych. Z tego powodu zaproponowano **innowacyjny wielowymiarowy wskaźnik kontroli harmonogramu** (SPE), umożliwiający monitorowanie dynamiki zmian w realizacji przedsięwzięcia. Badaniem wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej zajmowano się też w pracy [17], modelując scenariusze przerwania robót na placu budowy w różnych stadiach realizacji.

W dalszej części artykułu przeprowadzono analizę wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej BCWP, w zależności od przyjętego scenariusza realizacji przedsięwzięcia, posługując się przykładem budowy osiedla wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej.

Metoda autorskiego podejścia w badaniu wrażliwości wskaźnika BCWP

Opis badanego harmonogramu. Do przeprowadzenia analizy wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej (BCWP) w metodzie EVM posłużono się harmonogramem rzeczowo-finansowym zrealizowanego przedsięwzięcia budowlanego, polegającego na budowie osiedla w wielorodzinnej zabudowie mieszkaniowej, zaplanowanego na okres siedmiu miesięcy, z budżetem o wartości ponad 20 mln zł. Alokację środków produkcji zaplanowano za pomocą trzech podstawowych scenariuszy realizacji przedsięwzięć, a mianowicie **realizacji równomiernej, równoległej i kolejnej**. Na rysunku 2 przedstawiono uzyskane trzy planowane scenariusze realizacji robót, w formie skumulowanych wartości kosztów planowanych (BCWS) w przedsięwzięciu.

Monitoring T/S odchylenia od założonego czasu trwania przedsięwzięcia. W celu oceny stopnia wrażliwości analizo-

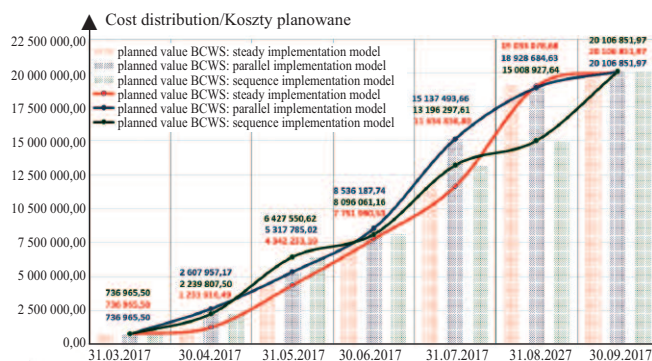


Fig. 2. Analysis of the adopted schedule with the earned value method – in three implementation structures. Description in the text

Fig. own elaboration
Rys. 2. Analiza przyjętego harmonogramu metodą wartości wypracowanej EVM w przypadku trzech scenariuszy realizacji. Opis w tekście

Rys. opracowanie własne

of the methods, the adopted calculation models are characterized by a 10% increase in the cost budget (ACWP: C = 110%, 120%, 130%, 140%). These models were described with the symbols A1 ÷ A4, indicating the increase in variances [14]. The method of steady implementation assumes a global (overall) impact of variances (A, B) – for all schedule processes. In the methods of parallel and sequence execution, the local (partial) impact of variances (a, b) was adopted – on selected process sequences. This is due to the obvious characteristics of these methods, widely described in the literature (delays in the analyzed process sequences do not always affect the delays of their successors).

The analysis of the growth rate of unplanned costs and the work performance deviating from the plan consists in a gradual increase in expenditure on production (C), with a simultaneous systematic reduction of the production rate (S). These phenomena are directly reflected in the decrease in the value of the BCWP indicator [13], which is the main dimension of the analysis of the progress of works in the earned value method.

On the basis of simple indicators of the EVM method, a developed time-cost analysis was proposed [18], examining the impact of the project implementation time on the costs incurred – by introducing the indicator for **monitoring changes** in the assumed financial liquidity due to arising time variances from the schedule (T/S):

$$T/S = \frac{TV}{SV} = \frac{BCWS - ACWP}{BCWP - BCWS}$$

His role is to expand the analysis with control indicators to analyze financial liquidity, by taking into account the costs and time variances in the schedule. Formula (1) extends so the simple analysis of project liquidity by including the difference of the earned value indicator, corrected by the value of planned costs (BCWS), constituting its budget. In the mathematical structure of indicator, it is unacceptable to equate the values of the BCWS, ACWP and BCWP parameters – at which the equality of the described tool indicate the implementation of works in accordance with the assumed time and cost. These cases do not require taking remedial actions to improve the monitored schedule.

Assessment of the sensitivity degree of the BCWP earned value index. In assessing the degree of sensitivity of the BCWP value of the EVM method, the criterion of the project implementation structure used was used in the course of the works covered by the schedule (Fig. 3). Introduction of 10% time deviations (delays) for each of the three planned scenarios for the implementation of the first works and costs (unplanned increase in costs) generates in each case a decrease in the value of the BCWP indicator against the background of the planned cost budget (BCWS).

In the steady implementation method (global deviation C, model A1), the T/S monitoring ratio, describing the deviation from the assumed duration of the project, gives the largest global increase in value after the fifth month of works, whose cost budget is the highest. At the same time, the „response” of the BCWP indicator of the classic EVM method (Fig. 3, chart

wanego wskaźnika w ramach każdego scenariusza realizacji przyjęto modele obliczeniowe charakteryzujące nieplanowany dziesięcioprocentowy skokowy wzrost ponoszonych kosztów (C: (ACWP) = 110, 120, 130, 140%). Modele te opisano symbolami A1 ÷ A4, wskazującymi przyrost odchyleń [14]. W metodzie równomiernego wykonania założono globalny (całościowy) wpływ odchyleń kosztowych – na wszystkie procesy harmonogramu. W metodach równoległego i kolejnego wykonania przyjęto lokalny (częściowy) wpływ odchyleń na wybrany ciąg procesów (II). Wynika to z charakterystyki tych metod, opisanej w literaturze (opóźnienia analizowanych ciągów procesów nie zawsze mają wpływ na opóźnienia ich następników).

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 bezpośrednie odzwierciedlenie w obniżeniu wartości wskaźnika BCWP [13], stanowiącego główny wymiar analizy postępu robót w metodzie wartości uzyskanej.

Na bazie prostych wskaźników metody EVM zaproponowano rozwiniętą analizę czasowo-kosztową [18], określającą wpływ czasu realizacji przedsięwzięcia na ponoszone koszty przez wprowadzenie **wskaźnika monitoringu zmiany** w założonej płynności finansowej przez powstające odchylenia czasowe od harmonogramu (T/S):

$$T/S = \frac{TV}{SV} = \frac{BCWS - ACWP}{BCWP - BCWS}$$

Rola wskaźnika monitorującego zmiany polega na poszerzeniu analizy o wskaźniki kontrolne, służące analizie płynności finansowej przez uwzględnienie powstałych w harmonogramie odchyleń od kosztów i czasu. Zależność (1) poszerza więc prostą analizę płynności przedsięwzięcia o ujęcie różnicy wskaźnika wartości wypracowanej (BCWP), skorygowanego o wartość kosztów planowanych (BCWS), stanowiących jego budżet. W matematycznej konstrukcji wskaźników niedopuszczalne jest zrównanie wartości parametrów BCWS, ACWP i BCWP, przy których opisujące narzędzia wskazują na realizację robót zgodnie z założonym czasem i kosztem. Przypadki te nie wymagają podjęcia działań zaradczych, usprawniających monitorowany harmonogram.

Ocena stopnia wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej BCWP. W ocenie stopnia wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej BCWP w metodzie EVM, posłużono się kryterium przyjętego scenariusza realizacyjnego przedsięwzięcia (rysunek 3). Wprowadzenie w przypadku każdego z trzech planowanych scenariuszy realizacji robót pierwszego wzrostu dziesięcioprocentowych odchyleń czasowych (opóźnień) i kosztowych (nieplanowany wzrost kosztów) generuje w każdym przypadku spadek wartości wskaźnika BCWP na tle ich planowanego budżetu (BCWS).

W metodzie potokowej realizacji (odchylenie globalne C, model A1) wskaźnik monitoringu T/S, opisujący odchylenie od założonego czasu trwania przedsięwzięcia, daje największy globalny wzrost wartości po piątym miesiącu robót, którego budżet kosztów jest największy. Jednocześnie „odpowiedź” wskaźnika BCWP klasycznej EVM (rysunek 3a)

no. 3a) in the planned completion date generates its highest decrease – in comparison with other execution structures (chart no. 3b, 3c). The smallest decrease in the value of the examined BCWP indicator, resulting from the introduction of a 10% degree of deviations (local c, model a'(II)) was noted for the parallel implementation method. As in the steady implementation method, the monotonicity of the BCWP indicator gives the greatest increase in its value after the end of the fifth month of the project. This also applies to the structure of the third planned scenario, the follow-up approach (Chart no. 3c). In this case, an intermediate, between the above methods, decrease in the BCWP index against the planned budget of final costs was recorded.

The monitoring indicator for deviations from the assumed duration (T/S), assuming a 10% increase in deviations (local c, model a''(II)) in this case shows zero values in the first three months in which the series of processes (I) is carried out, not subject to local aberrations.

Against the background of the assessment of the degree of sensitivity of the BCWP indicator of the EVM method, it is also worth analyzing successive abrupt increases in deviations, for $C = 120\%$, 130% , 140% . Figure 3 shows for each of the three tested methods of implementation, four scenarios of cost increase over time. Monitoring the growth of the schedule-based earned value (BCWP) ratio based the assumptions of the classic steady implementation method were carried out by modeling global (C) time and cost deviations in a four-stage growth scale (models A1 ÷ A4). In the case of implementation structures of the complex of operations type – parallel (') and sequency (") implementation methods – local (c) were defined, for the second series of processes in the schedule (describing works in facility no. 2 of the project), underestimation and time delays (models a1 (II) ÷ a4(II)).

The analysis of the monotonicity of the BCWP indicator in the implementation of the schedule using the steady

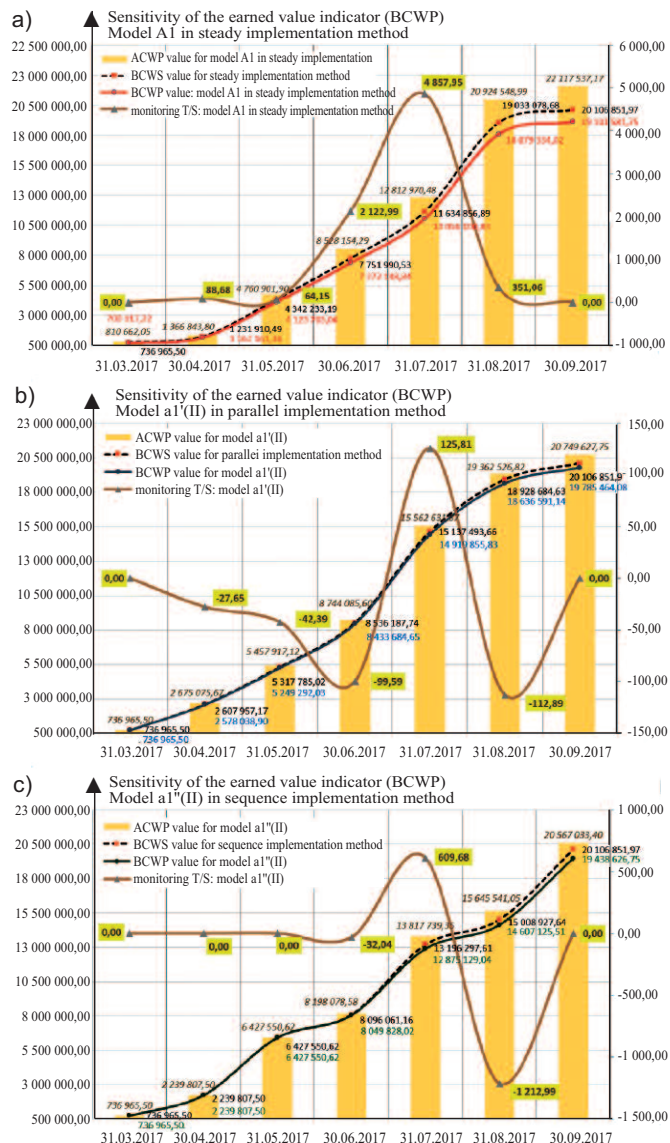


Fig. 3. Sensitivity of the earned value indicator (BCWP) in EVM for the model with the first increase in deviations: $C/c = 110\%$ – in three implementation structures

Rys. 3. Wrażliwość wskaźnika wartości wypracowanej BCWP w metodzie EVM w przypadku modelu z pierwszym wzrostem odchyień: $C/c = 110\%$, w trzech scenariuszach realizacji

Fig. own elaboration

Rys. opracowanie własne

w planowanym terminie zakończenia generuje największy jego spadek – w zestawieniu z pozostałymi scenariuszami realizacji (rysunek 3b i 3c). Najmniejszy spadek wartości badanego wskaźnika BCWP, wynikający z wprowadzenia dziesięcioprocentowego stopnia odchyień (lokalnych c, model a'(II)) odnotowano w przypadku metody równoległej realizacji. Metoda ta generuje także najmniejszą amplitudę wahań wskaźnika monitoringu T/S. Podobnie jak w realizacji potokowej monotoniczność wskaźnika BCWP daje największy wzrost jego wartości po zakończeniu piątego miesiąca trwania przedsięwzięcia. Dotyczy to również struktury trzeciego planowanego scenariusza, metody kolejnej realizacji (rysunek 3c). W tym przypadku odnotowano pośrednią wartość spadku wskaźnika BCWP na tle planowanego budżetu kosztów końcowych.

Wskaźnik monitoringu odchylenia T/S, przy dziesięcioprocentowym wzroście odchyień lokalnych c, model a''(II) wykazuje w tym przypadku wartości zerowe w trzech pierwszych miesiącach, w których realizowany jest ciąg procesów (I), niepoddanych aberracjom.

Na tle oceny stopnia wrażliwości wskaźnika BCWP metody EVM warto również dokonać analizy kolejnych skokowych wzrostów odchyień w przypadku $C = 120$, 130 i 140% . Na rysunku 4 przedstawiono cztery scenariusze przyrostu kosztów po określonym czasie w przypadku każdej z trzech badanych metod realizacji. Monitoring wzrostu wskaźnika wartości wypracowanej harmonogramu (BCWP) bazującego na założeniach klasycznej metody potokowej realizacji przeprowadzono, modelując globalne (C) odchylenia czasowe i kosztowe, w czterostopniowej skali wzrostu (modele A1 ÷ A4). W przypadku struktur realizacyjnych typu kompleks operacji – metody równoległej (') i kolejnej (") realizacji – definiowano lokalne (c) niedoszacowania i opóźnienia czasowe (modele a1 (II) ÷ a4 (II)), w przypadku drugiego ciągu procesów w harmonogramie, opisującego roboty w obiekcie nr 2).

implementation method shows the diversity of its results, depending on the degree of disruption, already in the first stage of registration – showing the impact of the global impact of deviations. For this method, the largest amplitude of fluctuations of this indicator was recorded with a systematic, ten-percent increase in the C parameter. The course of the growth of the earned value ratio in the constructed schedule on the basis of the parallel implementation method, it records the lack of deviations after the first month of works (execution of earthworks and foundation structure for the entire building together). Then, as a result of a systematic increase in deviations (models a1'(II) – a4'(II)), successive scenarios of monotonicity of the BCWP index generate decreases in its value with a dispersion smaller than in the case of the steady implementation method. The course of the increase in the BCWP indicator shows a smaller than global (in the pipeline method) local impact.

Monitoring of the earned value ratio (BCWP) in the course of the schedule according to the successive implementation method, with systematic scenarios of increase in deviations (models a1''(II) – a4''(II)) shows the corresponding decreases in its value, and the amplitude of their fluctuations in individual months implementation of the project, intermediate values of the ranges between the two above methods.

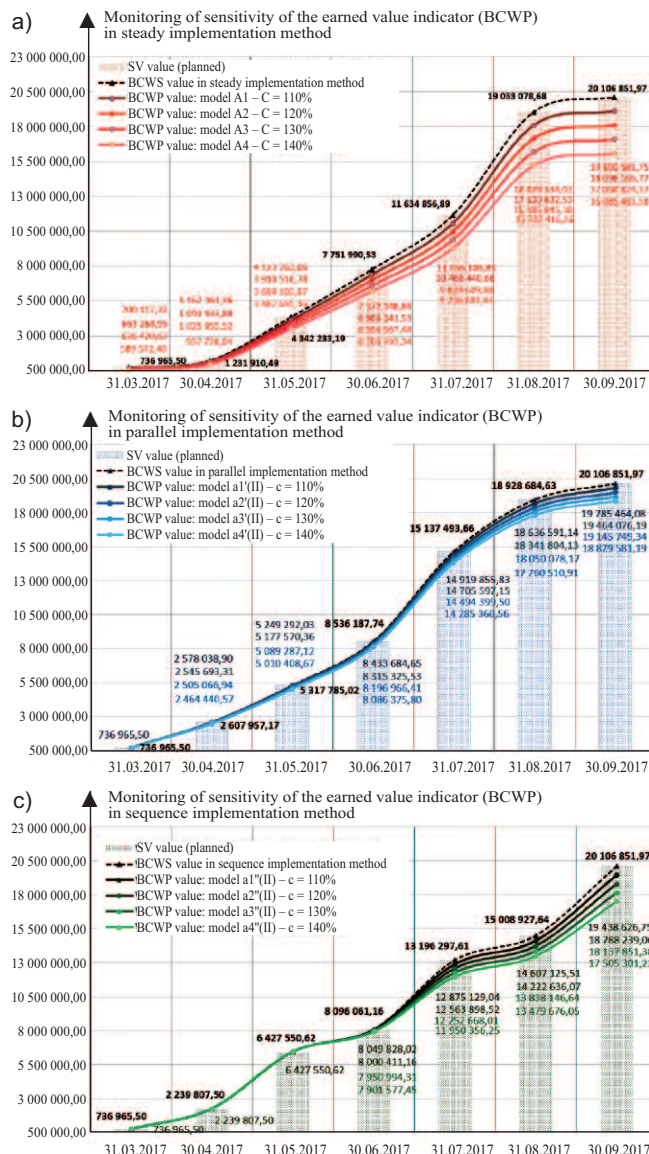


Fig. 4. Monitoring of sensitivity of the earned value indicator (BCWP) for four increases in cost variances: C/c = 110%, 120%, 130%, 140%

Fig. Own elaboration
Rys. 4. Monitoring wrażliwości wskaźnika wartości wypracowanej (BCWP) w trzech strukturach realizacji, w przypadku czterech wzrostów odchylenia kosztowych: C/c = 110%, 120%, 130%, 140%

Rys. Opracowanie własne

Analiza monotoniczności wskaźnika BCWP w realizacji harmonogramu metodą potokowej realizacji pokazuje zróżnicowanie jego wyników, zależne od stopnia zakłóceń już w pierwszym etapie rejestracji. W przypadku tej metody odnotowano największą amplitudę wahań wskaźnika przy systematycznym, dziesięcioprocentowym wzroście parametru C. Przebieg wzrostu wskaźnika wartości wypracowanej w harmonogramie skonstruowanym na bazie metody równoległej realizacji pokazuje brak odchylenia po pierwszym miesiącu robót (wykonanie robót ziemnych i ustroju fundamentowego całej zabudowy). Następnie, w wyniku systematycznego wzrostu odchylenia (modele a1''(II) – a4''(II)) kolejne scenariusze monotoniczności wskaźnika BCWP generują zmniejszenie jego wartości o rozrzucie mniejszym jednak niż w przypadku metody potokowej realizacji. Przebieg przyrostu wskaźnika BCWP unaczynia mniejszy wpływ lokalny od globalnego (w metodzie potokowej realizacji).

Monitoring wskaźnika wartości wypracowanej (BCWP) w przebiegu harmonogramu wg metody kolejnej realizacji, przy systematycznych scenariuszach wzrostu odchylenia (modele a1''(II) – a4''(II)),

przedstawia odpowiadające im spadki jego wartości, a amplituda tych wahań w poszczególnych miesiącach realizacji przedsięwzięcia pośrednie wartości przedziałów pomiędzy dwiema powyższymi metodami.

Conclusions from research and analyzes

The solutions of the monotonic analysis of the BCWP indicator – presented in Figure 3, 4 – in three approaches to the construction of the schedule – allow to indicate its maximum values of the total planned costs of work performed, recorded for individual scenarios in the last control stages. The highest levels of the discussed coefficient were recorded for the schedule implemented with the method of parallel

Wnioski z przeprowadzonych analiz

Zestawione na rysunkach 3 i 4 analizy monotoniczności wskaźnika BCWP pozwalają na wskazanie jego maksymalnych wartości łącznych planowanych kosztów wykonanej pracy, zarejestrowanych w przypadku poszczególnych scenariuszy w ostatnich etapach kontrolnych. Największy poziom omawianego współczynnika odnotowano w przypadku harmonogramu równoległej realizacji, wymaga-

implementation, requiring involvement of the largest number of means of production, while having the longest periods of implementation of delayed and underestimated works. The second place in this assessment is the schedule according to the method of sequence implementation, with the need to launch the smallest amount of production means – corresponding to the shortest times of disturbed bandwidth of activities, so that the schedule can assume timely completion of the project.

The method of the steady implementation, assumed as the third implementation alternative, brings the lowest levels of the BCWP indicator in the last period of recording the progress of works at the construction site. Its value signals the greatest delay resulting from the impact of parameters describing underestimation and untimely work.

To sum up, the recorded final values of the BCWP indicator for the implementation of the project indicate the selection for its implementation of the schedule made according to the assumptions of the method of the steady execution, as the most optimal from a cost point of view. The highest amplitude of fluctuations of the analyzed BCWP indicator in the earned value method in this method will require top management skills, experience and intuition in controlling the schedule planned according to its assumptions. Therefore, the widespread desire to design production plans containing the premises of the method of steady performance seems to be justified, provided that managers are aware of the resulting dangers in cost deviations.

Received: 15.07.2024

Revised: 16.08.2024

Published: 23.09.2024

jącej zaangażowania największej ilości środków produkcji, posiadającej jednocześnie najdłuższe czasookresy realizacji robót opóźnionych i niedoszacowanych. Na drugim miejscu w tej ocenie plasuje się harmonogram wg metody kolejnej realizacji, z najmniejszą ilością środków produkcji, odpowiadającą najkrótszym okresom zakłócanego pasma czynności, aby harmonogram mógł zakładać terminowe zakończenie przedsięwzięcia.

W metodzie potokowej realizacji (trzecia alternatywa harmonogramu) stwierdzono najmniejszy wskaźnik BCWP w ostatnim okresie rejestracji postępu robót na placu budowy. Jego wartość sygnalizuje największe opóźnienie, wynikające z oddziaływania parametrów opisujących niedoszacowanie i nieterminowość prac.

Odnotowane końcowe wartości wskaźnika wartości wypracowanej BCWP wskazują na wybór harmonogramu wg założeń metody potokowej realizacji, jako optymalnej z kosztowego punktu widzenia. Największa w tej metodzie amplituda wahań analizowanego wskaźnika BCWP wymagać będzie od kierownictwa stopnia menedżerskiego najwyższych umiejętności, doświadczenia i intuicji w sterowaniu harmonogramem zaplanowanym wg jej założeń. Powszechne więc dążenie do projektowania harmonogramów z zastosowaniem metody potokowej realizacji robót wydaje się uzasadnione pod warunkiem świadomości menedżerów, dotyczącej możliwości zmiany kosztów.

Wpłynął: do redakcji: 15.07.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 16.08.2024 r.

Opublikowano: 23.09.2024 r.

Literatura

- [1] Bassioni HA, Price ADF, Hassan TM. Performance measurement in construction. *Journal of Management In Engineering*. 2004; 20(2): 42 – 50.
- [2] Marcinkowski R. Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynieryjno-budowlanej. *Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej*. 2002; s. 15 – 20, Warszawa.
- [3] Kerkhove L-P, Vanhoucke M. Extensions of earned value management: using the earned incentive metric to improve signal quality. *International Journal of Project Management*, v. 35(2), s. 148-168.
- [4] Smaga E, Guzik K. Ryzyko i rentowność inwestycji finansowych i rzeczowych. *Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, s. 101-107, Kraków 2013.
- [5] Hunter H, Fitzgerald R, Barlow D. Improved cost monitoring and control through the Earned Value Management System. *Acta Astronautica*. 2014; 93: 497 – 500.
- [6] Połoński M, Komendarek P. Bieżąca kontrola kosztów realizacji obiektu budowlanego metodą Earned Value. *Monografia: Metody ilościowe w badaniach ekonomicznych: tom XII/2*, s. 279-290, 2011.
- [7] Anbari FT. Earned Value project management method and extensions. *Project Management Journal*. 2003; 12.
- [8] Candido LF, Mahlmann LF, Jose de Paula H, Neto B. Critical analysis on Earned Value Management (EVM) technique in building construction. *Contract and Cost Management*. 2014; IGLC-22, s. 159 – 170.
- [9] 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*. 2016; 4 (1): 8 – 25.

- [10] Vanhoucke M, Vereecke A, Gemmel P. The project scheduling game (PSG): simulating time/cost trade-offs in projects. *Project Management Journal*. 2005; 36 (1): 51 – 59.
- [11] Czempik 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*. 2014; 91: 424 – 428.
- [12] Dodson M, Defavari G, De Carvahlo V. Quality: the third element of Earned Value Management. *Procedia Computer Science*. 2015; 64: 932 – 939.
- [13] Narbaev T, De Marco A. Combination of growth model and earned schedule to forecast project cost at completion method. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2014; 140 Issue 1.
- [14] Khamooshi H, Abdia A. Project duration forecasting using Earned duration management with exponential Smoothing techniques. *Journal of Management in Engineering*. 2017; 33 Issue 1.
- [15] Colin J, Martens A, Vanhoucke M, Wauters M. A multivariate approach for top-down project control using earned value management. *Decision Support Systems*. 2015; 79: 65 – 76.
- [16] Kim B.-Ch. Dynamic control thresholds for consistent Earned Value Analysis and reliable early warning. *Journal of Management in Engineering*. 2015; 31, Issue 5.
- [17] Przywara D, Rak A. Economic conditions of leaving the construction site by the contractor at different stages of its implementation. *Environmental Challenges in Civil Engineering*, Springer Nature Switzerland AG, 2023.
- [18] Przywara D, Rak A. Monitoring of Time and Cost Variances of Schedule Using Simple Earned Value Method Indicators. *Applied Sciences*. 2021; 11, 1357.