

# 9. PROGNOZOWANIE W METODZIE EVM TERMINU I KOSZTU KOŃCOWEGO REALIZACJI OBIEKTU NA PODSTAWIE BIEŻĄCEGO ZAAWANSOWANIA

Aneta Ziółkowska<sup>1</sup>, Mieczysław Połoński<sup>2</sup>

## 9.1. WPROWADZENIE

Prezentowany rozdział dotyczyć będzie problematyki kontroli przedsięwzięć budowlanych podczas ich realizacji w zakresie kosztu i terminu na tle zaawansowania rzeczowego ze szczególnym zwróceniem uwagi na prognozowanie kosztu i terminu końcowego.

Publikowane w literaturze artykuły oraz badania sygnalizują dużą potrzebę kontroli przedsięwzięć w każdej dziedzinie działalności człowieka. Wskazują na częste zjawisko przekraczania planowanego budżetu oraz terminu zakończenia jego realizacji. W przypadku przedsięwzięć budowlanych, ze względu na dużą skalę realizacji oraz specyfikę warunków realizacyjnych, często przekroczenia te osiągnąją duże wartości. Przyczyn można szukać m.in. w założeniu zbyt optymistycznego terminu zakończenia, niedoszacowaniu budżetu, braku bieżącej kontroli kosztów oraz terminu realizacji, w tym również zależności pomiędzy nimi.

Jednym z popularnych narzędzi służących do kontrolowania przedsięwzięć w zakresie kosztu i terminu jest metoda wartości wypracowanej (EVM) (Web, 2003). Metoda ta jest uniwersalna i może być adaptowana do każdego rodzaju przedsięwzięcia (Połoński i Komendarek, 2011).

Dla przedsięwzięć budowlanych stosowanie metody wymaga przemyślanego jej dostosowania do specyfiki i warunków panujących podczas realizacji obiek-

---

<sup>1</sup>JLL, Warszawa, e-mail: anetaziolkowska@gmail.com

<sup>2</sup>Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, e-mail: mieczyslaw\_polonski@sggw.pl

tów budowlanych. Dostępne w literaturze dalsze rozwinięcia metody umożliwiają również prognozowanie kosztu i terminu końcowego.

Ponieważ metoda EVM jest znana i opisywana w literaturze już od ponad pięćdziesięciu lat, w rozdziale skupiono się głównie na jej rozwinięciach. Spis najważniejszych, używanych w metodzie EVM i jej rozwinięciach, akronimów zamieszczono na końcu rozdziału.

## 9.2. PROGNOZOWANIE KOSZTU KOŃCOWEGO

### 9.2.1. WSTĘP

Metoda EVM umożliwia prognozowanie kosztu końcowego przedsięwzięcia. Na podstawie kolejnych aktualizacji przy przedsięwzięciach realizowanych powyżej roku można z dużym prawdopodobieństwem oszacować koszt końcowy (*EAC* – Estimation at Completion). Parametr określany jest na podstawie pomiarów wykonanych do tej pory oraz szacunku kosztu robót pozostających do wykonania. *EAC* powinno być opracowywane na poziomie WP (Work Package – Pakietów Roboczych) oraz przeglądane na poziomie CA (Control Account – Kont Kontrolnych), w okresach kontrolnych, np. w okresach miesięcznych.

W literaturze dostępnych jest wiele wzorów pozwalających na prognozowanie kosztu końcowego. Poniżej zaprezentowano najważniejsze z nich.

### 9.2.2. WZORY PODAWANE PRZEZ WEBBA

Szacowany koszt całkowity (wzór podstawowy) wyraża się wzorem (Webb, 1995):

$$EAC = AC + (BAC - EV) / CPI. \quad (1)$$

Dodatkowe wzory empiryczne, uwzględniające zmienność kosztów i harmonogramu, podano poniżej:

$$EAC = AC + (BAC - EV) / (0,5CPI + 0,5SPI), \quad (2)$$

$$EAC = AC + (BAC - EV) / (CPI \times SPI). \quad (3)$$

### 9.2.3. SZACOWANIE KOSZTU KOŃCOWEGO WG PROPOZYCJI ATHEY

Athey (2007) proponuje szacowanie kosztu końcowego w trzech wariantach: optymistycznym, pesymistycznym oraz najbardziej prawdopodobnym, w następujący sposób:

- wariant pesymistyczny:

$$EAC = AC + RB / (CPI \times SPI); \quad (4)$$

- wariant najbardziej prawdopodobny:

$$EAC = AC + RB/CPI; \quad (5)$$

- wariant optymistyczny:

$$EAC = AC + RB/1, \quad (6)$$

gdzie:  $RB$  (Remaining Budget) – to budżet robót pozostałych do wykonania, często nazywany również  $ETC$  (Estimate to Complete).

#### 9.2.4. WZORY PROPONOWANE PRZEZ DEPARTMENT ENERGII USA

Szacowany koszt całkowity (wzór podstawowy) wyraża się wzorem:

$$EAC = AC + ETC, \quad (7)$$

gdzie:  $AC$  – rzeczywisty koszt wykonanych robót,  $ETC$  – szacowany koszt robót pozostałych zatwierdzonych do realizacji.

Przy wyznaczeniu  $EAC$  w tym podejściu zakłada się, że wszystkie pozostałe roboty są niezależne od robót wykonanych do chwili obecnej (Department of Energy, USA, 2003). Metoda opiera się na subiektywnej ocenie osób określających wartość robót.

$$EAC = (AC/EV) \times BAC, \quad (8)$$

gdzie:  $BAC$  – planowany koszt końcowy przedsięwzięcia, suma budżetów wszystkich pozycji (WP, CA), czyli skumulowane  $PV(PVcum)$ .

Metoda łatwiejsza w użyciu od poprzedniej, jednak zakłada, że roboty pozostałe do wykonania będą wykonywane zgodnie z dotychczasowym trendem.

$$EAC = BAC/CPI. \quad (9)$$

Metoda również łatwa do zastosowania. Zakłada, że postęp realizacji robót jeszcze nie wykonanych będzie zgodny z dotychczasowym trendem. Metoda powstała z przekształcenia poprzedniej metody, dlatego wyniki będą bardzo zbliżone.

$$EAC = (AC/EV) \times WCP + CWNB, \quad (10)$$

gdzie:  $WCP$  (Work Completed and in Progress) – budżet dla robót wykonanych i w trakcie realizacji a  $CWNB$  (Cost of Work Not yet Begun) – budżet robót jeszcze nierozpoczętych.

Metoda ta zakłada, że roboty, które jeszcze się nie rozpoczęły, będą wykonane zgodnie z planem.

$$EAC = AC + (1/(CPI \times (BAC - EV))). \quad (11)$$

Metoda ta uznawana jest za subiektywną.

### 9.2.5. WZORY PROPONOWANE PRZEZ ANBARI

$$EAC = AC + ETC, \quad (12)$$

gdzie: *ETC* (Estimate to Complete) – szacowany koszt do zakończenia.

Wzór (Anbari, 2003) znajduje zastosowanie w sytuacji, gdy aktualne analizy wskazują, że planowane założenia kosztowe są już nieaktualne ze względu na zmianę warunków. Należy zatem zdefiniować nowe *ETC* dla robót pozostających. W tej sytuacji *EAC* nazywane jest również *RCE* (Revised Cost Estimate), *LRE* (Latest Revised Estimate) lub *CWE* (Current Working Estimate).

W przypadku, gdy bieżące analizy wskazują na małe zaawansowanie rzeczowe przedsięwzięcia, ale przyjęte zostało założenie, że dotychczasowy postęp nie wpłynie na przebieg realizacji robót w przyszłości, tzn. będzie on zgodny z harmonogramem (i budżetem), *EAC* wyznaczone jest za pomocą następującego wzoru:

$$EAC = AC + BAC - EV = BAC - CV, \quad (13)$$

gdzie:  $BAC - EV = ETC$ .

Jeśli założeniem jest, że wykonanie z przeszłości jest prawidłowym trendem, który będzie się utrzymywał również w przyszłości, to *EAC* można wyznaczyć za pomocą następującego wzoru:

$$EAC = AC + (BAC - EV)/CPI = BAC/CPI, \quad (14)$$

gdzie:  $(BAC - EV)/CPI = EAC$ .

W przypadku gdy zakłada się, że przedsięwzięcie będzie zrealizowane zgodnie z planem, mimo dotychczasowego niskiego stopnia wykonania robót, *EAC* wyznacza się z poniższego wzoru:

$$EAC = BAC. \quad (15)$$

### 9.2.6. WZÓR ZAPREZENTOWANY PRZEZ HEINZE

$$EAC = BAC/(CPI \times SPI), \quad (16)$$

gdzie:  $CPI \times SPI = CR$  – zależność pomiędzy kosztami a harmonogramem, np. zwiększenie liczby pracowników może wpłynąć na zwiększenie kosztu i skrócenie terminu realizacji,

$$EAC = BAC/CR \quad (17)$$

a wówczas  $ETC = (BAC - EV) \times CR$ .

Wyniki otrzymane za pomocą podanych wzorów (Heinze, 1996) będą różne, w zależności od przyjętych założeń, co może przesądzić o ich poprawności. W zależności od oceny bieżącej i przyszłej sytuacji, potrzeb i specyfiki przedsięwzięcia

należy wybrać odpowiedni wariant. Ważne jest aby nie zakładać wariantów optymistycznych w sytuacji, gdy rzeczywisty postęp przedsięwzięcia jest mniejszy niż planowany. Należy przyjmować scenariusze realizacji robót dostosowane do występującego trendu.

Podczas kolejnych weryfikacji przedsięwzięcia ważnym zadaniem jest identyfikacja przyczyn odchyień, które się pojawiły, oraz ocena czy są to przyczyny jednorazowe, czy też należy je uwzględnić przy dalszym szacowaniu kosztu końcowego.

## 9.3. PROGNOZOWANIE TERMINU KOŃCOWEGO

### 9.3.1. WSTĘP

Parametry zaproponowane w metodzie *EVM* wyrażone są w jednostkach pieniężnych, w tym również odchylenie harmonogramu (*SV*) oraz wskaźnik odchylenia czasowego harmonogramu (*SPI*). Dodatkowo zaprezentowane w literaturze obliczenia i analizy wskazują, że wartości obu wskaźników w ostatnim okresie realizacji przedsięwzięcia mogą przyjmować błędne wartości (Lipke, 2003; Czarnigowska, 2008). Okazuje się, że w sytuacji gdy termin realizacji przedsięwzięcia zostaje przedłużony w stosunku do planowanego, wartości parametrów czasu (*SPI*, *SV*) wskazują, że przedsięwzięcie zostało zakończone zgodnie z planem, pomimo iż zakończyło się z opóźnieniem. Trudności te przyczyniły się do powstawania i rozwijania metod służących do bardziej wiarygodnego prognozowania terminu końcowego. Najbardziej popularne z nich to:

- The Planned Value Method zaproponowana przez Anbari (2003),
- The Earned Duration Method zaproponowana przez Jacob (2003),
- The Earned Schedule Method zaproponowana przez Lipke (2003).

Każdą z metod można zastosować w następujących warunkach:

- Termin końcowy przedsięwzięcia będzie taki jak planowany; roboty postępują zgodnie z planem.
- Planowany czas realizacji dla robót pozostających jest nieosiągalny ze względu na zmianę warunków – powinien zostać utworzony dla nich nowy harmonogram.
- Czas realizacji robót pozostających bardzo się wydłuża; ze względu na problemy techniczne powodzenie realizacji przedsięwzięcia stoi pod dużym znakiem zapytania.
- Roboty pozostające będą realizowane zgodnie z planem; dotychczasowy postęp w realizacji robót w przeszłości nie będzie miał na nie wpływu.
- Postęp robót w przeszłości będzie miał wpływ na terminy realizacji robót niewykonanych; będą one realizowane zgodnie z dotychczasowym trendem wskaźnika *SPI*.

- Postęp robót w przeszłości (zarówno koszt, jak i czas) będzie miał wpływ na roboty pozostające do wykonania, będą one realizowane zgodnie z dotychczasowym trendem wskaźnika  $CR$  ( $CR = SCI = SPI \times CPI$ ).

Poniżej przedstawiono wybrane metody oraz zaprezentowano występujące w nich poszczególne wzory.

### 9.3.2. PLANNED VALUE (PV)

Metoda została zaprezentowana przez Anbariego w 2003 roku (Anbari, 2003). Pojęcia, jakie występują w metodzie, to:

- $TEAC$  (Time Estimation at Completion) – szacowany czas końcowy,
- $TVAC$  (Time Variance at Completion) – odchylenie czasu końcowego,
- $SAC$  (Schedule at Completion) – planowany harmonogram zakończenia,
- $TETC$  (Time Estimate to Complete) – nowy szacowany czas do zakończenia.

W powyższej metodzie szacowany czas końcowy inwestycji ( $TEAC$ ) oraz  $TVAC$  mogą zostać wyznaczone na podstawie  $SAC$  oraz dotychczasowego postępu robót.

Jeśli dotychczasowy stan zaawansowania robót świadczy o braku możliwości dotrzymania planowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia, to należy określić nowy  $TETC$  oraz na tej podstawie wyznaczyć szacowany czas końcowy inwestycji za pomocą wzoru:

$$TEAC1 = AT + TETC, \quad (18)$$

gdzie  $AT$  (Actual Time) oznacza dotychczasowy czas realizacji robót.

To podejście może być nazwane zweryfikowanym harmonogramem bądź aktualnym harmonogramem.

Jeśli analizy wskazują, że czynniki wpływające na przebieg realizacji w przeszłości nie wpłyną na terminowość realizacji kolejnych robót i dotychczasowy trend nie będzie kontynuowany, ponieważ roboty będą wykonywane zgodnie z planem, to w tej sytuacji prognozowany czas końcowy może zostać wyznaczony za pomocą następującego wzoru:

$$TEAC2 = AT + \text{time for remaining work as planned}. \quad (19)$$

Tę zależność zapisali Fleming i Koppelman (2000) w sposób następujący (Fleming i Koppelman, 2000):

$$TEAC2 = SAC - TV, \quad (20)$$

gdzie  $TV$  (Time Variance) oznacza odchylenie czasu. Wzór 20 oznaczono w dalszej części pracy jako PV1.

W przypadku gdy bieżąca analiza wskazuje, że przedsięwzięcie w przyszłości będzie realizowane zgodnie z trendem dotychczasowym, prognozowany czas

końcowy może zostać wyznaczony za pomocą wzoru:

$$TEAC3 = AT + \text{time for remaining work as planned} / SPI \quad (21)$$

lub

$$TEAC3 = SAC / SPI. \quad (22)$$

Wzór (22) oznaczono w dalszej części pracy jako PV2.

Gdy zakłada się, że przedsięwzięcie zostanie wykonane zgodnie z planem, prognozowany czas końcowy może zostać zapisany za pomocą wzoru:

$$TEAC4 = SAC. \quad (23)$$

Jest to przypadek, w którym prognozowanie terminu końcowego nie jest potrzebne.

W sytuacji gdy dotrzymanie założonego budżetu stanowi priorytet, można zastosować następujący wzór:

$$TEAC5 = SAC / CR. \quad (24)$$

Wzór (24) oznaczono w dalszej części pracy jako PV3.

Inne parametry i wzory proponowane przez Anbariego zestawiono poniżej:

$$\% COMPLETE = EV / BAC, \quad (25)$$

$$\% SPENT = AC / BAC, \quad (26)$$

$$CPI = (\% SPENT) / (\% COMPLETE), \quad (27)$$

$$CPI = (PLANED UNIT COST) / (ACTUAL UNIT COST). \quad (28)$$

### 9.3.3. EARNED DURATION (ED)

Metoda to została opisana przez Jacoba (Jacob, 2003) oraz rozwinięta przez Jacoba i Kane (Jacob i Kane, 2004). Jej twórcy zaproponowali następujący podstawowy wzór na wyznaczenie czasu końcowego inwestycji *EDAC* (Eastimate of Duration at Completion):

$$EDAC = AD + UDR, \quad (29)$$

W innej postaci:

$$EDAC = AD + (PD - ED) / PF, \quad (30)$$

gdzie:

*ED* (Earned Duration) – czas wypracowany, analogicznie do *EV* – wartości wypracowanej,

$$ED = AD \times SPI,$$

*UDR* (Unearned Duration Remaining) – niewypracowany czas pozostały,  
*AD* (Actual Duration) – dotychczasowy czas realizacji,  
*PD* (Planned Duration) – planowany czas realizacji,  
*PF* (Performance Factor) – opisuje relację pomiędzy dotychczasowym i przyszłym postępowaniem robót.

W zależności od scenariusza, jaki zostanie przyjęty w obliczeniach, prognozowany czas końcowy można wyznaczyć jednym z podanych niżej wzorów:

### **Czas wykonania pozostałych robót będzie zgodny z planem.**

W tym podejściu zakłada się, że dotychczasowy trend postępu robót nie będzie kontynuowany. W tym przypadku należy przyjąć  $PF = 1$  a prognozowany czas zakończenia realizacji przedsięwzięcia będzie równy:

$$EDAC = AD + \frac{PD - ED}{1} = PD + AD(1 - SPI). \quad (31)$$

Wzór 31 oznaczono w dalszej części pracy jako ED1.

### **Czas wykonania pozostałych robót będzie zgodny z dotychczasowym trendem SPI.**

Wykonanie z przeszłości jest dobrym wyznacznikiem przyszłego wykonania. Problemy oraz możliwości z przeszłości będą miały wpływ na wykonanie w przyszłości. W tym przypadku  $PF = SPI$  a prognozowany czas zakończenia realizacji przedsięwzięcia będzie równy:

$$EDAC = AD + \frac{PD - ED}{SPI} = PD/SPI. \quad (32)$$

Wzór (32) oznaczono w dalszej części pracy jako ED2.

Vandevoorde i Vanhoucke (2006) zaproponowali rozwinięcie metody uwzględniając sytuację, gdy czas wykonania pozostałych robót będzie zgodny z dotychczasowym trendem *SCI*. W tym podejściu zakłada się, że koszty robót wykonanych do tej pory oraz problemy w realizacji przedsięwzięcia rzutują na przyszłe wykonanie robót:  $SCI = SPI \times CPI$ , gdzie *SCI* często zwane jest również *CR* (Critical Ratio Index). W tym przypadku  $PF = SCI$  a prognozowany czas zakończenia realizacji przedsięwzięcia będzie równy:

$$EDAC = AD + \frac{PD - ED}{SCI} = \frac{PD}{SCI} + AD \times \left(1 - \frac{1}{CPI}\right). \quad (33)$$

Wzór (33) oznaczono w dalszej części pracy jako ED3.

W sytuacji gdy nie zostanie dotrzymany planowany czas zakończenia przedsięwzięcia, *PD* w powyższej formule zastępuje się *AD*, wtedy wzory te przyjmują następujące postacie:

$$EDAC = AD + \frac{AD - ED}{1} = AD(2 - SPI). \quad (34)$$



Wzór oznaczono w dalszej części pracy jako ED1.

$$EDAC = AD + \frac{AD - ED}{SPI} = AD/SPI. \quad (35)$$

Wzór oznaczono w dalszej części pracy jako ED2.

$$EDAC = AD + \frac{AD - ED}{SCI} = AD \left( 1 - \frac{1}{CPI} + \frac{1}{SCI} \right). \quad (36)$$

Wzór oznaczono w dalszej części pracy jako ED3. (37)

Metoda ED również pomiar dodatkowego zaangażowania potrzebnego do realizacji przedsięwzięcia w ustalonym czasie *TCSPI* (To Complete Schedule Performance Index) w następujący sposób:

$$TCSPI = (PD - ED)/(PD - AD) \quad (38)$$

lub

$$TCSPI - LRS = (PD - ED)/(LRS - AD), \quad (39)$$

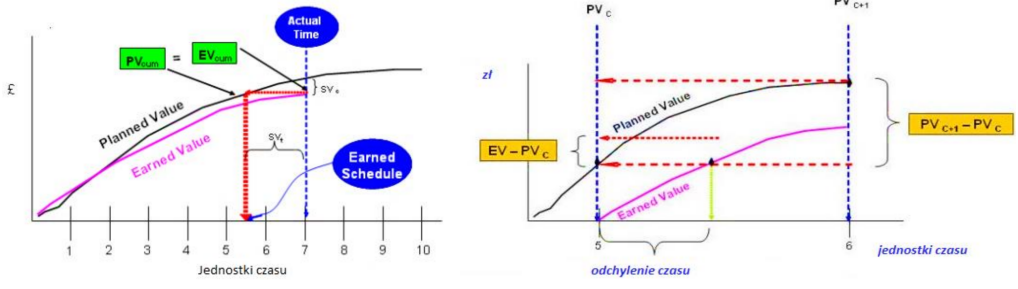
gdzie: *LRS* (Latest Revised Schedule) – najnowszy zrewidowany harmonogram, stosowany w sytuacji, gdy harmonogram bazowy został zmieniony (Vandevoorde i Vanhoucke, 2006).

#### 9.3.4. EARNED SCHEDULE (ES)

Metoda ES jest najbardziej popularną i najczęściej stosowaną metodą służącą do prognozowania terminu końcowego. W literaturze dostępnych jest bardzo wiele informacji na temat ES, a w Internecie powstała strona skupiająca wszelkie dostępne informacje związane z rozwijaniem i popularyzowaniem metody ES (Lipke, 2017).

W EVM, o czym już wcześniej wspomniano, wszystkie parametry obliczane są w jednostkach pieniężnych, nawet odchylenie harmonogramu, co utrudnia analizę i ocenę wyników. Dodatkowo w przypadku przedsięwzięcia zrealizowanego w czasie dłuższym niż planowany metoda wykazuje nieprawidłowość, tzn. pomimo że przedsięwzięcie zakończyło się z opóźnieniem, wyniki obliczeń wykazują, że zostało zrealizowane zgodnie z planem. Problemy te rozwiązuje wprowadzona w 2003 roku przez Lipke metoda Earned Schedule (ES). Stanowi ona rozwinięcie i uzupełnienie metody EVM, a do przeprowadzenia obliczeń nie są potrzebne dodatkowe dane, tylko wartości wskaźników z EVM. Wskaźniki wykonania przedstawione są w jednostkach czasu, dzięki czemu są łatwiejsze do interpretacji (rys. 1).

Dzięki pozytywnym wynikom metoda ta cieszy się dużym uznaniem. W listopadzie 2011 roku została dołączona do standardów PMI Practice Standard for Earned Value Management, jako załącznik „Schedule Analysis Using EVM Data” (<http://www.earnedschedule.com>, 2017).



Rys. 1. Wykresy krzywych PV i EV w odniesieniu do czasu, odchylenie harmonogramu SV(t) wyrażone w jednostkach czasu. Źródło: (<http://www.earnedschedule.com>, 2017).

Wszystkie parametry oraz wzory, za pomocą których prowadzone są obliczenia, zostały opisane w tabeli 1.

Tabela 1.

Parametry i wzory występujące w metodzie ES.  
 Źródło: (<http://www.earnedschedule.com>, 2017).

Parametry	Earned Schedule	EScum	$ES = C + I$
			Liczba zakończonych okresów (C) plus część niezakończona (I)
	Actual Time	ATcum	AT = liczba zrealizowanych okresów
Wskaźniki	Schedule Variance	SV(t)	$SV(t) = ES - AT$
		SV(t) %	$SV(t) \% = (ES - AT) / ES$
	Schedule Performance Index	SPI(t)	$SPI(t) = ES / AT$
	To Complete Schedule Performance Index	TSPI	$TSPI + (PD - ES) / (PD - AT)$
			$TSPI + (PD - ED) / (ED - AT)$
Prognoza	Independent Estimate at Completion (time)	IEAC(t)	$IEAC(t) = PD / SPI(t)$
			$IEAC(t) = AT + (PD - ES) / PF(t)$
	Variance at Completion	VAC(t)	$VAC(t) = PD - IEAC(t)$ lub ED

Dodatkowe parametry nieopisane w tabeli, a które występują w metodzie to:  
 PD (Planned Duration) – planowany czas realizacji przedsięwzięcia,  
 ED (Estimated Duration) – szacowany czas trwania,  
 PF(t) (Performance Factor (time-based)) – wskaźnik wykonania.

Szczegółowe rozwinięcie wzoru na wyznaczenie ES ma następującą postać:  
 $ES = Escum$ , gdzie  $Escum$  jest to suma liczby jednostek zakończonych  $PV(C)$  oraz jednostek niekompletnych  $PV(I)$  wykonanych dla aktualnego przyrostu EV ( $EScum = C + I$ )

$$I = (EV - PV_C) / (PV_{C+1} - PV_C)$$

Dokładny sposób wyznaczania ES,  $EScum$  opisany jest na stronie ES (Earned Schedule, 2017).

Metoda ES powstała, ponieważ zdaniem Lipke, w EVM większą uwagę zwraca się na koszty przedsięwzięcia, a nie na jego harmonogram. Ideą było stworzenie dla harmonogramu adekwatnej metody „Earned Schedule” jak dla kosztu przedsięwzięcia „Earned Value”, tylko z użyciem jednostek czasu. Zastosowane wskaźniki  $SV(t)$  oraz  $SPI(t)$  są analogiczne do wskaźników SV oraz SPI jednak odnoszą się do czasu przedsięwzięcia i wskazują prawidłowe wyniki w ostatniej fazie przedsięwzięcia, zarówno dla przedsięwzięć kończących się wcześniej, jak i później niż w opracowanym na początku harmonogramie robót (Lipke, 2003).

Sposób prognozowania terminu zakończenia przedsięwzięcia został przedstawiony poniżej. Wyróżniono dwie możliwe sytuacje decyzyjne, dla których opracowano następujące zależności:

**1. Roboty pozostałe realizowane będą zgodnie z planem:**

$$IEAC = AD + (PD - ES)/PF(t), \quad (40)$$

wzór oznaczono w dalszej części pracy jako ES1.

**2. Roboty pozostałe realizowane będą zgodnie z dotychczasowym trendem SPI**

$$IEAC = \frac{PD}{SPI(t)}, \quad EAC(t) = AD + (PD - ES)/SPI(t). \quad (41)$$

Wzór (41) oznaczono w dalszej części pracy jako ES2.

$TSPI$  (To Schedule Performance Index) wyznaczany może być za pomocą dwóch wzorów:

- Gdy przedsięwzięcie realizowane jest planowo:

$$TSPI = (PD - ES)/(PD - AT); \quad (42)$$

- Gdy przedsięwzięcie realizowane jest dłużej niż planowano, wtedy  $ED > PD$  i zastępuje we wzorze  $PD$ :

$$TSPI = (PD - ES)/(ED - AT). \quad (43)$$

W propozycji rozwinięcia metody przez Vandevoorde i Vanhoucke (2006) wprowadzony został dodatkowy wzór w sytuacji, gdy przedsięwzięcie realizowane jest zgodnie z dotychczasowym trendem  $SCI(t)$ :

$$IEAC = AD + \frac{PD - ES}{CPI \times SPI(t)} = AD + (PD - ES)/SCI(t). \quad (44)$$

Wzór (44) oznaczono w dalszej części pracy jako ES3.

### 9.3.5. WZORY ZAPROPONOWANE PRZEZ ATHEY

Dodatkowe dwie propozycje wzorów na wyznaczenie terminu końcowego inwestycji proponowane są w publikacji Athey (2007).

Traktując  $ST$  (Scheduled Time) jako planowany czas zakończenia realizacji oraz  $AT$  (Actual Time) jako aktualny czas realizacji, szacowany czas wyniesie:

- Przy założeniu, że dotychczasowy trend będzie utrzymany:

$$ET = ST/SPI \quad (45)$$

– wzór (45) oznaczono w dalszej części pracy jako ET1.

- Przy założeniu, że dalsza realizacja będzie postępowała zgodnie z harmonogramem:

$$ET = AT + (100\% - PC) \times ST \quad (46)$$

– wzór (46) oznaczono w dalszej części pracy jako ET2.

## 9.4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

### 9.4.1. SPOSÓB WYKONYWANIA OBLICZEŃ

Na wybranej i zrealizowanej inwestycji budynku biurowego w Polsce przeprowadzone zostały obliczenia z wykorzystaniem Metody Wartości Wypracowanej (EVM) oraz jej rozwinięć. Badania prowadzone były z punktu widzenia wykonawcy inwestycji. Wartość robót wynosiła około 14 mln zł, realizacja miała miejsce w latach 2010–2011. Inwestycja zakończona została 3 miesiące po planowanym terminie, a budżet został przekroczony o około 5%.

Dane potrzebne do przeprowadzenia analiz pozyskano bezpośrednio od wykonawcy inwestycji po jej zakończeniu. Otrzymane dane zostały przeanalizowane, uporządkowane oraz dostosowane do przeprowadzenia analiz z wykorzystaniem metody EVM. Roboty w strukturze WBS zostały podzielone na siedem grup zgodnie z zestawieniem przedstawionym w tabeli 2. Podczas realizacji inwestycja nie była kontrolowana z zastosowaniem opisywanych metod.

Tabela 2.

Struktura WBS realizacji robót, poziom pierwszy. Źródło: opracowanie własne.

WBS	Opis zadania	Czas realizacji	Data rozpoczęcia	Data zakończenia
1	Obiekt usługowy	304 dni	2010-02-01	2011-03-31
1.1	Organizacja i utrzymanie placu budowy	304 dni	2010-02-01	2011-03-31
1.2	Roboty przygotowawcze / rozbiórki / wycinki	40 dni	2010-02-01	2011-03-26
1.3	Roboty budowlane	260 dni	2010-03-08	2011-03-04
1.4	Instalacje sanitarne	238 dni	2010-04-01	2011-02-28
1.5	Sieci zewnętrzne	175 dni	2010-03-01	2010-10-29
1.6	Instalacje elektryczne	195 dni	2010-06-14	2011-03-11
1.7	Roboty zewnętrzne	25 dni	2010-10-11	2010-11-14

Na podstawie dostępnych informacji o rzeczywistym koszcie i zaawansowaniu robót wyznaczone zostały odchylenia kosztu ( $CV$ ) i harmonogramu ( $SV$ ) oraz wskaźniki wykorzystania kosztu ( $CPI$ ) i wykonania harmonogramu ( $SPI$ ).

Na podstawie danych z analizy  $EVM$  w miesięcznych okresach weryfikacyjnych przeprowadzono analizę w zakresie prognozy kosztu oraz terminu końcowego.

#### 9.4.2. PROGNOZA KOSZTU KOŃCOWEGO

Przytoczone dostępne wzory do prognozowania kosztu końcowego zebrane zostały w tabeli 3.

Tabela 3.

Zastawienie wzorów do prognozowania kosztu końcowego  $EAC$ .

Źródło: opracowanie własne.

Indeks wzoru	Wzór	Numer wzoru
<b>Webb (2003)</b>		
$EAC\ 1$	$EAC1 = AC + (BAC - EV)/CPI$	(1)
$EAC\ 2$	$EAC2 = AC + (BAC - EV)/(0,5CPI + 0,5SPI)$	(2)
$EAC\ 3$	$EAC3 = AC + (BAC - EV)/(CPI \times SPI)$	(3)
<b>Anbari (2003)</b>		
$EAC\ 4$	$EAC4 = AC + ETC$	(12)
$EAC\ 5$	$EAC5 = AC + BAC - EV$	(13)
$EAC\ 6$	$EAC6 = BAC/CPI$	(14)
<b>Heinze (1996)</b>		
$EAC\ 7$	$EAC7 = BAC/(CPI \times SPI)$	(16)
<b>Fleming i Koppelman (2000)</b>		
$EAC\ 7$	$EAC7 = BAC/CR$	(17)
<b>Department of Energy USA (2003)</b>		
$EAC\ 4$	$EAC4 = AC + ETC$	(7)
$EAC\ 8$	$EAC8 = AC/EV \times BAC$	(8)
$EAC\ 6$	$EAC6 = BAC/CPI$	(9)
$EAC\ 9$	$EAC9 = (AC/EV) \times WCP + CWNB$	(10)
$EAC\ 10$	$EAC10 = AC + (1/(CPI(BAC - EV)))$	(11)
<b>Athey (2007)</b>		
$EAC\ 11$	$EAC11 = AC + RB/(CPI \times SPI)$	(4)
$EAC\ 12$	$EAC12 = AC + RB/CPI$	(5)
$EAC\ 13$	$EAC13 = AC + RB/1$	(6)

Do poszczególnych wzorów przypisano indeksy, aby w obliczeniach móc posługiwać się tylko symbolami. Część wzorów proponowanych przez poszczególnych autorów daje takie same wyniki, dlatego niektóre użyte symbole powtarzają się (wiersze z powtarzającymi się w tabeli 3 wzorami oznaczone zostały kolorem

ciemnoszarym). Po przeanalizowaniu dostępnych wzorów przyjęto następujące założenia w zakresie wyznaczania parametrów do obliczeń prognoz:

- Budżet robót niezrealizowanych został wyznaczony na podstawie wzoru:  
 $RB = ETC = BAC - EV$ .
- Roboty zakończone i w trakcie realizacji przyjęte zostały jako:  
 $Work Completed and in Progress = EV$ .
- Koszt robót, które jeszcze nie zostały rozpoczęte, wyznaczono jako:  
 $Cost of work not yet begun = BAC - EV$ .

Powyższe założenia spowodowały, że kolejna część wzorów przyjęła takie same wartości. Zostały one zaznaczone na jasnoszaro w tabeli 3 i są to wzory oznaczone indeksami:  $EAC 4$ ,  $EAC 9$ ,  $EAC 13$ . W związku z powyższym do wyznaczenia prognozy kosztu końcowego w analizowanych przykładach finalnie wykorzystane zostały wzory zamieszczone w tabeli 4.

Tabela 4.

Finalne zestawienie wzorów do prognozy kosztu końcowego  $EAC$ .

Źródło: opracowanie własne.

Indeks wzoru	Wzór	Podejście	Numer wzoru
<b>Webb (2003)</b>			
EAC 1	$EAC1 = AC + (BAC - EV)/CPI$	Realizacja robót zgodnie z dotychczasowym trendem $CPI$	(1)
EAC 2	$EAC2 = AC + (BAC - EV)/(0,5CPI + 0,5SPI)$		(2)
EAC 3	$EAC3 = AC + (BAC - EV)/(CPI \times SPI)$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI \times SPI$	(3)
<b>Anbari (2003)</b>			
EAC 5	$EAC5 = AC + BAC - EV$	Realizacja robót zgodnie z planem	(13)
EAC 6	$EAC6 = BAC/CPI$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI$	(14)
<b>Heinze (1996)</b>			
EAC 7	$EAC7 = BAC/(CPI \times SPI)$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI \times SPI$	(16)
<b>Department of Energy USA (2003)</b>			
EAC 8	$EAC8 = AC/EV \times BAC$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI$	(8)
EAC 10	$EAC10 = AC + (1/(CPI(BAC - EV)))$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI$	(11)
<b>Athey (2007)</b>			
EAC 11	$EAC11 = AC + RB/(CPI \times SPI)$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI \times SPI$	(4)
EAC 12	$EAC12 = AC + RB/CPI$	Realizacja robót zgodnie z panującym trendem $CPI$	(5)

W zależności od szczegółowości posiadanych danych oraz potrzeb zaproponowane zostało przeprowadzenie analiz w dwóch wariantach:

- wariant I – prognoza kosztu wyznaczana była dla pozycji zbiorczej,
- wariant II – prognoza kosztu wyznaczana była jako suma prognoz pozycji szczegółowych.

W obliczeniach i ich interpretacji przypisane do wzorów *EAC* symbole I lub II oznaczają przyjęty wariant I lub II.

Proponowane wzory prognozowania kosztu końcowego podzielone zostały na trzy grupy, w zależności od przyjętego scenariusza realizacji robót:

- zgodnie z dotychczasowym trendem *CPI* (*EAC* 1, 6, 8, 10, 12),
- zgodnie z dotychczasowym trendem *SPI* × *CPI* (*EAC* 3, 7, 11),
- zgodnie z planem (*EAC* 5).

Wyniki obliczeń zinterpretowane zostały pod kątem otrzymanych wyników i kształtu krzywych uzyskanych na podstawie poszczególnych wzorów obliczeniowych oraz w odniesieniu do przyjętych scenariuszy realizacji robót.

#### 9.4.3. PROGNOZA TERMINU KOŃCOWEGO

Prognoza terminu końcowego została wykonana na podstawie zestawienia zaprezentowanego w tabeli 5.

Tabela 5.

Zestawienie wzorów do prognozowania terminu końcowego inwestycji.  
Źródło: opracowanie własne.

Indeks wzoru	Wzór	Podejście	Numer wzoru
<b>The Planned Value Method (Anbari, 2003)</b>			
PV1	$EAC(t)PV1 = SAC - TV$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z planem	(20)
PV2	$EAC(t)PV2 = PD/SPI$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem <i>SPI</i>	(22)
PV3	$EAC(t)PV3 = PD/SCI$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem <i>SCI</i>	(24)
<b>The Earned Duration Method (Jacob and Kane, 2004)</b>			
ED1	$EAC(t)ED1 = AD + \frac{PD - ED}{1}$ $= PD + AD \times (1 - SPI)$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z planem; <i>PF</i> = 1	(31)
ED2	$EAC(t)ED2 = AD + (PD - ED)/SPI = PD/SPI$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem <i>SPI</i> ; <i>PF</i> = <i>SPI</i>	(32)
ED3	$EAC(t)ED3 = AD + \frac{PD - ED}{SCI}$ $= \frac{PD}{SCI} + AD \left(1 - \frac{1}{CPI}\right)$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem <i>SCI</i> ; <i>PF</i> = <i>SCI</i>	(33)

Tabela 5. [cd.]

	$ED = AD \times SPI$		
<b>The Earned Schedule method (Lipke, 2003)</b>			
	$EAC(T)ES = AD + (PD - ES)/PF$		(40)
ES1	$EAC(T)ES1 = AD + \frac{PD - ES}{1}$ $= AD + (PD - ES)$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z planem; $PF = 1$	(40)
ES2	$EAC(t)ES2 = AD + (PD - ES)/SPI(t)$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem $SPI$ ; $PF = SPI(t)$	(41)
ES3	$EAC(t)ES3 = AD + \frac{PD - ES}{CPI \times SPI(t)}$ $= AD + (PD - ES)/SCI(t)$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem $SCI$ ; $PF = SCI(t)$	(44)
<b>Athey (2007)</b>			
ET1	$ET1 = \frac{ST}{SPI} = PD/SPI$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem $SPI$	(45)
ET2	$ET2 = AT + (100\% - PC) \times ST$ $= AT + (100\% - PC) \times PD$	Realizacja pozostałych robót zgodnie z dotychczasowym trendem $SPI$	(46)

Prognozy terminu końcowego inwestycji wyznaczano tylko w jednym wariantcie, tj. dla pozycji zbiorczej.

Proponowane wzory prognozowania terminu końcowego podzielone zostały na trzy grupy, w zależności od przyjętego scenariusza realizacji robót:

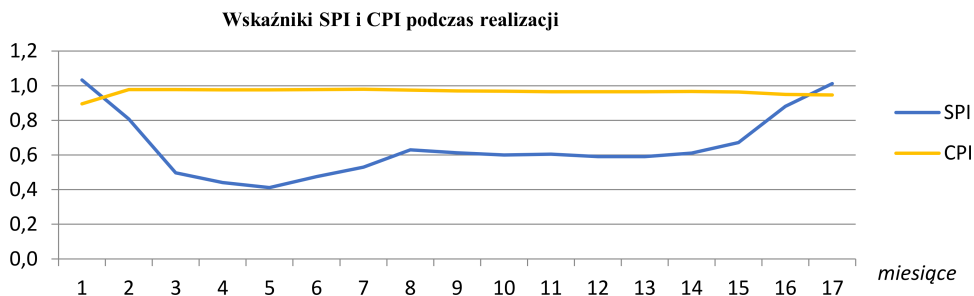
- Roboty będą realizowane zgodnie z planem (PV1, ED1, ES1).
- Roboty będą realizowane zgodnie z dotychczasowym trendem  $SPI$  (PV2, ED2, ES2, ET1, ET2).
- Roboty będą realizowane zgodnie z dotychczasowym trendem  $SCI$  ( $CPI \times SPI$ ) (PV3, ED3, ES3).

Interpretację uzyskanych wyników w zależności od przyjętego scenariusza realizacji robót i konkretnej formuły obliczeniowej podano poniżej.

#### 9.4.4. WYNIKI OBLICZEŃ

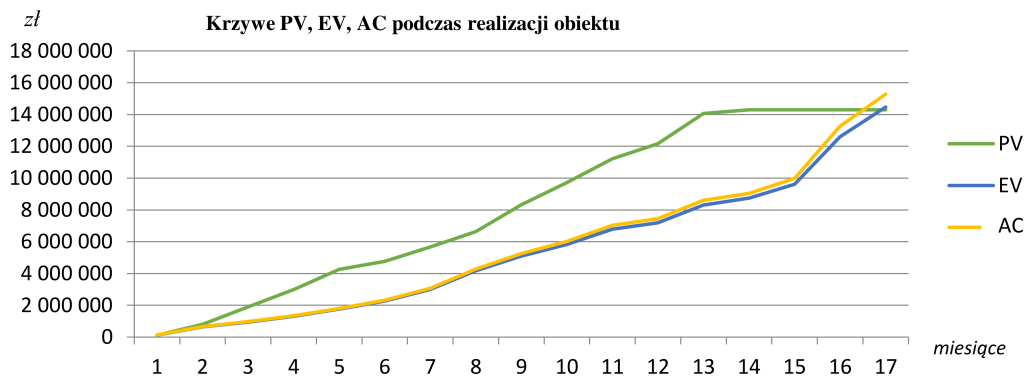
Przeprowadzona analiza  $EVM$  wykazała, że przedsięwzięcie przez cały okres realizacji było wykonywane w tempie wolniejszym niż planowano. Do 8 miesiąca realizacji dotychczasowy postęp robót (wyrażony w PLN) wynosił nawet do 69% zakładanego zaawansowania robót, tj. wskaźnik  $SPI$  wynosił 0,41. Później nastąpiło nieznaczne przyspieszenie tempa realizacji, ale wskaźnik  $SPI$  utrzymywał się przez większość czasu na poziomie 0,6. Przedsięwzięcie finalnie zostało zakończone 3 miesiące po terminie (rys. 2).





Rys. 2. Rozkład wskaźników *SPI* i *CPI* w trakcie realizacji obiektu. Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

Zaobserwowano, że koszt w toku realizacji przekraczał wartości planowane o mniej niż 5%. Na wykresie (rys. 3) można zaobserwować, że krzywe *EV* i *AC* przyjmują bardzo podobny kształt, jednak źle oszacowane koszty powodują, że krzywe od miesiąca 9. nieznacznie się rozwidlają. Obie krzywe w znaczący sposób odbiegają od planowanej krzywej *PV* (rys. 3).



Rys. 3. Wartości *PV*, *EV* i *AC* w kolejnych miesiącach realizacji przedsięwzięcia. Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

Główne przyczyny zakończenia inwestycji z takim wynikiem to:

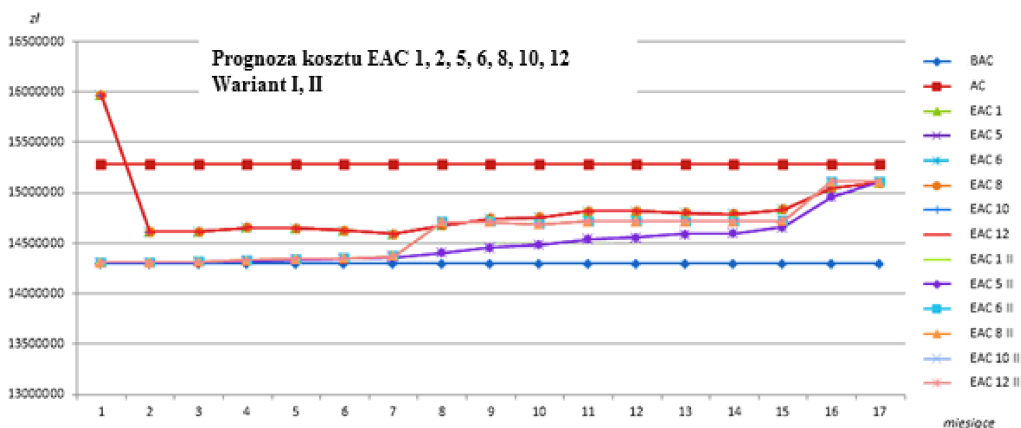
- źle oszacowany czas realizacji przedsięwzięcia inwestycji (każdy miesiąc realizacji ponad zakładany termin to również straty w zakresie kosztów pośrednich związanych m.in. z utrzymaniem placu budowy i kadry w wysokości około 57 tys. zł),
- źle oszacowany planowany budżet na wykonanie wybranych zadań – głównie robót żelbetowych, montażu stolarki drzwiowej i okiennej, robót wykończeniowych i obudowy elewacji, instalacji sanitarnych i elektrycznych,
- duże trudności w realizacji robót żelbetowych, spowodowane złą organizacją pracy podwykonawcy.

## Prognoza kosztu końcowego

Prognozę kosztu końcowego w poszczególnych miesiącach wyznaczano dla wariantu I i II. Zestawienia obliczeń dla poszczególnych wariantów przedstawione zostały w tabelach 6 i 7.

Przeprowadzone obliczenia wykazują, że prognoza przeprowadzona na poziomie pozycji zbiorczej jest bardziej wiarygodna, niż wyznaczana jako suma prognoz pozycji szczegółowych.

Dla analizowanego przykładu koszt końcowy najdokładniej prognozowany jest przez krzywe *EAC* 1, 6, 8, 10, 12 (rys. 4), czyli krzywe wyznaczone za pomocą wzorów uwzględniających dotychczasowy trend wskaźnika *CPI*. Wzory dla krzywych uwzględniających dotychczasowy trend wskaźników  $SPI \times CPI$  wyznaczają krzywe o wartościach bardzo dużych, znacznie odbiegających od kosztu rzeczywistego. Ten scenariusz realizacji dla obiektu realizowanego z dużym opóźnieniem czasowym, przy nieznacznie wyższych kosztach, nie przyniesie wiarygodnej prognozy kosztu końcowego.



Rys. 4. Wykres prognozy kosztu *EAC* (wzory *EAC* 1, 2, 5, 6, 8, 10, 12 w wariantach I i II).  
Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

## Prognoza terminu końcowego

Ponieważ w analizowanym przykładzie przedsięwzięcie w całym okresie było realizowane wolniej niż zakładano można byłoby na tej podstawie przypuszczać, że adekwatne w tym przypadku może być zastosowanie wzorów uwzględniających występujący trend *SPI* i/lub *CPI*. Jednak wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistego terminu realizacji otrzymane zostały dla prognoz ze scenariusza realizacji zgodnie z planem oraz wzoru ET2, przy czym najbardziej wiarygodna okazała się prognoza wyznaczana na podstawie wzoru ES1 (rys. 5). Wyniki dla prognoz uwzględniających trend *SPI* oraz trend  $CPI \times SPI$  zdeterminowanym dużym odchyleniem terminów rzeczywistych od planowanych, utrzymującym się przez cały

Tabela 6.

Zestawienie obliczeń prognozy kosztu końcowego, wariant I. Źródło: opracowanie własne (Ziołkowska, 2015).

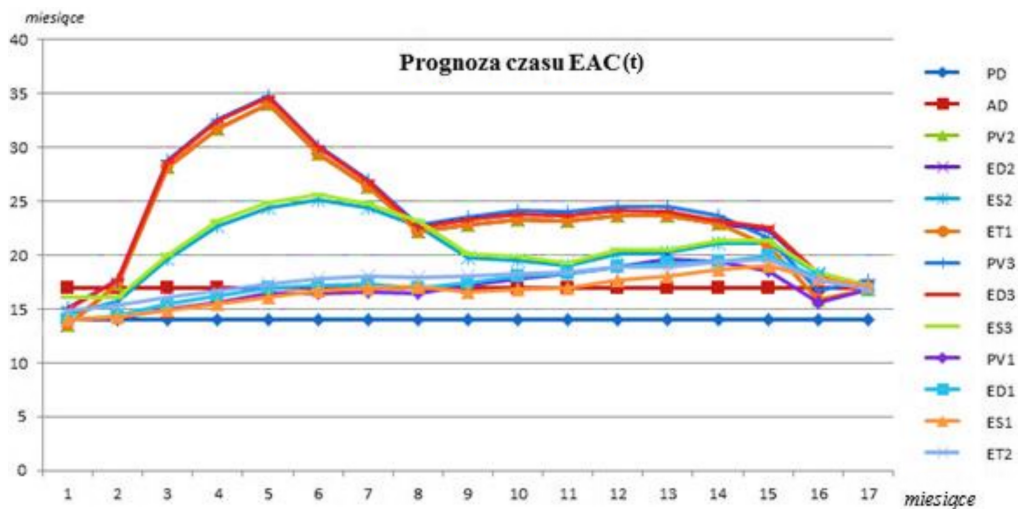
Raport	EAC 1	EAC 2	EAC 3	EAC 5	EAC 6	EAC 7	EAC 8	EAC 10	EAC 11	EAC 12
1	15 967 508	15 465 291	61 449 030	14 311 070	15 967 508	15 460 933	15 967 508	15 967 508	15 465 291	15 967 508
2	14 614 352	17 947 951	69 807 763	14 311 070	14 614 352	18 105 957	14 614 352	14 614 352	17 947 951	14 614 352
3	14 614 810	28 392 897	110 660 397	14 317 818	14 614 810	29 372 800	14 614 810	14 614 810	28 392 897	14 614 810
4	14 657 202	31 521 446	122 035 711	14 329 900	14 657 202	33 232 338	14 657 202	14 657 202	31 521 446	14 657 202
5	14 648 087	33 001 491	126 607 864	14 339 860	14 648 087	35 571 748	14 648 087	14 648 087	33 001 491	14 648 087
6	14 628 866	28 184 081	105 766 557	14 349 448	14 628 866	30 743 259	14 628 866	14 628 866	28 184 081	14 628 866
7	14 594 876	24 821 246	90 088 683	14 359 324	14 594 876	27 540 221	14 594 876	14 594 876	24 821 246	14 594 876
8	14 679 675	20 801 158	70 357 370	14 408 420	14 679 675	23 322 473	14 679 675	14 679 675	20 801 158	14 679 675
9	14 743 796	20 728 605	67 138 838	14 456 158	14 743 796	24 046 517	14 743 796	14 743 796	20 728 605	14 743 796
10	14 754 355	20 591 858	64 322 527	14 483 271	14 754 355	24 609 577	14 754 355	14 754 355	20 591 858	14 754 355
11	14 819 429	19 921 337	58 596 634	14 544 653	14 819 429	24 525 301	14 819 429	14 819 429	19 921 337	14 819 429
12	14 816 460	19 904 672	57 248 854	14 558 275	14 816 460	25 059 781	14 816 460	14 816 460	19 904 672	14 816 460
13	14 803 735	19 111 512	50 659 481	14 591 099	14 803 735	25 075 804	14 803 735	14 803 735	19 111 512	14 803 735
14	14 790 947	18 437 411	46 607 975	14 599 016	14 790 947	24 181 135	14 790 947	14 790 947	18 437 411	14 790 947
15	14 835 689	17 199 014	38 858 108	14 659 253	14 835 689	22 055 387	14 835 689	14 835 689	17 199 014	14 835 689
16	15 052 497	15 293 978	21 387 274	14 962 639	15 052 497	17 083 596	15 052 497	15 052 497	15 293 978	15 052 497
17	15 100 362	15 102 498	14 566 953	15 109 976	15 100 362	14 921 847	15 100 362	15 100 362	15 102 498	15 100 362

Tabela 7.

Zestawienie obliczeń prognozy kosztu końcowego, wariant II. Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

Raport	EAC 1 II	EAC 2 II	EAC 3 II	EAC 5 II	EAC 6 II	EAC 7 II	EAC 8 II	EAC 10 II	EAC 11 II	EAC 12 II
1	14 311 070	14 344 788	16 991 475	14 311 070	14 311 070	14 364 241	14 311 070	14 311 070	14 344 788	14 311 070
2	14 311 070	14 362 913	16 767 446	14 311 070	14 311 070	14 406 120	14 311 070	14 311 070	14 362 913	14 311 070
3	14 318 173	14 307 250	16 199 604	14 317 818	14 318 173	14 318 405	14 318 173	14 318 173	14 307 250	14 318 173
4	14 334 360	14 437 522	16 843 371	14 329 900	14 334 360	14 561 629	14 334 360	14 334 360	14 437 522	14 334 360
5	14 345 014	14 528 161	17 119 461	14 339 860	14 345 014	14 689 971	14 345 014	14 345 014	14 528 161	14 345 014
6	14 352 116	14 430 847	16 420 097	14 349 448	14 352 116	14 560 243	14 352 116	14 352 116	14 430 847	14 352 116
7	14 370 442	18 667 839	35 305 228	14 359 324	14 370 442	19 517 155	14 370 442	14 370 442	18 667 839	14 370 442
8	14 710 721	65 960 341	235 963 840	14 408 420	14 710 721	67 985 185	14 710 721	14 710 721	65 960 341	14 710 721
9	14 710 721	26 579 964	78 966 628	14 456 158	14 710 721	29 188 539	14 710 721	14 710 721	26 579 964	14 710 721
10	14 686 847	21 014 150	52 534 748	14 483 271	14 686 847	23 066 135	14 686 847	14 686 847	21 014 150	14 686 847
11	14 715 137	22 381 995	57 924 473	14 544 653	14 715 137	25 379 509	14 715 137	14 715 137	22 381 995	14 715 137
12	14 715 137	23 449 964	61 734 203	14 558 275	14 715 137	26 794 397	14 715 137	14 715 137	23 449 964	14 715 137
13	14 715 137	19 872 855	44 798 274	14 591 099	14 715 137	22 853 433	14 715 137	14 715 137	19 872 855	14 715 137
14	14 715 137	18 312 036	37 199 899	14 599 016	14 715 137	21 011 091	14 715 137	14 715 137	18 312 036	14 715 137
15	14 721 966	17 913 292	32 918 631	14 659 253	14 721 966	19 723 745	14 721 966	14 721 966	17 913 292	14 721 966
16	15 109 976	16 555 071	25 698 087	14 962 639	15 109 976	18 157 648	15 109 976	15 109 976	16 555 071	15 109 976
17	15 109 976	15 140 159	14 717 600	15 109 976	15 109 976	14 969 123	15 109 976	15 109 976	15 140 159	15 109 976

okres realizacji, obarczone są dużym błędem. Zestawienie zbiorcze wyników dla przeprowadzonych obliczeń zaprezentowane zostało w tabeli 8.



Rys. 5. Wykres prognoz terminu  $EAC(t)$ . Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

Tabela 8.

Zestawienie obliczeń prognozy terminu końcowego. Źródło: opracowanie własne (Ziółkowska, 2015).

Raport	PD	AD	PV1	PV2	PV3	ED1	ED2	ED3	ES1	ES2	ES3	ET1	ET2
1	14	17	14,00	13,56	15,14	13,97	13,56	15,02	14,03	14,47	16,05	13,56	14,88
2	14	17	14,15	17,34	17,73	14,39	17,34	17,69	14,23	15,79	16,09	17,34	15,37
3	14	17	14,94	28,14	28,76	15,51	28,14	28,70	14,87	19,69	20,06	28,14	16,07
4	14	17	15,63	31,74	32,54	16,24	31,74	32,44	15,53	22,71	23,18	31,74	16,71
5	14	17	16,46	34,00	34,83	16,94	34,00	34,71	16,14	24,45	24,93	34,00	17,28
6	14	17	16,45	29,42	30,11	17,14	29,42	29,97	16,66	25,18	25,62	29,42	17,78
7	14	17	16,61	26,42	26,97	17,29	26,42	26,82	16,99	24,42	24,78	26,42	18,06
8	14	17	16,40	22,24	22,84	16,96	22,24	22,62	17,07	22,73	23,13	22,24	17,92
9	14	17	17,15	22,83	23,55	17,48	22,83	23,27	16,63	19,79	20,13	22,83	18,01
10	14	17	17,81	23,35	24,10	18,00	23,35	23,78	16,83	19,53	19,83	23,35	18,29
11	14	17	18,35	23,17	24,02	18,35	23,17	23,61	16,91	19,03	19,32	23,17	18,36
12	14	17	18,87	23,68	24,54	18,91	23,68	24,10	17,66	20,15	20,45	23,68	18,95
13	14	17	19,64	23,71	24,56	19,33	23,71	24,09	18,01	20,24	20,50	23,71	18,87
14	14	17	19,44	22,89	23,68	19,44	22,89	23,20	18,70	21,06	21,31	22,89	19,44
15	14	17	18,58	20,81	21,60	19,91	22,30	22,57	19,07	21,16	21,39	20,81	19,58
16	14	17	15,66	15,89	16,73	17,90	18,16	18,27	17,77	18,32	18,44	15,89	17,66
17	14	17	16,83	16,80	17,74	16,80	16,80	16,79	17,22	17,22	17,22	16,80	16,80

## 9.5. OCENA METOD PROGNOZOWANIA

Celem przeprowadzonych obliczeń w zakresie prognozy terminu i kosztu była weryfikacja, czy dostępne w literaturze wzory mają zastosowanie przy prognozowaniu przedsięwzięć budowlanych oraz czy przynoszą pożądane wyniki. W obu zakresach (zarówno kosztu, jak i terminu) przeanalizowano dostępne wzory pod kątem założonych scenariuszy realizacji robót dotychczas niezrealizowanych.

W przeprowadzonych badaniach przeprowadzone zostały obliczenia jeszcze dla czterech obiektów. Jeden z nich zrealizowany został w założonym budżecie i czasie, jeden zrealizowany z przekroczeniem planowanego terminu i budżetu, jeden zrealizowany w założonym terminie, powyżej budżetu oraz jeden w trakcie realizacji. Z wszystkich przeanalizowanych obiektów otrzymano następujące wyniki:

### **W zakresie prognozy kosztu:**

- W początkowym okresie realizacji, tj. około 0–1/3 cyklu budowy, prognozy nie dają wiarygodnych wyników. Prognozy stabilizują się dopiero po upływie tego czasu.
- Dla obiektów zrealizowanych zgodnie z planem w zakresie kosztu i terminu w okresie 1/3–2/3 czasu realizacji sprawdziła się prognoza zgodna z planem (EAC 5) oraz w okresie 2/3–3/3 realizacji prognoza uwzględniająca dotychczasowy trend *CPI* (EAC 1, 6, 8, 10, 12).
- Dla obiektów zrealizowanych z przekroczeniem założonego terminu realizacji i powyżej założonego budżetu sprawdzają się prognozy zgodne z dotychczasowym trendem *CPI* (EAC 1, 6, 8, 10, 12).
- Dla obiektów zrealizowanych zgodnie z harmonogramem, ale z przekroczeniem budżetu sprawdziła się prognoza zgodna z dotychczasowym trendem  $SPI \times CPI$  (EAC 7).

### **W zakresie prognozy terminu:**

- W większości analizowanych przykładów w pierwszym okresie realizacji (1/3 cyklu budowy) sprawdziły się prognozy uwzględniające dalszą realizację zgodną z planem i ze wzorem ET2.
- W kolejnych okresach realizacji termin końcowy najlepiej wyznaczają prognozy ES, proponowane przez Lipke (2003).
- Dla analizowanych przykładów w większości przypadków najlepiej sprawdziła się metoda ES1 (scenariusz realizacji zakładający dalszą realizację zgodną z planem).

W tabeli 9 przedstawiono zestawienie zawierające wyniki najbardziej wiarygodne dla badanych obiektów w zakresie kosztu i terminu końcowego w podziale na tercje cyklu budowy. Kolorami, zgodnie z legendą, oznaczono poszczególne scenariusze realizacji robót. Za wyniki najbardziej wiarygodne przyjęto wyniki najbardziej zbliżone do wartości finalnych.

Tabela 9.

Zestawienie najbardziej wiarygodnych prognoz kosztu i terminu w podziale czasu realizacji na tercje. Źródło: opracowanie własne.

Objekt	Koszt rzeczywisty	Termin realizacji	Prognoza kosztu końcowego <i>EAC</i>			Prognoza terminu końcowego <i>EAC(t)</i>		
			0-1/3	1/3-2/3	2/3-3/3	0-1/3	1/3-2/3	2/3-3/3
1	Zgodny z planem	Zgodny z planem	<i>EAC</i> 5	<i>EAC</i> 5	<i>EAC</i> 5	ET2, ES1 (PV1, ED1)	ES1, PV1, PV2, ED1, ED2, ES2, ET1	PV1, PV2, ED1, ED2, ET1
2	Wyższy	Dłuższy	<i>EAC</i> 5	<i>EAC</i> 1, 6, 8, 10, 12	<i>EAC</i> 1, 6, 8, 10, 12 ( <i>EAC</i> 5)	ET2 (ES3)	PV3	ES1, ES2, ES3
3	Wyższy	Zgodny z planem	<i>EAC</i> 5	<i>EAC</i> 7	<i>EAC</i> 7	ES1 (PV1)	ES1	ES1 (PV1, ED1)
4	-	Dłuższy						
5	Wyższy	Dłuższy	<i>EAC</i> 1, 6, 8, 10, 12	<i>EAC</i> 1, 6, 8, 10, 12	<i>EAC</i> 1, 6, 8, 10, 12	ET2	ES1	ES1

<i>BAC</i>	zgodnie z planem bazowym <i>BAC</i>
<i>CPI</i>	zgodnie z dotychczasowym trendem <i>CPI</i>
<i>CPI</i> × <i>SPI</i>	zgodnie z dotychczasowym trendem <i>CPI</i> × <i>SPI</i>
	zgodnie z ET2
<i>SPI</i>	zgodnie z dotychczasowym trendem <i>SPI</i>

Przeprowadzone obliczenia, przy uwzględnieniu szeregu uwag i rozwiązań zaproponowanych w pracy doktorskiej (Ziółkowska, 2015) w zakresie przygotowania danych wejściowych do obliczeń oraz sposobu zbierania i obróbki danych uzyskiwanych podczas kolejnych aktualizacji, pozwalają stwierdzić, że jest możliwe wiarygodne, bieżące monitorowanie przedsięwzięcia budowlanego oraz wykonywanie na tej podstawie prognoz podczas jego realizacji w zakresie kosztu i czasu za pomocą wybranych metod i wzorów obliczeniowych. Przeprowadzone obliczenia wykazują, że prognozy są bardzo wrażliwe na dane wejściowe i odzwierciedlają w prognozie każde odchylenie od planu występujące podczas realizacji (im większe odchylenie przedsięwzięcia od planu, tym wyższa prognoza, im większe wahania pomiędzy poszczególnymi raportami, tym większe wahania na wykresie prognoz).

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają zasadność stosowania wskazanych w artykule wzorów, za pomocą których prognozowany był koszt końcowy, przy założeniu poszczególnych scenariuszy realizacji robót pozostających do wykonania. Dla obiektów realizowanych zgodnie z planem sprawdza się prognoza zakładająca taką zgodność (wzór EAC 5). W przypadku wystąpienia podczas realizacji odchylenia, zarówno w zakresie kosztu, jak i czasu, w zależności od tego, która różnica jest większa, znajdzie zastosowanie jeden ze scenariuszy realizacji robót: zgodnie z dotychczasowym trendem wskaźnika *CPI* (wzory EAC 1, 6, 8, 10, 12) lub zgodnie z wartościami wskaźników *SPI* × *CPI* (wzór EAC 7). Dla obiektu zrealizowanego zgodnie z planem i powyżej budżetu, sprawdza się prognoza podążająca za dotychczasowym trendem wskaźników *SPI* × *CPI* (wzór EAC 7). Słuszność zaproponowanych rozwiązań należy zweryfikować na większej liczbie obiektów.

W zakresie prognozy terminu potwierdzone zostały dostępne w literaturze informacje (dotyczące jednak głównie innego typu przedsięwzięć niż budowlane), że dla większości przykładów najbardziej wiarygodne wyniki po ustabilizowaniu się prognozy otrzymywane są za pomocą wzorów ES. Dla obiektu realizowanego zgodnie z planem najbardziej wiarygodne są prognozy uwzględniające dalszą realizację zgodną z planem oraz prognozy ET1. W przypadku wystąpienia odchyleń podczas realizacji w zakresie czasu i kosztu najbardziej wiarygodne są prognozy ES (głównie ES1) oraz prognoza ET2.

Zasadnicze znaczenie dla wykonania prawidłowej prognozy ma założenie poprawnego scenariusza postępów robót w przyszłości. Czym kierownik projektu będzie w stanie precyzyjniej oszacować realistyczny plan dalszych robót, tym obliczona prognoza będzie bardziej precyzyjna. Jak już wspomniano, należy unikać optymistycznych prognoz, nie posiadających uzasadnienia w realiach na budowie. Warto również przygotować kilka prognoz, na podstawie różnej perspektywy postępu dalszych robót. Pozwoli to kadrze zarządzającej porównać uzyskane wyniki, przeanalizować ich wrażliwość na dalszy rozwój wypadków i przygotować się na ewentualne opóźnienie i/lub wzrost kosztów.



Wykonując obliczenia zaproponowaną metodą, należy jednak pamiętać, że prognoza wskazuje jedynie kierunek, w jakim zmierza realizacja robót na podstawie aktualnego zaawansowania i przyjętego scenariusza. Zmiana tempa robót, uzyskiwanej wydajności itp. spowoduje zmianę wskaźników będących podstawą wyznaczania prognozy i samą prognozę. Dlatego tak ważna jest dobra znajomość realiów przebiegu robót i ponoszonych kosztów. Tylko posiadanie wiedzy na temat konkretnego obiektu budowlanego, stosowanej technologii i organizacji robót przy jego wykonaniu oraz sposobu efektywnego stosowania metody EVM pozwoli poprawnie monitorować obiekt podczas realizacji, wyciągać prawidłowe wnioski, ustalać wiarygodne prognozy i podejmować skuteczne decyzje.

## 9.6. SŁOWNIK WAŻNIEJSZYCH AKRONIMÓW

- AC, ACWP** (Actual Cost, Actual Cost of Work Performed) – koszt rzeczywisty;
- AD** (Actual Duration) – aktualny czas trwania;
- AT** (Actual Time) – aktualny czas trwania;
- BAC** (Budget at Completion) – budżet końcowy;
- BCWP** (Budgeted Cost of Work Performed) – planowany koszt pracy wykonanej, nazywany również EV (Earned Value);
- BCWS** (Budgeted Cost of Work Scheduled) – planowany koszt pracy planowanej;
- CPI** (The Cost Performance Index) – wskaźnik wykorzystania kosztu;
- CR** (Critical Ratio), zwany również SCI;
- CV** (Cost Variance) – odchylenie kosztu;
- CWNB** (Cost of Work Not yet Begun) – budżet robót jeszcze nierozpoczętych;
- EAC** (Estimation at Completion) – szacowany koszt końcowy projektu;
- EAC(t)** Estimate at Completion (time) – prognoza terminu końcowego;
- ED** (Estimated Duration) – szacowany czas trwania; nazwa metody szacowania czasu końcowego inwestycji zaproponowana przez Jacoba i Kane;
- EDAC** (Eastimate of Duration at Completion) – szacowany termin końcowy, zwany również prognozą terminu końcowego EAC(t);
- ES** (Earned Schedule) – wypracowany harmonogram; nazwa metody szacowania czasu końcowego inwestycji zaproponowana przez Lipke;
- ET** (Estimated Time) – szacowany czas trwania, zwany również prognozą terminu końcowego EAC(t);
- ETC** (Estimate to Complete) – budżet prac pozostałych do wykonania, często nazywany również RB (Remaining Budget);

**EV** (Earned Value) – wartość wypracowana, zwana również BCWP;

**EVM** (Earned Value Method, Earned Value Methodology) – nazwa metody wartości wypracowanej;

**ES** (Earned Scedule) – nazwa metody prognozowania terminu końcowego;

**IEAC(t)** (Independent Estimate at Completion (time) – szacowany termin końcowy, zwany również prognozą terminu końcowego EAC(t);

**PD** (Planned Duration) – planowany czas trwania;

**PF** (Performance Factor) – współczynnik wykonania;

**PF(t)** (Performance Factor (time-based)) – współczynnik wykonania w czasie;

**PV** (Planned Value) – koszt planowany, zwany również BCWS; nazwa metody szacowania czasu końcowego inwestycji zaproponowana przez Anbariego;

**RB** (Remaining Budget) – budżet prac pozostałych do wykonania, często nazywany również *ETC*;

**SAC** (Schedule at Completion) – planowany harmonogram zakończenia;

**SCI** (Schedule Cost Index) – wskaźnik kosztu i harmonogramu;

**SPI** (The Schedule Performance Index) – wskaźnik wykonania harmonogramu;

**ST** (Scheduled Time) – planowany czas zakończenia realizacji;

**TEAC** (Time Estimation at Complition) – szacowany termin końcowy, zwany też prognozą terminu końcowego EAC(t);

**TETC** (Time Estimate to Complete) – nowy szacowany czas do zakończenia;

**TSPI** (To Schedule Performance Index) – wymagany wskaźnik wykonania harmonogramu;

**TVAC** (Time Variance at Completion) – odchylenie terminu końcowego;

**UDR** (Unearned Duration Remaining) – niewypracowany czas pozostały;

**WCP** (Work Completed and in Progress) – budżet dla robót wykonanych i w trakcie realizacji.

## 9.7. BIBLIOGRAFIA

- ANBARI, F. (2003). Earned value method and extensions. *Project Manage J.*, 34(4), 12–23.
- ATHEY, K. (2007). *EVM – Current Solution and Roadmap to Adoption*. Pobrano z lokalizacji: <http://www.quantumpm.com/>
- CZARNIGOWSKA, A. (2008). Earned value method as a tool for project control. *Budownictwo i Architektura*, 3, 15–32.

- Department of Energy, USA. (2003). *EVM TUTORIALS, Modul 5*. Pobrano z lokalizacji: <http://energy.gov/management/office-management/operational-management/project-management/earned-value-management>.
- Earned Schedule. (2017-10-05). *Earned Schedule Concept*. Pobrano z lokalizacji Walt Lipke: <http://www.earnedschedule.com/docs/earned%20schedule%20concept%20v2.pdf>
- FLEMING, Q., KOPPELMAN, J. (2000). *Earned value project management*. Newtowns Square, PMI.
- HEINZE, K. (1996). *Cost Management of Capital Projects*. New York, Marcel Dekker.
- JACOB, D. (2003). Forecasting project schedule completion with earned value Metrics. *The Measurable News*, March, 7–9.
- JACOB, D., KANE, M. (2004). Forecasting schedule completion using earned value metrics revisited. *The Measurable News*, Summer, 11–17.
- LIPKE, W. (2003). Deciding to act. *Crosstalk*, December, 22–24.
- LIPKE, W. (2017-10-05). *The official site for Earned Schedule information*. Pobrano z lokalizacji: <http://www.earnedschedule.com>.
- POŁOŃSKI, M., KOMENDAREK, P. (2011). Bieżąca kontrola kosztów realizacji obiektu budowlanego metodą earned value. *Metody ilościowe w badaniach ekonomicznych, Tom XII/2*, 279–290.
- VANDEVOORDE, S., VANHOUCKE, M. (2006). A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics. *International Journal of Project Management*, 24, 289–302.
- WEBB, A. (1995). Integrated cost and schedule control- a survey of UK experience. *The Engineering Journal*, 3, 5–6.
- WEBB, A. (2003). *Using Earned Value. A Project Manager's Guide*. Hampshire, Gower.
- ZIÓŁKOWSKA, A. (2015). *Wspomaganie realizacji przedsięwzięcia budowlanego z wykorzystaniem metody wartości wypracowanej* (Rozprawa doktorska). Warszawa: Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

