



Rafał POLAK\*

## ***Dynamiczny szacunek kosztów cyklu życia maszyn i urządzeń górniczych – przykład zastosowania dla kompleksu ścianowego***

Streszczenie: Rachunek kosztów cyklu życia (LCC, ang. *Life Cycle Cost*) coraz szerzej znajduje zastosowanie jako alternatywa tradycyjnego kryterium decyzyjnego w aspekcie rozważanych inwestycji, obejmującego wyłącznie koszt nabycia aktywów. W artykule podjęto problematykę realizacji szacunku kosztów cyklu życia maszyn i urządzeń górniczych, posługując się przykładem kompleksu ścianowego. Silnie zróżnicowane warunki eksploatacji podstawowego majątku produkcyjnego kopalń jednoznacznie przemawiają za prowadzeniem tej kalkulacji w sposób dynamiczny. W tym celu opracowano podstawowe założenia względem analitycznego modelu kosztów, który umożliwia odwzorowanie biznesowych aspektów działalności poprzez koncentrację na produktywności majątku. Jak starano się dowieść, podejście to umożliwia wiarygodną interpretację strat finansowych stanowiących konsekwencję bezpośredniego wpływu lub interakcji czynników skutkujących ograniczeniem produkcji. Specyfika takiego rozwiązania przemawia za szerokim wykorzystaniem przeszłych doświadczeń eksploatacyjnych, co zostało zrealizowane poprzez zaadoptowanie elementów strategii ukierunkowanej na produktywność (TPM, ang. *Total Productive Maintenance*). Zdaniem autora analiza kluczowych miar efektywności w aspekcie warunków środowiska pracy i metod organizacji produkcji, umożliwia znacznie bardziej wiarygodną predykcję przebiegu procesów eksploatacji wyposażenia niż hipotetyczne założenia. Wyniki pracy wprost przemawiają za praktycznym wykorzystaniem tego rodzaju szacunków i analiz. Pozwala to przypuszczać, że przedstawiony model stanowić może przydatne narzędzie wsparcia, w aspekcie kluczowych decyzji obejmujących cały cykl życia wyposażenia służącego realizacji zadań produkcyjnych.

Słowa kluczowe: dynamiczny model kosztów cyklu życia, LCC, analiza kosztów cyklu życia, TPM, kompleks ścianowy, górnictwo, zarządzanie majątkiem, modelowanie procesu eksploatacji

---

\* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Badań Rynku Surowcowego i Energetycznego, Kraków, e-mail: polak@meeri.pl.

## **Dynamic Lifecycle Costing of Mining Machinery and Equipment – case study for the Longwall System**

Abstract: Life-cycle costing is more often used as an attractive alternative to traditional decision criterion including only the cost for acquisition of the asset. The article discusses the implementation of the life-cycle cost method for mining machinery and equipment using the example of the longwall system. Diversified operating conditions of main production assets in mines suggest making this calculation in a dynamic way. For this purpose, an analytical model was developed in the scope of work, allowing for the mapping of the aspects of business by focusing on productive aspects. In an attempt to prove this approach, a reliable interpretation of the financial losses is provided, losses which are a consequence of many factors relating with the machinery. The specificity of this approach is supported by the extensive use of operating experience, which has been achieved by adopting elements of the Total Productive Maintenance strategy. The author's analysis of the key performance measures in terms of environmental conditions and methods of organization of production allows for a more reliable prediction of equipment operational processes than hypothetical assumptions. This suggests that the featured model can be useful as a support tool for key decisions in the life cycle of the mining equipment directly associated with the production.

Keywords: Dynamic Lifecycle Costing, LCC, Life Cycle Cost Analysis, TPM, Longwall System, underground mining, assets management

### **Wprowadzenie**

Metoda analizy kosztów cyklu życia (LCCA, ang. *Life Cycle Cost Analysis*) stanowi narzędzie wspomagające wyznaczenie uzasadnionych biznesowo kierunków działań w obszarze zarządzania produkcją i aktywami przedsiębiorstwa. Zastosowanie tej metody jako kryterium decyzyjnego w aspekcie planowanych inwestycji znajduje szczególne uzasadnienie względem obiektów lub systemów których koszty utrzymania wielokrotnie przewyższają koszty zakupu. Uwzględniając relatywnie wysokie koszty obsługi, energii i materiałów sytuacja ta dotyczy wielu podstawowych maszyn i urządzeń stosowanych w górnictwie. Wykorzystanie w tym celu wyliczeń sporządzonych przez producenta jest celowe względem obiektów technicznych, których przyszłe warunki pracy, ich uciążliwość oraz intensywność eksploatacji są znane i nie podlegają silnemu zróżnicowaniu. W przypadku większości podstawowych maszyn eksploatowanych w górnictwie podziemnym, podejście to stanowi zbyt wielkie uproszczenie. Świadczą o tym badania przeprowadzone już pod koniec lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku (Holmes 1997), gdzie w ponad 50% kopalń stwierdzono, iż koszty obsługi maszyn były ponad dwukrotnie wyższe niż założył ich producent. Rozbieżność ta przemawia za realizacją szacunku kosztów kluczowych obiektów w sposób dynamiczny, z szerokim wykorzystaniem własnych doświadczeń eksploatacyjnych w miejscu uproszczonych założeń i hipotetycznych modeli kosztowych.

Wykorzystanie w tym celu kluczowych miar efektywności strategii zarządzania wyposażeniem ukierunkowanej na produktywność (TPM, ang. *Total Productive Maintenance*), wydaje się właściwym rozwiązaniem. Daje to bowiem realną możliwość odniesienia kosztów cyklu życia bezpośrednio do ilości wykonanej pracy, a więc przeprowadzenia szacunku strat wynikających z ograniczeń poziomu produkcji. Decydując się na pominięcie tych kwestii w dynamicznym modelu kosztów, supremacja kosztów stałych i względnie stałych sprawia, iż optymalny kosztowo scenariusz najprawdopodobniej nie będzie adekwatny w perspektywie jednostkowych kosztów produkcji. W związku z tym, że warunkują one rentowność

całego przedsięwzięcia, pominięcie tego elementu niemal całkowicie niweluje użyteczność analizy kosztów cyklu życia jako kryterium decyzyjnego względem podstawowych środków produkcji stosowanych w górnictwie.

W aspekcie tematu pracy, nieuniknione wydaje się zatem rozstrzygnięcie: czy dynamiczny szacunek kosztów cyklu życia uwzględniający podstawowe miary efektywności produkcji stanowić może przydatne narzędzie wsparcia na etapie planowania, realizacji i podsumowania zamierzeń inwestycyjnych związanych z użytkowaniem podstawowych maszyn i urządzeń górniczych. W tym celu podjęto próbę opracowania szczegółowych założeń dotyczących analitycznego modelu kosztów, jak również przedstawiono przykład kalkulacji, obejmujący cykl życia kluczowego środka produkcji kopalń węgla kamiennego – kompleksu ścianowego.

### **1. Analiza kosztów cyklu życia jako narzędzie wsparcia nabywcy wyrobu**

Decyzje w obszarze gospodarki majątkiem produkcyjnym są na ogół trudne i obciążone dużą dozą ryzyka. Modelowy przegląd eksploatacyjnych obszarów badawczych wraz z propozycją ich uporządkowania przeprowadzony został w pracy (Loska 2013). Zgodnie z zaproponowanym, trójplaszczynowym układem klasyfikacji, wyróżnić można problemy o charakterze technicznym, organizacyjnym, normatywno-prawnym lub ekonomicznym.

Planując cykl życiowy wyposażenia, przedsiębiorstwa produkcyjne na ogół kierują się aspektami ekonomicznymi, zawężając liczbę rozważanych scenariuszy do tych, które spełniają wymagania techniczne i normatywno-prawne. Zasadniczo w tym celu użyte być mogą cztery alternatywne kryteria decyzyjne (Gotoh 1991):

- minimalnych kosztów pozyskania (IC – ang. *Minimum Initial Cost Design*),
- minimalnych kosztów utrzymania (RC – ang. *Minimum Running Cost Design*),
- minimalnych kosztów pozyskania i utrzymania (IC-RC – ang. *Reduction Design*),
- minimalnych kosztów cyklu życia obiektu w ściśle nieokreślonych warunkach eksploatacji (ang. *Life Cycle Costs Design Under Uncertain Circumstances*).

Zainteresowanie analizą LCC jako narzędziem wsparcia decyzyjnego wciąż rośnie, znajduje ona bowiem szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej (Du i in. 2010) oraz na etapie planowania inwestycji (Szkoda 2011; Bernat i Zieliński 2006) w wielu gałęziach gospodarki. Samo pojęcie cyklu życia trudno jednoznacznie zdefiniować, pojawia się bowiem pod różną postacią między innymi w: ekonomii, zarządzaniu projektami, zarządzaniu produkcją oraz badaniach obejmujących oddziaływanie wyrobu na środowisko. Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto definicję zgodną z normą PN-EN 60300-3-3:2006, która określa rachunek kosztów cyklu życia wyrobu jako „proces analizy ekonomicznej mającej na celu ocenę kosztu ponoszonego w całym cyklu życia wyrobu lub w części tego cyklu”, natomiast cykl życia wyrobu jako „przedział czasu od powstania koncepcji wyrobu do jego końcowego zagospodarowania”.

Rachunek ten stanowić może instrument wsparcia przydatny z perspektywy producenta koncentrującego uwagę na aspektach rynkowych – koszcie cyklu życia produktu (ang. *Product Life Cycle Costing*), jak i jego potencjalnego nabywcy, który stosując tę metodę w głównej mierze próbuje oszacować łączne koszty alternatywnych zakupów i scenariuszy eksploatacji. W aspekcie tematu pracy, kompleks ścianowy stanowi zarówno wyrób, założo-

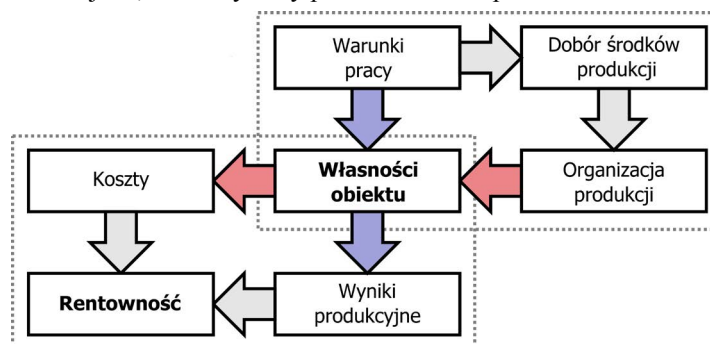
ny system techniczny wymagający obsługi, jak i instalacji produkcyjnej, realizującej przedsięwzięcie związane z dostarczeniem na rynek konkretnego produktu (tab. 1). Dualizm ten odgrywa zasadniczą rolę w aspekcie opisanego w pracy podejścia, koncentrującego uwagę nabywcy na wyrobie (majątku przedsiębiorstwa) i jednostkowych kosztach produkcji właściwych dla okresu jego posiadania.

TABELA 1. Różne definicje faz cyklu życia

TABLE 1. Different definitions of life-cycle phases

Cykl życia wyposażenia (TPM)	Cykl życia produktu (LCC)	Cykl życia projektu	Eksploatacja systemem ścianowym
Specyfikacja potrzeb	Koncepcja i definiowanie	Planowanie i formułowanie	Projektowanie i harmonogramowanie
Projektowanie, modyfikowanie i zakup wyposażenia	Projektowanie, badania i rozwój		
Zabudowa, instalacja i uruchomienie	Wytwarzanie i dystrybucja	Przygotowanie i inicjacja	Roboty przygotowawcze, zbrojenie ściany
Użytkowanie i obsługa	Eksploatacja	Realizacja	Eksploatacja pola
Likwidacja	Wycofanie	Zakończenie i ewaluacja	Likwidacja ściany

Model analizy kosztów cyklu życia zaproponowany w pracy (Fabrycky i Blanchard 1991) ma na celu identyfikację i minimalizację całkowitego kosztu obejmującego opracowanie, rozwój, produkcję, eksploatację oraz utylizację wyrobu, na drodze analizy alternatywnych scenariuszy. Jest to jednocześnie jedna z wielu metod analizy kosztów cyklu życia, których szczegółowy przegląd znaleźć można w pracy (Durairaj 2002). Alternatywna koncepcja opisana w literaturze (Woodward 1997) proces analizy ukierunkowuje bezpośrednio na optymalizację kosztów posiadania majątku z uwzględnieniem różnych scenariuszy eksploatacji obiektu. Identyfikacja scenariuszy eksploatacji znajduje szczególne uzasadnienie w przypadku złożonego układu produkcyjnego jakim jest kompleks ścianowy. Na płaszczyźnie obiekt techniczny–człowiek–środowisko (rys. 1) oddziałuje tu bowiem szereg różnorodnych czynników. Powoduje to, iż rzeczywisty poziom kosztów posiadania może zostać wiarygod-



Rys. 1. Uproszczona ilustracja modelu odwzorowującego kluczowe aspekty efektywności pracy maszyn górniczych  
Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Simplified illustration of the key aspects of mining machinery work efficiency

nie oszacowany wyłącznie na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych, właściwych dla określonych warunków środowiska i metod organizacji pracy. Tego typu podejście ogranicza jednak zastosowanie analizy kosztów cyklu życia do oceny w ujęciu ex-post. Zdaniem autora względem podstawowych środków produkcji kopalń wskazane w tym zakresie jest opracowanie rozwiązania pośredniego, umożliwiającego wykorzystanie wiedzy nabytej w drodze praktyki ruchowej bezpośrednio na etapie podejmowania kluczowych decyzji inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Tradycyjna kalkulacja kosztów cyklu życia zgodnie z normą PN-EN 60300-3-3:2006 obejmuje wszystkie fazy cyklu życia obiektu (przedprodukcyjną, produkcyjną, poprodukcyjną). W najprostszym ujęciu z perspektywy użytkownika koszty te wyrazić można jako sumę kosztu nabycia, posiadania i likwidacji obiektu (wzór 1).

$$LCC = P + \sum_{j=1}^n U_j + L \quad (1)$$

gdzie:

- $n$  – czas eksploatacji (najczęściej lata),
- $P$  – koszt inicjacyjny (koszt pozyskania),
- $U_j$  – zdyskontowane koszty utrzymania charakterystyczne dla kolejnych okresów eksploatacji,
- $L$  – koszt likwidacji.

Elementarnym etapem analizy LCC jest budowa analitycznego modelu kosztów, jego ewaluacja oraz opracowanie scenariuszy procesu eksploatacji (Barringer 2003; Fabrycky i Blanchard 1991; Woodward 1997). W odniesieniu do obiektów tworzących bezpośrednio ciąg produkcyjny, oprócz podstawowych kosztów utrzymania oznacza to potrzebę oszacowania strat wynikających z zaniżonych parametrów jakościowych wywierających wpływ między innymi na:

- ergonomię i bezpieczeństwo pracy,
- wydajność produkcyjną,
- dostępność (normatywną gotowość do wykonywania pracy),
- niezawodność – średni czas pomiędzy awariami (MTBF, ang. *Mean Time Between Failures*),
- naprawialność – średni czas naprawy (MTTR, ang. *Mean Time To Recovery*),
- operatywność (zdolność do pracy w różnych warunkach),
- kompatybilność (zgodność z standardami),
- trwałość użytkową.

Model obejmować powinien wszystkie skorelowane nośniki kosztów jawnych i utajonych, które ulec mogą zmianie chociażby w aspekcie właściwości technicznych obiektu. Posługując się przykładem kompleksu ścianowego: poziom automatyzacji może mieć istotny wpływ na liczebność załogi, natomiast zastosowana technologia urabiania na gabaryty chodników przyścianowych. Tak więc w celu zagwarantowania porównywalności przeprowadzonych szacunków, kwalifikacja kosztów uwzględniać powinna zarówno koszty wynagrodzeń, jak i robót przygotowawczych. Biorąc pod uwagę często skomplikowane relacje obiektu z otoczeniem, granica pomiędzy kosztami kwalifikowanymi a niekwalifikowanymi w zdecydowanej mierze podlega subiektywnej ocenie.

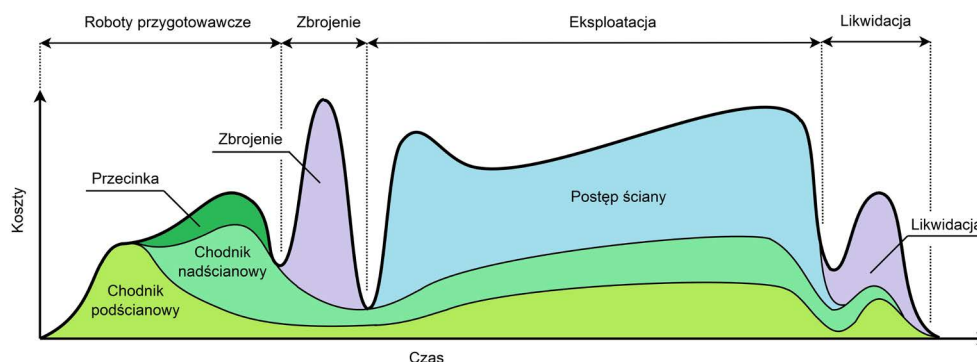
Identyfikacja wpływu poszczególnych czynników na koszty cyklu życia obiektu to jednocześnie realizacja postulatów filaru strategii TPM – tzw. wczesnego zarządzania wyposażeniem (EEM, ang. *Early Equipment Management*). Kierunek ten opisać można jako gromadzenie i wykorzystanie dostępnych danych i technologii na etapie planowania i budowy ciągów technologicznych w celu uzyskania maksymalnej niezawodności, łatwości utrzymania, operatywności i bezpieczeństwa, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów utrzymania oraz strat związanych z użytkowaniem sprzętu (Gotoh 1991). Analiza kosztów cyklu życia jako jedna z wielu metod rachunku kosztów (Gluch i Baumann 2004) stanowić może wymierne wsparcie w zakresie specyfikacji szczegółowych wymagań względem środków produkcji oraz metod realizacji przedsięwzięcia produkcyjnego, definiując bezpośrednio funkcję celu wielowymiarowej optymalizacji lub jedno z jej głównych ograniczeń.

## **2. Cykl życia kompleksu ścianowego**

Kompleks ścianowy stanowi zarazem istotny kosztowo element ciągu technologicznego, jak i pierwsze ogniwo łańcucha produkcji. Sprawia to, iż przebieg jego eksploatacji w znacznym stopniu decyduje o wynikach produkcyjnych, co przy wysokim udziale kosztów stałych znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w sytuacji ekonomicznej przedsiębiorstwa. W celach zarządczych, bez wątpienia konieczne jest zatem poznanie kluczowych miar efektywności charakteryzujących poszczególne kompleksy ścianowe, jak również określenie przyczyn i kosztów strat wynikających z zaburzeń lub ograniczeń produkcji.

Jednym z pierwszych działań realizowanych w ramach projektu związanego z wydobywaniem surowca jest planowanie procesu wydobywczego. Etap ten obejmuje szczegółowe rozpoznanie warunków zalegania złóż, modelowanie i optymalizację parametrów pól ścianowych oraz szeroko pojętą optymalizację procesu wydobywczego (Magda 1999). Jest on kluczowy biorąc pod uwagę wpływ na późniejsze efekty związane z praktyczną realizacją zainicjowanych działań. W odniesieniu do podstawowych środków produkcji istotny jest przede wszystkim właściwy dobór technologii i technicznych rozwiązań, umożliwiających realizację planów produkcyjnych. Kompleks ścianowy stanowi złożony system, w którym wzajemne zestawienie maszyn i urządzeń oraz dopasowanie do warunków geologiczno-górnictwowych w znacznej mierze determinuje przyszłe wyniki produkcyjne i koszty utrzymania. Stąd też decyzja o zakupie lub dzierżawie kompleksu ścianowego najczęściej wiąże się bezpośrednio z realizacją konkretnych, zaplanowanych przedsięwzięć wydobywczych. Harmonogram realizacji tych przedsięwzięć narzuca jednocześnie cykl działań obsługowych takich jak zbrojenie, likwidacja ściany oraz planowane remonty.

Tradycyjna metoda szacunku kosztów cyklu życia bazująca na ściśle ustalonym okresie eksploatacji obiektu i stałych rocznych kosztach jego utrzymania nie znajduje uzasadnienia w kontekście dynamiki zmian kosztów, intensywności procesu użytkowania i uciążliwości warunków charakteryzujących kolejne fazy realizacji zadań wydobywczych (rys. 2). Dodatkowe trudności generuje potrzeba jednoznacznego określenia wieku wycofania obiektu z eksploatacji. W praktyce decyzja o wycofaniu, generalnym remoncie lub modernizacji kompleksu ścianowego zależy bowiem od wielu indywidualnych czynników i najczęściej nie jest wynikiem całkowitej utraty zdolności do wykonywania użytecznej pracy. W zdecydowanej mierze stanowi konsekwencję szczypania perspektywicznych złóż, rosnących



Rys. 2. Ilustracja kosztów ponoszonych w poszczególnych fazach realizacji zadania wydobywczego w technologii urabiania kombajnem ścianowym  
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Illustration of costs incurred in the different phases of longwall exploitation

wraz z wiekiem kosztów utrzymania, obniżonych wskaźników niezawodnościowych oraz przestarzałości technologicznej, w związku z czym dalsza eksploatacja wyposażenia staje się nieuzasadniona ekonomicznie. Wskazane zatem wydaje się przyjęcie założenia determinującego okres eksploatacji kompleksu ścianowego od czasu niezbędnego w celu realizacji rozpatrywanych dla niego przedsięwzięć wydobywczych. W tym szczególnym przypadku cykl jego życia charakteryzować będzie stała ilość wydobytego urobku, a więc szacunek kosztów będzie w pewnym stopniu odzwierciedlać jednostkowe koszty wydobywania.

Stosując zaproponowane podejście uzyskać można porównywalność rachunku kosztów, natomiast straty wynikające m.in. ze zniżonych właściwości eksploatacyjnych obiektu, znajdą odzwierciedlenie w kosztach ponoszonych w warunkach ograniczenia produkcji, a więc w samoistnym zwiększeniu czasu i kosztów realizacji zadań produkcyjnych. Wyjątek stanowi koszt rzeczywistych strat produkcji w postaci niewydobytego z powodów stosowanej technologii, bądź doboru wyposażenia surowca, którego wydobywanie byłoby możliwe z zastosowaniem innych środków technicznych. Dotyczy to również możliwości uniknięcia z zastosowaniem innych środków technicznych przybierki, którą wprost opisać można kosztami technologicznymi i gospodarczymi transportu i składowania skały płonnej. Zastosowanie opisanych założeń wydaje się trafnym rozwiązaniem, szczególnie mając na względzie alternatywne zabiegi zakładające bezpośrednie uwzględnienie w rachunku dodatkowego, uogólnionego kosztu symbolizującego utratę produkcji. W tabeli 2 zamieszczono podstawowe kategorie strat produkcyjnych wraz z zaproponowanym w pracy sposobem ich uwzględniania w dynamicznym modelu kosztowym.

Uzależnienie czasu eksploatacji obiektu od realizacji przyjętych zadań stanowi kryterium którego słuszność budzić może pewne wątpliwości. W analizowanym przypadku przeciwdziała to jednak sytuacji, w której zmniejszona trwałość wyposażenia lub obniżone właściwości produkcyjne skutkują wycofaniem z eksploatacji przed zakończeniem przydzielonych zadań, co stawia pod znakiem użyteczność porównań na podstawie tradycyjnej analizy kosztów cyklu życia w ściśle określonym horyzoncie czasowym. W zaprezentowanym ujęciu obiekty o obniżonej trwałości charakteryzować będzie szybciej narastający wraz z wiekiem i ilością wykonanej pracy przyrost kosztów oraz strat produkcyjnych. Zastoso-

TABELA 2. Główne kategorie strat produkcyjnych wraz z sposobem ich odwzorowania w modelu kosztowym

TABLE 2. Main categories of production losses, with their mapping method

Kategoria strat produkcyjnych	Sposób odwzorowania
Opóźnienie harmonogramu wydobycia	przesunięcie przychodu w czasie (koszty kredytu udzielonego na okres opóźnienia o wartości stanowiącej iloczyn przychodu i udziału kosztów stałych)
Zmniejszenie wydobycia (wydajność znamionowa, dostępność, naprawialność, przerwy i zatrzymania produkcji, postoje planowane)	wpływ kosztów stałych w czasie oraz kosztów gotowości organizacyjnej na łączne koszty realizacji zadania wydobywczego (koszt jednostkowy produkcji)
Eksploatacja powyżej miąższości pokładu (operatywność, organizacja produkcji)	koszt przyspieszonego zużycia środków produkcji. Koszt wydobycia, transportu i zagospodarowania skały płonnej
Eksploatacja poniżej miąższości pokładu (operatywność, organizacja produkcji)	zmniejszenie ilość surowca wydobytego w związku z realizacją zadania (wpływ na jednostkowe koszty produkcji)
Obniżona efektywność pracy maszyn (wykorzystanie wydajności znamionowej)	koszt energii, zużycia technicznego obiektu oraz materiałów eksploatacyjnych wynikający z wydłużenia czasu pracy. Koszty zmniejszenia wydobycia
Zmniejszona niezawodność, ograniczona skuteczność systemu obsługi	koszt uszkodzeń stanowiących następstwo awarii. Koszty zmniejszenia wydobycia
Trwałość, kompatybilność, ergonomia	wzrost kosztów utrzymania (remonty, materiały, obsługa). Koszty zmniejszenia wydobycia

wanie tego uproszczenia, jest szczególnie uzasadnione z perspektywy przedsiębiorcy, który inwestuje w zakup środków niezbędnych w celu wykonania określonej pracy, w najbardziej efektywny ekonomicznie sposób, przy jednoczesnym zapewnieniu maksymalnego bezpieczeństwa pracowników i minimalizacji oddziaływania na środowisko naturalne.

Podejście to wymaga jednocześnie umiejętnego odwzorowania procesów starzenia i zużycia eksploatacyjnego, które stanowią funkcję wielu czynników takich jak: trwałość obiektu, czas, warunki środowiskowe, intensywność użytkowania, sposób obsługi, ilość wykonanej pracy (łączny postęp, ilość wydobytego surowca, liczba skrawów). W przyjętym modelu procesy niszczenia odwzorowane zostały przez wydatki na zakup materiałów oraz remonty, przy czym dla konkretnych warunków ściany są one funkcją opisaną w wymiarze czasu, stanu ruchowego, postępu eksploatacji oraz czynników powodujących nagły wzrost obciążenia.

Zważywszy na to, iż całkowity czas eksploatacji kompleksu ścianowego jest stosunkowo długim okresem, rozbieżność między projektem wydobyczym – charakteryzującym się względnie jednorodnymi warunkami realizacji – wydaje się w pełni uzasadnione. Względem kompleksu ścianowego – obiektu znajdującego się niemal nieustannie w ruchu związku z realizacją zadań wydobywczych, dekretacja taka umożliwia zarówno wiarygodne oszacowanie łącznego poziomu kosztów, jak również wysunięcie wniosków w odniesieniu

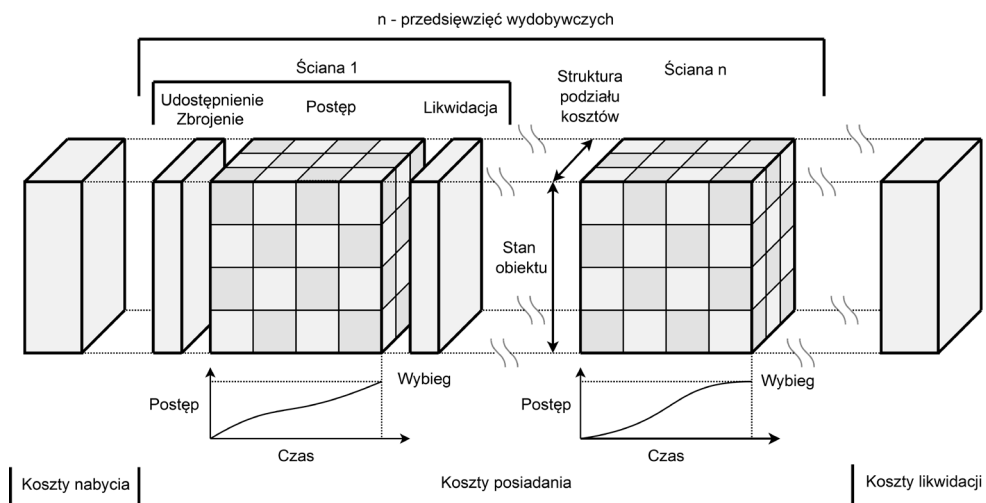


do poszczególnych doświadczeń eksploatacyjnych, szczególnie w aspekcie opłacalności podjętych przedsięwzięć.

### 3. Dynamiczny model kosztów

Budowa analitycznego modelu kosztów ma na celu wyodrębnienie i zwymiarowanie kluczowych parametrów eksploatacyjnych w płaszczyźnie kosztowej. Wartość kosztów utrzymania zależy od wielu czynników, dla uproszczenia przyjąć można, iż są one właściwe dla danego obiektu w kontekście określonego zadania wydobywczego, warunków i przebiegu jego realizacji. Model kosztów może w takim przypadku przyjąć formę wielowymiarowej macierzy. Tworząc macierz kosztów posiadania w okresie postępu ściany przyjęto dwa wymiary: struktury kosztów oraz kluczowych z perspektywy kosztów i efektywności produkcji stanów eksploatacyjnych, w jakich znajdować się może obiekt (rys. 3). Zaproponowana struktura stanów eksploatacyjnych odzwierciedla budowę wskaźnika wykorzystania wyposażenia (OEE, ang. *Overall Equipment Effectiveness*), adaptacja tej miary efektywności do warunków funkcjonowania kompleksów ścianowych została przeprowadzona w pracy (Polak 2014).

Procedura budowy macierzy kosztów dla przedsięwzięć wydobywczych wymaga identyfikacji kluczowych nośników kosztów. W odniesieniu do kompleksu ścianowego może nim być: czas, stan pobytu załogi w przodku, stan pracy kompleksu, wystąpienie awarii, postęp eksploatacji, wzrost obciążenia w związku z pogorszonymi warunkami geologiczno-górnictwymi np. występujące przerosty. W efekcie umożliwia to identyfikację stanów pracy charakteryzujących się określonym, w uproszczeniu proporcjonalnym do czasu ich trwania poziomem kosztów. Rozbicie łącznej sumy kosztów według struktury podziału na poszczególne stany eksploatacyjne, może być realizowane na bazie modeli obliczeniowych,



Rys. 3. Ilustracja przyjętego modelu kosztowego  
Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Illustration of an analytical cost model

analitycznych lub w wyniku oceny eksperckiej. Na potrzeby realizacji niniejszej pracy opracowano i wykorzystano następującą procedurę zbliżoną do metod pomiaru kosztów pośrednich w rachunku kosztów działań (ABC, ang. *Activity-Based Costing*) (Emblemsvag 2001):

1. Dla każdego stanu wykonano analizę, jakie czynniki właściwe tylko dla niego wpływać będą na zwiększenie kosztów (np. stan pracy nieefektywnej – praca napędów bez obciążenia, stan pracy efektywnej – znamionowe obciążenie napędów).
2. Oszacowano wpływ tych czynników na poszczególne elementy struktury kosztów (np. koszty obsługi w czasie zmian produkcyjnych).
3. Obliczono skumulowane wartości kosztów, przekazując właściwe dla każdego stanu koszty w górę zgodnie ze strukturą podziału wskaźnika efektywności.
4. Obliczono i zweryfikowano stosunek wzrostu kosztu względem stanów nadrzędnych.
5. Oszacowano całkowite koszty przyjmując czas trwania stanów właściwy dla analizowanego przedsięwzięcia, wartość tą oraz strukturę wydatków porównano z rzeczywistym kosztem.
6. Na podstawie relacji z pkt. 4 oraz informacji o rzeczywistych, łącznych kosztach przedsięwzięcia obliczono alternatywne (skorygowane) koszty jednostkowe i przeprowadzono interpretację odchyleń.
7. Przeprowadzono dyskusję wyników w kontekście innych przedsięwzięć wydobywczych, w szczególnych przypadkach przeprowadzono analizę sposobu dekretacji kosztów.

Estymacja jednostkowej macierzy kosztów możliwa jest również na drodze zastosowania metod programowania liniowego lub programowania ograniczeń, przyjmując jako zmienne decyzyjne koszt  $K_{ij}$  oraz jako funkcję celu minimalizację błędu wynikającego ze spełnienia układu równań liniowych, przyporządkowujących każdemu ze stanów jednostkowy koszt trwania (wzór 2).

$$K_p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (S_{pi} \cdot K_{ij}) \quad (2)$$

gdzie:

- $p$  – numer przedsięwzięcia,
- $n$  – liczba stanów eksploatacyjnych,
- $m$  – liczba składników kosztowych,
- $K_p$  – całkowite koszty przedsięwzięcia  $p$ ,
- $S_{pi}$  – łączny czas trwania stanu –  $i$  w trakcie realizacji przedsięwzięcia –  $p$ ,
- $K_{ij}$  – jednostkowy składnik –  $j$  kosztu trwania stanu –  $i$ .

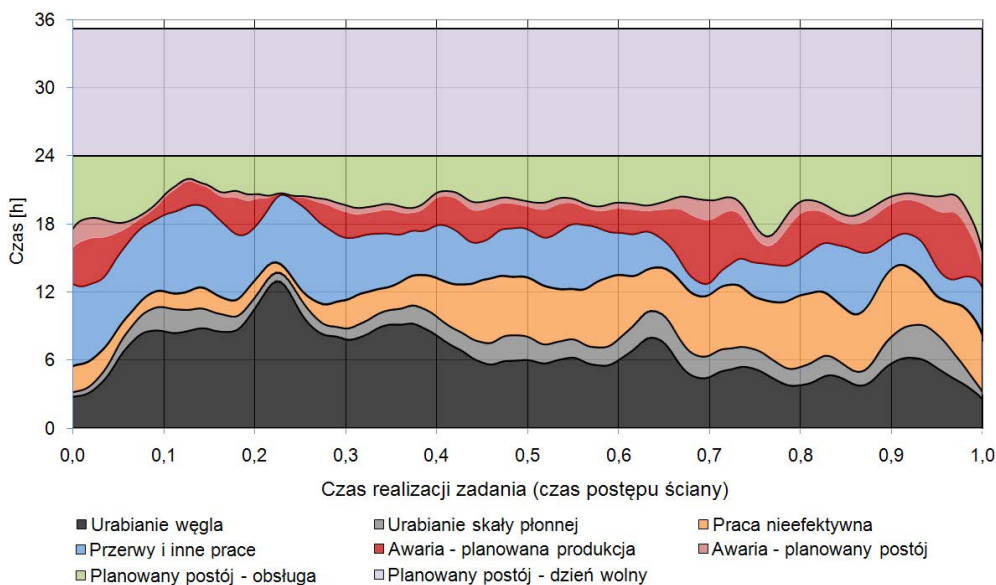
Układ równań dotyczy wyłącznie jednorodnych przedsięwzięć, w pozostałych przypadkach konieczne jest uwzględnienie dodatkowych czynników, takich jak: warunki eksploatacji, liczebność załogi, wiek wyposażenia, poziom cen usług i materiałów. Określenie jednostkowego składnika kosztu trwania stanu ( $K_{ij}$ ) w funkcji wielu zmiennych, możliwe jest na drodze programowania matematycznego, zastosowania metod analizy statystycznej bądź systemów uczących się w przypadku zależności nieliniowych. Wprowadzenie hipotetycznych nośników kosztów umożliwi uniknięcie zafałszowań wynikających z sposobu ewidencji kosztów, nieodwzorowującego rzeczywistego procesu ich powstawania w czasie. W takim ujęciu jednak realizacja każdego przedsięwzięcia wydobywczego wymaga przeprowadzenia dodatkowej oceny wpływu na zużycie techniczne obiektu w celu prawidłowej dekretacji kosztów remontowych skumulowanych w przyszłości.

#### 4. Kalkulacja kosztów cyklu życia

Przeprowadzając przykładowy rachunek kosztów cyklu życia wykorzystano dane opisujące przebieg eksploatacji jednego z kompleksów ścianowych analizowanych w pracy (Polak 2014). W celu estymacji całkowitej miary efektywności wyodrębniono poszczególne stany eksploatacyjne obiektu, zachowując zasady budowy wskaźnika OEE. Uśrednione dla całego okresu postępu ściany dane zamieszczone zostały w tabeli 4.

Ostatecznie udział czasu wydobywania węgla z wyznaczoną w empiryczny sposób znamionową wydajnością wyniósł 18,7% łącznego czasu. Ponieważ stan awarii oraz gotowości organizacyjnej do pracy są w znacznej mierze niezależne, w celu zachowania jednolitych zasad budowy wskaźnika zastosowano podział na czas jej wystąpienia podczas zmian produkcyjnych oraz planowanego postoju. Suma obu wartości dostarcza tym samym informacje o całkowitym czasie trwania awarii. Stosując aproksymację metodą ruchomych, ważonych, najmniejszych kwadratów (MWLS, ang. *Moving Weighted Least Squares*) oraz techniki opisane w pracy (Polak 2014), wyznaczono uśrednione czasy trwania poszczególnych stanów eksploatacyjnych, właściwe dla poszczególnych okresów postępu ściany (rys. 4).

Wykres przebiegu produkcji dostarcza informacji o dużej zmienności kluczowych miar efektywności wykorzystania wyposażenia w czasie, co ma bezpośrednie odzwierciedlenie w poziomie wydobywania. Wzrost czasu pracy nieefektywnej wprost informuje o wystąpieniu czynników organizacyjnych, technicznych bądź naturalnych w znacznym stopniu ograniczających postęp eksploatacji. Pomimo iż zaprezentowana analiza obejmuje wyłącznie okres eksploatacji jednego przodka ścianowego, przykład ten można wykorzystać do oceny alternatywnych scenariuszy eksploatacji obiektu. W tym celu przyjęto następujące założenia względem scenariuszy:



Rys. 4. Ilustracja przebiegu produkcji dla kolejnych dni postępu ściany  
Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Illustration of a production process for the analyzed longwall

TABELA 4. Kluczowe miary efektywności pracy analizowanego kompleksu ścianowego  
 TABLE 4. The key measure of efficiency of the analyzed longwall

Wyszczególnienie		Udział czasowy	
		względny	skumulowany
Dzień produkcyjny (24 h)		68,2%	68,2%
Postój – obsługa (4 h 53 min)	Planowana produkcja (19 h 07 min)	79,7%	54,3%
Postój – dzień wolny (11 h 11 min)	Czas gotowości (4 h 11 min)	86,2%	46,8%
	Awaria (3 h 19 min)	72,7%	34,0%
	Przerwy i inne prace (4 h 30 min)		
	Czas gotowości (16 h 30 min)	Czas pracy (12 h)	68,9%
Praca nieefektywna (3 h 44 min)	Praca efektywna (8 h 16 min)		
	Skala płonna (1 h 40 min)	79,9%	18,7%
	Węgiel (6 h 36 min)		

1. Scenariusz bazowy – czas trwania poszczególnych stanów eksploatacyjnych stanowi średnią z całego okresu postępu ściany (czas realizacji zadania pozostaje bez zmian).
2. Scenariusz pesymistyczny – czas trwania poszczególnych stanów eksploatacyjnych właściwy dla okresu charakteryzującego się najwyższym kosztem jednostkowym produkcji.
3. Scenariusz optymistyczny – czas trwania poszczególnych stanów eksploatacyjnych właściwy dla okresu charakteryzującego się najniższym kosztem jednostkowym produkcji.

Ponieważ dane charakteryzujące skrajne scenariusze odzwierciedlają trendy długookresowe, przeprowadzenie analizy poszczególnych przypadków umożliwia ocenę wpływu przebiegu produkcji na wyniki rachunku całkowitych kosztów cyklu życia obiektu. Oddziaływanie to stanowi kluczową cechę realizacji tego szacunku w sposób dynamiczny.

W celu przeprowadzenia rachunku kosztów cyklu życia przyjęto następujące założenia:

- cykl życia obiektu obejmuje okres realizacji 8 zadań wydobywczych (wartość przykładowa),
- wskaźniki eksploatacyjne (m.in. MTBF, MTTR) nie ulegają pogorszeniu wraz z wiekiem (uproszczenie wynika z braku danych niezbędnych do wyznaczenia zmienności tych parametrów w czasie),
- brak waloryzacji kosztów robocizny i materiałów (z uwagi na dynamikę zmian sytuacji rynkowej nie uwzględniono żadnych założeń dotyczących zmian kosztów),
- stała stopa dyskontowa na poziomie 5%, roczne koszty opóźnienia harmonogramu wynoszące 3,3% wartości produkcji (z uwagi na dynamikę zmian sytuacji rynkowej przyjęto przykładową wartość stopy dyskontowej, dla określenia kosztów opóźnienia harmonogramu przyjęto udział kosztów stałych na poziomie 66%),
- stały jednostkowy koszt czasu trwania stanu pracy w okresie postępu ściany wyznaczony na podstawie danych kosztowych obejmujących eksploatację pola ścianowego zgodnie ze strukturą podziału kosztów (tab. 5),
- stały koszt nabycia, transportu i montażu oraz odsprzedaży (likwidacji) wyposażenia, stały koszt oraz czas realizacji robót przygotowawczych, zbrojenia i likwidacji ściany (uproszczenie wynika z braku danych niezbędnych do wyznaczenia zmienności kosztów i czasu prac),
- koszt cyklu życia wyliczony przy użyciu analitycznego modelu kosztów dla każdego z trzech scenariuszy postępu ściany, zakładających odmienne czasy trwania 8 podstawowych stanów eksploatacyjnych (rys. 4),

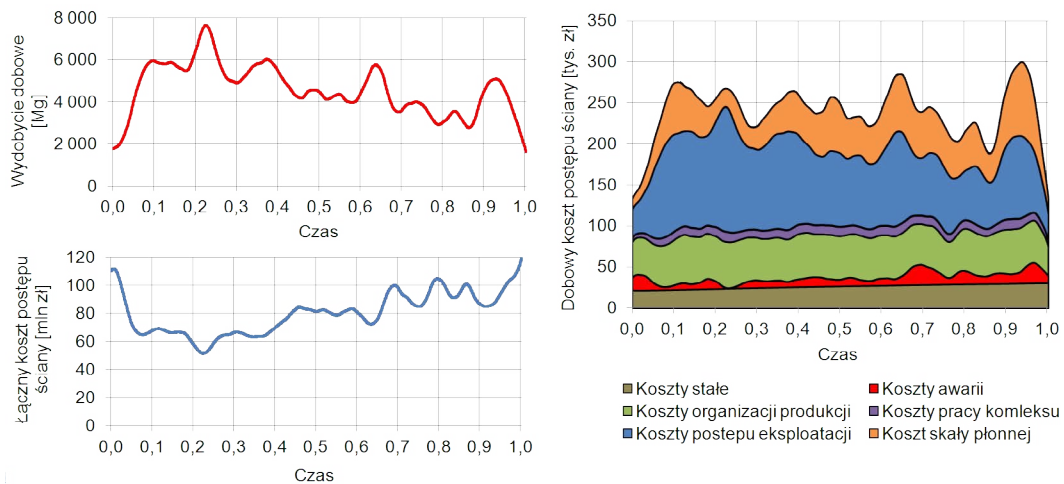
Przeprowadzając kalkulację przy udziale kosztów stałych na poziomie około 11% oraz względnie stałych (organizacja zmian produkcyjnych) na poziomie 22%, łączny koszt charakteryzujący okres postępu ściany wyniósł 76 521 tys. zł. Pomijając około 30 dni początkowego i końcowego okresu eksploatacji lokalna projekcja kosztu realizacji zadania zmieniała się w zakresie od 51 486 tys. zł do 104 802 tys. zł. Przy względnie niskim udziale wydatków stałych, projekcja ta wykazuje wysoką dynamikę zmian (rys. 5), tym bardziej że dane opisują trendy długofalowe.

Analizowane scenariusze różnił wyłącznie przebieg produkcji w okresie postępu ściany, tym niemniej koszt charakteryzujący scenariusz pesymistyczny był o 65% większy niż w przypadku scenariusza optymistycznego. Tak znaczące zróżnicowanie wyników otrzymanych na bazie rzeczywistych obserwacji tłumaczy konieczność stosowania dynamicznego

TABELA 5. Wyniki kalkulacji LCC (rachunek zdyskontowany)

TABLE 5. LCC calculation results (discounted cash flow)

Wyszczególnienie		Scenariusz pesymistyczny	Scenariusz bazowy	Scenariusz optymistyczny	
Koszt nabycia	Zakup [tys. zł]	78 500			
	Transport i montaż [tys. zł]	3 250			
Koszty utrzymania	<b>Roboty przygotowawcze [tys. zł]</b>	<b>146 026</b>	<b>159 734</b>	<b>168 931</b>	
	Obsługa (wynagrodzenia)	42 824	46 844	49 541	
	Remonty	9 449	10 337	10 932	
	Materiały	73 749	80 673	85 317	
	Energia	5 228	5 719	6 048	
	Pozostałe	14 775	16 162	17 092	
	<b>Zbrojenie [tys. zł]</b>	<b>75 515</b>	<b>84 982</b>	<b>91 423</b>	
	Obsługa (wynagrodzenia)	15 660	17 623	18 959	
	Remonty	11 417	12 848	13 822	
	Materiały	44 683	50 285	54 096	
	Energia	827	930	1 001	
	Pozostałe	2 928	3 295	3 545	
	<b>Postęp [tys. zł]</b>	<b>596 923</b>	<b>490 488</b>	<b>355 030</b>	
	Obsługa (wynagrodzenia)	198 514	159 985	122 624	
	Remonty	76 275	58 561	39 976	
	Materiały	80 227	75 532	70 838	
	Energia	75 429	61 599	44 403	
	Pozostałe	166 477	134 810	77 188	
	<b>Likwidacja ściany [tys. zł]</b>	<b>24 809</b>	<b>27 919</b>	<b>30 035</b>	
	Obsługa (wynagrodzenia)	8 274	9 312	10 017	
	Remonty	1 997	2 247	2 418	
	Materiały	10 286	11 575	12 452	
	Energia	127	143	154	
	Pozostałe	4 125	4 642	4 994	
	Koszty opóźnień produkcji [tys. zł]		125 654	0	-85 963
	Koszt likwidacji	Demontaż i transport [tys. zł]	1 261	1 628	1 898
		Likwidacja [tys. zł]	-2 640	-3 408	-3 974
Koszt cyklu życia:		1 049 297	843 093	639 128	
Okres eksploatacji [miesiące]		147	100	66	



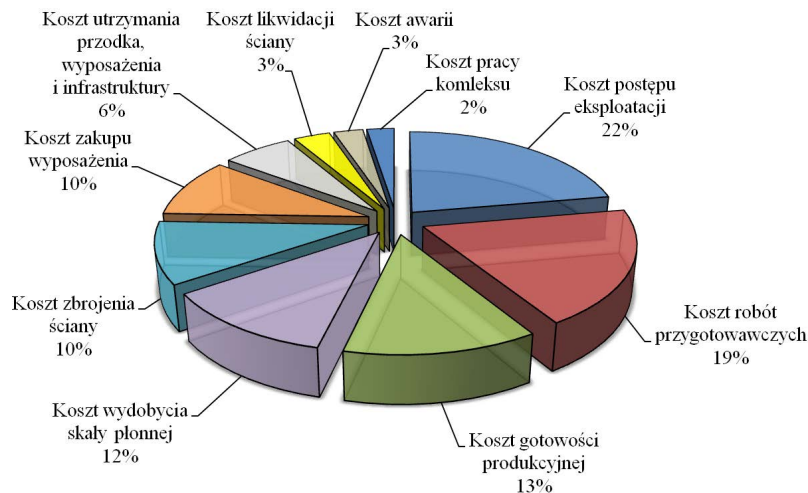
Rys. 5. Wpływ poziomu wydobywania na koszty eksploatacji  
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Relationship between the production output and costs

modelu kosztów cyklu życia. W sytuacji wystąpienia dodatkowych opóźnień związanych z realizacją robót przygotowawczych, zwiększeniem czasu zbrojenia i likwidacji ściany, należy spodziewać się zdecydowanie większego zróżnicowania wyników.

Wyniki kalkulacji całkowitych kosztów cyklu życia według założeń przyjętych w modelu przedstawiono w tabeli 5.

Na rysunku 6 przedstawiono strukturę kosztów cyklu życia kompleksu ścianowego dla wariantu bazowego. Jak można zauważyć, cena zakupu stanowi szóstą pod względem wiel-

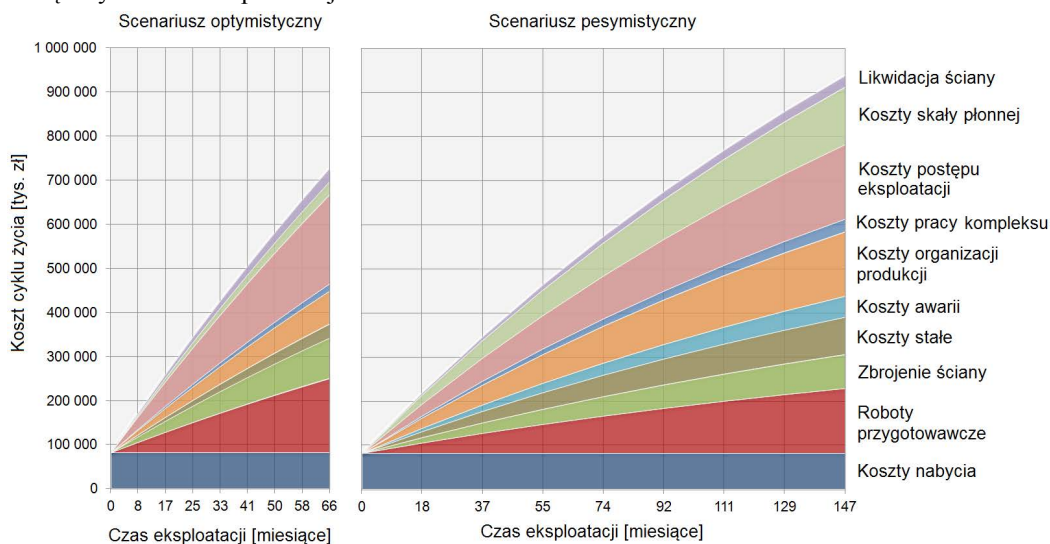


Rys. 6. Składniki zdyskontowanych kosztów cyklu życia dla wariantu bazowego  
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Components of the discounted life cycle cost for the baseline scenario

kości pozycję kosztową i stanowi około 10% całkowitego kosztu cyklu życia. Przyjęcie tej wartości jako głównego kryterium decyzyjnego budzić więc może uzasadnione wątpliwości.

Analizując skrajne scenariusze eksploatacji podstawowa różnica obejmuje wzrost udziału: kosztów wydobycia skały płonnej (z 4 do 14%), kosztów awarii (z 0,1 do 5%) kosztów stałych (z 4 do 9%) oraz kosztów organizacji produkcji (z 10 do 16%). Na rysunku 7 zaprezentowano kumulację kosztów w ciągu cyklu życia wyposażenia. Jak można zauważyć koszty charakteryzujące scenariusz optymistyczny narastają znacznie dynamiczniej w funkcji czasu, jednak ich końcowa wartość jest wyraźnie mniejsza. Uzależniając więc procesy starzenia od postępu eksploatacji, może to prowadzić do wysunięcia błędnych wniosków związanych m.in. z występowaniem awarii – w przypadku zmniejszenia tempa produkcji będą one występowały rzadziej, co jednak nie zmniejszy ich łącznej liczby w aspekcie realizacji całego zadania. Różnice kosztów nabycia, robót przygotowawczych, zbrojenia, postępu i likwidacji ściany wynikają z rachunku dyskonta. Udział kosztów stałych i względnie stałych w czasie w łącznym koszcie cyklu życia kompleksu wyniósł około 19%. Uwzględniając jednak starty z tytułu opóźnienia produkcji, skrócenie czasu realizacji zadań wydobywczych o połowę umożliwia redukcję wyliczonego kosztu cyklu życia obiektu o około 30%. Prowadzi to do konkluzji, że zawartość skały płonnej w urobku brutto i stopień wykorzystania potencjału produkcyjnego stanowią kluczowe czynniki związane z środowiskiem pracy kompleksów ścianowych, wywierające decydujący wpływ na wynik rachunku ekonomicznego. Podkreślić należy, że przeprowadzony szacunek obejmuje wyłącznie pierwszy element ciągu produkcyjnego, który wyróżnia relatywnie wysoki udział kosztów zmiennych. Rozszerzając analizę o urządzenia transportowe i przeróbcze, stałe koszty związane z odwadnianiem, przewietrzaniem, utrzymaniem wyrobisk oraz dystrybucją mediów, przypuszczać należy że przebieg wydobycia będzie odgrywał większe znaczenie w aspekcie łącznych kosztów produkcji.



Rys. 7. Wartość wybranych składników kosztu cyklu życia skrajnych scenariuszy eksploatacji

Źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Value Life cycle cost components made for extreme scenarios of operation



Zastosowanie opisanych metod do przeprowadzenia analiz typu „co-jeżeli” (ang. *what-if analysis*) w kontekście redukcji strat związanych z wydajnością produkcji, efektywnością pracy, awaryjnością, przestojami oraz udziałem skały płonnej stanowi dziedzinę wielokryterialnej optymalizacji. Zważywszy jednak na obszerność tego zagadnienia, problematykę tę pominięto, ponieważ stanowić powinna przedmiot osobnej pracy.

## **Podsumowanie**

Zarządzanie cyklem życiowym wyposażenia poprzez dynamiczną analizę całości kosztów związanych z jego nabyciem i posiadaniem prowadzoną w kontekście produktywności, stanowi bardzo silny mechanizm skutkujący ukierunkowaniem procesów zarządczych bezpośrednio na aspekty biznesowe, a więc wypracowanie zysku dla przedsiębiorstwa. Praktyczne wykorzystanie zaproponowanych założeń modelu kosztowego dla celów predykcji kosztów cyklu życia z uwzględnieniem przeszłych doświadczeń ruchowych, znajduje tutaj szerokie uzasadnienie. W odniesieniu do podstawowych środków produkcji, obliuguje to jednak do wnikliwej interpretacji i odzwierciedlenia w modelu kosztowym nie tylko technicznych właściwości wyposażenia, lecz również metod organizacji produkcji oraz warunków jego eksploatacji. Trafna prognoza kosztów wymaga przeprowadzenia eksploracji danych empirycznych, często z wykorzystaniem zaawansowanych technik ich przetwarzania (Polak 2014). Umożliwia to jednak przygotowanie wielowariantowej projekcji kosztów mogącej posłużyć do:

- oceny alternatywnych inwestycji,
- planowania kosztów nowych przedsięwzięć,
- wyceny ryzyka na etapie decyzyjnym,
- identyfikacji kluczowych czynników rzutujących na koszty cyklu życia majątku oraz koszty produkcji,
- optymalizacji procesu użytkowania i obsługi wyposażenia,
- nadzoru nad efektywnością wykorzystania majątku (odchylenia od planu),
- wyznaczenia ekonomicznego czasu życia i trwałości poszczególnych obiektów technicznych,
- porównania istniejących instalacji produkcyjnych oraz przedsięwzięć wydobywczych,
- doskonalenia metod szacunku kosztów cyklu życia poprzez weryfikację założeń dotyczących modeli kosztowych, warunków i scenariuszy eksploatacji obiektu.

Spodziewać się należy, że jednym z podstawowych zastosowań analizy LCC w górnictwie może być ocena decyzji zakupowych, w tym zwymiarowanie strat z tytułu inwestycji w przypadku których koszt inicjacyjny stanowił podstawowe lub jedyne kryterium wyboru oferty. Niemniej istotne wydaje się zwymiarowanie skutków niedostatecznego rozpoznania warunków pracy, a co za tym idzie niewłaściwego doboru rozwiązań technicznych i technologicznych. Właściwa wycena ryzyka związanego z decyzjami podejmowanymi w warunkach niepewności stanowić może bowiem jedyne uzasadnienie wydatków koniecznych w celu zwiększenia dostępnego poziomu informacyjnego.

Bezustannie wprowadzanie nowych technologii, pogarszające się warunki naturalne, presja ku redukcji kosztów operacyjnych za wszelką cenę, nakreślają drugi kluczowy obszar zastosowań rachunku LCC. Obejmuje on całokształt działań związanych z doskonaleniem procesów utrzymania ruchu, organizacji i technicznej realizacji produkcji. Problematyka ta

obejmuje bezpośrednio zagadnienia z dziedziny eksploatacji obiektów technicznych, inżynierii produkcji, logistyki, geologii oraz górnictwa. Badania nad wielokryterialną optymalizacją w tym obszarze są szczególnie istotne w aspekcie koncentracji wydobycia. Zakup wysoko-wydajnego wyposażenia najczęściej wiąże się bowiem z koniecznością zagwarantowania wysokiego wykorzystania potencjału produkcyjnego w celu zbilansowania podwyższonych kosztów związanych z jego nabyciem i utrzymaniem. Błędne przekonanie, iż samo wprowadzenie nowych technologii lub rozwiązań technicznych wpłynie na poprawę efektywności, stanowi częstą przyczynę rozczarowań, szczególnie w wymiarze ekonomicznym.

Realizacja pracy prowadzi do konkluzji, że dynamiczny rachunek kosztów cyklu życia stanowić może zasadnicze narzędzie wsparcia głównych decydentów w obszarze zarządzania podstawowym majątkiem produkcyjnym kopalń. Jego właściwe zastosowanie umożliwić powinno uniknięcie kosztownych błędów, jak również skuteczną realizację procesów ciągłego doskonalenia w obszarze wykorzystania i utrzymania kluczowych środków produkcji.

Niniejszy artykuł jest efektem realizacji pracy statutowej IGSMiE PAN: Zastosowanie strategii TPM oraz analizy kosztów cyklu życia obiektów energomechanicznych w optymalizacji procesów zarządzania podstawowymi środkami produkcji kopalń.

## Literatura

- Barringer, H.P. 2003. A Life Cycle Cost Summary. Australia: ICOMS 2003.
- Bernat, M. i Zieliński, T. 2006. Porównanie kosztów cyklu życia standardowych i energooszczędnych silników indukcyjnych niskiego napięcia. *Napędy i sterowanie* 2, s. 82.
- Du i in. 2010 – Du, L., Wang, Z. i Huang, H.Z. 2010. Analiza funkcji opisującej koszty w dynamicznym projektowaniu w warunkach niepewności. *Eksploatacja i Niezawodność*.
- Durairaj i in. 2002 – Durairaj, S.K., Ong, S.K., Nee, A.Y. i Tan, R.B. 2002. Evaluation of life cycle cost analysis methodologies. *Corporate Environmental Strategy* 9(1), s. 30–39.
- Emblemsvag, J. 2001. Activity-based life-cycle costing. *Managerial Auditing Journal*, 16(1), s. 17–27.
- Fabrycky, W.J. i Blanchard B.S. 1991. Life-Cycle Cost and Economic Analysis. NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Gluch, P. i Baumann, H. 2004. The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. *Building and environment* 39(5).
- Gotoh, F. 1991. Equipment Planning for TPM: Maintenance Prevention Design.: Norwalk: Productivity Press, Inc, 1991.
- Holmes, B. 1997. Benchmarking “Best Practice” in Mine Maintenance and Comparisons With Other Capital Intensive Industries. Sydney : 15<sup>th</sup> Annual National Maintenance Conference.
- Loska, A. 2013. Modelowy przegląd badań dla potrzeb skuteczności funkcjonowania służb utrzymania ruchu przedsiębiorstwa przemysłowego. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji.
- Magda, R. 1999. Modelowanie i optymalizacja elementów kopalń. Kraków: *Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej*.
- PKN 2006. PN-EN 60300-3-3:2006 Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań – Szacowanie kosztu cyklu Życia. 2006.
- Polak, R. 2014. Adaptacja kluczowych miar efektywności strategii TPM w warunkach kopalni węgla kamiennego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*.
- Polak, R. 2014. Systemy przetwarzania danych – ich rola i znaczenie w realizacji idei Inteligentnej Kopalni. *Wiadomości Górnicze* 10.
- Szkoda, M. 2011. Analiza kosztu cyklu trwałości (LCC) w ocenie efektywności środków transportu szynowego. *Logistyka* 3.
- Woodward, D.G. 1997. Life Cycle Costing – Theory, Information Acquisition and Application. *International Journal of Project Management* 15 (6) 335.