

JERZY ŁĘTKOWSKI
INSTYTUT ORGANIZACJI I ZARZĄDZANIA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
WROCŁAW

OPTIMALIZACJA PROCESU REMONTOWEGO DUŻYCH
MASZYN GÓRNICZYCH Z ZASTOSOWANIEM TECH-
NIKI MODELOWANIA SYMULACYJNEGO

Przedstawiono model procesu remontowego dużych maszyn górniczych, uwzględniający realizację remontów zapobiegawczych, których podstawą planowania jest oportunistyczno-sekwencyjna strategia remontowa. Na podstawie tego modelu i przy wykorzystaniu metody aproksymacji stochastycznej skonstruowano procedurę optymalizacji, która była podstawą symulacyjnego modelowania procesu remontowego na e.m.c. ODRA serii 1300. Zaprezentowano również wyniki zrealizowanych eksperymentów symulacyjnych.

1. Wstęp

Podstawowym układem technologicznym występującym w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego jest szeregowy układ K-T-Z /koparka-taśmociąg-zwałowarka/. Jest to układ technicznie skomplikowany, składający się z wielu różnych mechanizmów, zespołów i części, wymagających odmiennego podejścia w procesie eksploatacji. Charakteryzuje się ponadto dużą wydajnością, znaczną czasochłonnością akcji remontowych i wysokimi kosztami postojów i utrzymania ruchu.

Wielkość tego układu, jego stopień zbieżności i rola, jaką pełni w procesie produkcyjnym kopalni, upoważniają do traktowania go /z punktu widzenia utrzymania jego ciągłości ruchu, a zwłaszcza w odniesieniu do zagadnień remontowych/ jako obiektu wyodrębnionego.

Rozważany układ, zwany dalej obiektem, traktuje się jako zbiór elementów remontowych, posiadających zróżnicowane własności techniczne i ekonomiczne. Elementy te tworzą szeregową strukturę niezawodnościową, są stochastycznie¹ niezależne i ekonomicznie² zależne oraz charaktery-

¹ Dwa elementy obiektu są stochastycznie niezależne wtedy, gdy awaria lub proces zużycia jednego nie wymuszają lub nie zwiększają stopnia zużycia drugiego [1][4].

² Jeżeli koszty zapobiegawczej akcji remontowej danego zbioru elementów są niższe od sumy kosztów tej akcji, przeprowadzonej oddzielnie dla każdego elementu, to elementy te są ekonomicznie zależne [3].

zują się rosnącą intensywnością awarii. W procesie eksploatacji obiektu wyróżnia się dwa stany jego elementów: stan pracy efektywnej i stan awarii lub postępu remontowego, przy czym przyjęto, że w każdej chwili czasu istnieje możliwość natychmiastowej identyfikacji rzeczywistego stanu każdego elementu. Poza tym przyjęto, że czas pracy efektywnej do momentu awarii i czas naprawy powaryjnej elementów obiektu są zmiennymi losowymi o znanych rozkładach prawdopodobieństwa. Czas trwania remontu prewencyjnego jest zadany za pomocą wielkości normatywnych - zdefiniowanych. Natomiast przeciętne koszty napraw powaryjnych elementów przewyższają nakłady ponoszone na ich remonty prewencyjne /planowane/.

2. Model procesu remontowego

Proces remontowy Π obiektu, będącego zbiorem A elementów remontowych a_i ($i = 1, 2, \dots, n$), określa się jako czasowo uporządkowany podzbiór iloczynu kartezjańskiego zbiorów:

Z - zdarzeń /rozpoczęcia i zakończenia procesu i akcji remontowych/,

T - możliwych chwil wystąpienia zdarzeń,

$P(A)$ - rodziny wszystkich podzbiorów zbioru A wraz ze zbiorem pustym, czyli:

$$\Pi \subset Z \times T \times P(A) \quad (1)$$

$$\Pi = \left\{ (z_h, t_j, \mathcal{G}_j) \mid z_h \in Z, t_j \in T, \mathcal{G}_j \in P(A); t_j > t_{j-1} \right\} \quad (2)$$

przy czym:

$$Z = \{z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5\} \quad T = [t_0, t_e] \quad (3)$$

gdzie: z_0, z_5 - rozpoczęcie i zakończenie procesu remontowego,
 z_1, z_2 - rozpoczęcie i zakończenie naprawy powaryjnej,
 z_3, z_4 - rozpoczęcie i zakończenie remontu prewencyjnego,
 t_0, t_e - momenty rozpoczęcia i zakończenia procesu.

Konkretna trójka uporządkowana $(z_h, t_j, \mathcal{G}_j)$ określa odpowiednio: rodzaj akcji remontowej, termin jej rozpoczęcia lub zakończenia, zakres rzeczowy akcji remontowej.

Niech $x_{1(i)}$ $y_{1(i)}$ oznaczają chwile czasu wystąpienia zdarzeń: z_1, z_2 dla elementów a_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Chwile te charakteryzują zmienne losowe: X_1 - czas pracy efektywnej elementu a_i do momentu jego awarii, Y_1 - czas naprawy powaryjnej elementu a_i . Dysponując funkcjami odwrotnymi dystrybuant: $F_1(x)$, $G_1(y)$ zmiennych losowych X_1, Y_1 , chwile $x_{1(i)}$ $y_{1(i)}$ można wyznaczyć następująco [6]:

$$x_{1(i)} = t_j = t_{j-1} + F_1^{-1}(\Psi_{1(i)}) ; \Psi_{1(i)} \in (0,1) \quad (4)$$

$$y_{1(i)} = t_{j+1} = t_j + G_i^{-1}(\psi_{1(i)}) ; \psi_{1(i)} \in (0,1) \quad (5)$$

gdzie: $\varphi_{1(i)}, \psi_{1(i)}$ - liczby losowe o rozkładzie równomiernym.

Dla wyznaczenia terminów $x_{1(i)}, y_{1(i)}$ można wykorzystać również generatory liczb losowych opracowane w formie podprogramów maszyny cyfrowej [5].

Przyjmując założenie, że prawdopodobieństwo wystąpienia dwóch lub więcej zdarzeń typu z_1, z_2 w tej samej chwili czasu jest tak małe, że można go pominąć - elementy procesu (trójki uporządkowane) typu $(z_1, x_{1(i)}, \sigma_{1(i)}), (z_2, y_{1(i)}, \sigma_{1(i)})$ można jednoznacznie określić za pomocą zależności (4), (5), przy czym liczebność mocy zakresu rzeczowego $\sigma_{1(i)}$ będzie wtedy równa 1, czyli $\sigma_{1(i)} = a_1$.

W celu określenia terminów wystąpienia zdarzeń typu z_3 i związanych z nimi zakresów rzeczowych remontów opracowano reguły zgodne z oportunistyczno-sekwencyjną strategią remontową. Strategia ta formułuje ogólnie taką procedurę ustalania terminów i wieloelementowych zakresów rzeczowych remontów prewencyjnych, zgodnie z którą po każdym remoncie prewencyjnym wyznacza (planuje) się termin i zakres rzeczowy remontu następnego, natomiast po naprawie poawaryjnej wielkości te podlegają aktualizacji. Za podstawę konstrukcji reguł przyjęto zbiór normatywów trwałości μ_i elementów a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) oraz zasadę właściwego (ekonomicznie uzasadnionego) różnicowania terminów realizacji remontów z wartościami normatywów trwałości elementów tworzących zakresy rzeczowe tych remontów. Poniżej podaje się szczegółowy opis tych reguł.

Niech τ_k, σ_k oznaczają termin i zakres rzeczowy remontu prewencyjnego w numerze kolejnym k . Po realizacji remontu prewencyjnego o zakresie rzeczowym σ_{k-1} w terminie τ_{k-1} dla każdego elementu a_i wyznacza się przedziały $[\beta_{k(i)}, \delta_{k(i)}]$ możliwych terminów remontu tych elementów, przy czym:

$$\beta_{k(i)} = \mu'_{k(i)} - q \cdot \mu_i \quad (6)$$

$q \in (0,1)$

$$\delta_{k(i)} = \mu'_{k(i)} + q \cdot \mu_i \quad (7)$$

gdzie: μ_i - wartość normatywu trwałości elementu a_i ,
 $\mu'_{k(i)}$ - wartość resztkowa normatywu μ_i obliczona w chwili τ_{k-1} , w szczególności $\mu'_{k(i)} = \mu_i$,
 q - zmienna decyzyjna wpływająca na długość przedziału $[\beta_{k(i)}, \delta_{k(i)}]$

Dla uporządkowanego zbioru wartości resztkowych: $\mu'_{k(1)} \leq \dots < \mu'_{k(n)}$ określono regułę R_{σ} wyznaczania zakresu rzeczowego σ_k remontu prewencyjnego:

$$R_{\sigma} : \bigcap_{i=1}^{i=s} [\beta_{k(i)}, \delta_{k(i)}] \neq \emptyset \wedge \bigcap_{i=1}^{i=s+1} [\beta_{k(i)}, \delta_{k(i)}] = \emptyset \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_k = \{a_{k(1)}, a_{k(2)}, \dots, a_{k(s)}\} \quad (8)$$

Iloczyn mnogościowy przedziałów $[\beta_{k(i)}, \delta_{k(i)}]$ dla elementów $a_i \in \sigma_k$ wyznacza odcinek czasu $[\beta(\sigma_k), \delta(\sigma_k)]$ określający kres dolny ($\inf \tau_k$) i górny ($\sup \tau_k$) możliwych terminów τ_k realizacji remontów o zakresie σ_k , przy czym:

$$\beta(\sigma_k) = \inf \tau_k = \max_{i=1, \dots, s} \{ \beta_{k(i)} \} \quad (9)$$

$$\delta(\sigma_k) = \sup \tau_k = \min_{i=1, \dots, s} \{ \delta_{k(i)} \} \quad (10)$$

Dla realizacji remontu o zakresie σ_k przyjęto termin τ_k wyznaczony zgodnie z regułą:

$$R_{\tau} : \sigma_k = \{a_{k(1)}, \dots, a_{k(n)}\} \Rightarrow \tau_k = \delta(\sigma_k) = \min_{i=1, \dots, s} \{ \delta_{k(i)} \} \quad (11)$$

Zakres rzeczowy σ_k /i/ lub termin τ_k wyznaczone zgodnie z regułami R_{σ} , R_{τ} mogą ulec zmianie, jeśli tylko w pewnej chwili czasu z przedziału (τ_{k-1}, τ_k) wystąpi awaria któregoś z elementów a_i obiektu A. Zmian tych dokonuje się zgodnie z regułą aktualizacji $R_{\tau\sigma}^a$ zakresu σ_k i terminu τ_k . Reguła ta posiada następującą postać:

$$R_{\tau\sigma}^a : \left(\exists_{1(i)} x_{1(i)} \in [\beta(\sigma_k), \delta(\sigma_k)] \Rightarrow \sigma_k := \sigma_k \cup \{a_i\} \wedge \tau_k = x_{1(i)} \right) \vee$$

$$\vee \left(\exists_{1(i)} a_i \in \sigma_k \wedge x_{1(i)} + \mu_i(1-q) > \tau_k \Rightarrow \sigma_k := \sigma_k \setminus \{a_i\} \right) \quad (12)$$

Przedstawione reguły: R_{σ} , R_{τ} , $R_{\tau\sigma}^a$ pozwalają, przy znajomości zmiennej decyzyjnej q , wyznaczyć terminy rozpoczęcia i zakresy rzeczowe remontów prewencyjnych, czyli określać elementy procesu (trójki uporządkowane) typu (z_3, τ_k, σ_k) .

Elementy procesu związane z wystąpieniem zdarzenia z_4 - zakończenia remontu prewencyjnego - określić można na podstawie elementów (z_3, τ_k, σ_k) z uwzględnieniem czasu trwania remontu $t(\sigma_k)$ o zakresie rzeczowym σ_k . Przyjmują one zatem następującą postać: $(z_4, \tau_k + t(\sigma_k), \sigma_k)$.

Na podstawie przedstawionych wyżej reguł i zależności, przy uwzględnieniu własności obiektu, opracowano model procesu remontowego w formie rekurencyjnego generatora kolejnych zdarzeń.³ Model ten był następnie podstawą modelowania procesu optymalnego.

³ Kompletny opis modelu znajduje się w pracy [4].

3. Modelowanie optymalnego procesu remontowego

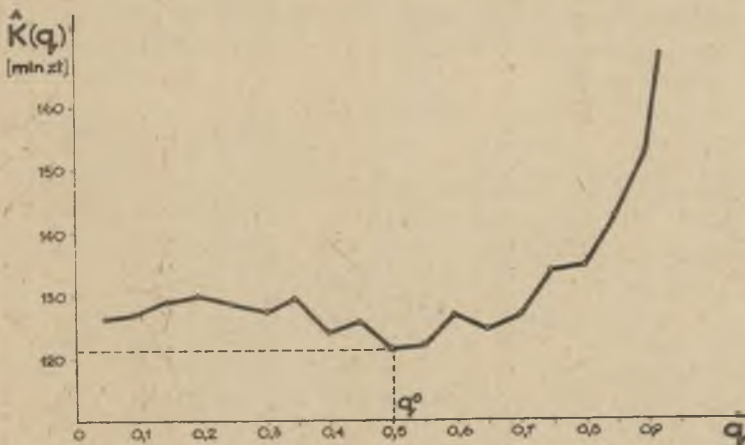
Postać sformułowanych reguł: R_{σ} , R_{τ} , $R_{\tau\sigma}^a$ pozwala uzależnić proces Π od jednej zmiennej decyzyjnej q : $\Pi = \Pi(q)$. Modelowanie procesu Π sprowadza się więc do jednego badania w oparciu o skonstruowany model, przy odpowiednim różnicowaniu wartości zmiennej q . Celem modelowania jest w tym przypadku określenie takiej wartości zmiennej $q = q^0$, dla której proces Π będzie optymalny, to znaczy będzie spełniał odpowiednie kryterium optymalności.

Za kryterium takie przyjęto minimum średnich kosztów $EK(q)$:

$$q = q^0 \iff EK(q^0) = \min_{q \in (0,1)} EK(q) \quad (13)$$

Koszty $EK(q)$ ujmują przeciętne nakłady ponoszone na wykonanie remontów i napraw oraz średnie straty produkcyjne wynikające z bezczynności obiektu w czasie jego postojów remontowych.

Zastosowanie techniki modelowania symulacyjnego wymaga między innymi skonstruowania efektywnej procedury wyboru wariantów zmiennej decyzyjnej q . Do konstrukcji takiej procedury wykorzystano opracowaną przez Kiefera i Wolfowitza metodę aproksymacji stochastycznej [2]. Metodę tę zastosowano po wstępnym zbadaniu funkcji kryterium (rys. 1). Wybór metody aproksymacji stochastycznej uzasadnia przypuszczenie o niemonotonicznym przebiegu funkcji kryterium i występowaniu jednego punktu "minimum" w otocze-



Rys. 1. Przebieg funkcji kosztów procesu remontowego.

niu wartości zmiennej $q = 0,5$. Zgodnie z tą metodą kolejne badane warianty zmiennej q wyznacza się następująco:

$$q_{m+1} = q_m - \frac{b_m}{2c_m} \left[\hat{K}(q_m + c_m) - \hat{K}(q_m - c_m) \right]; \quad m = 1, \dots, M-1 \quad (14)$$

przy czym:

$$\{b_m\}, \{c_m\} : \sum_{m=1}^{\infty} b_m = \infty, \sum_{m=1}^{\infty} b_m c_m < \infty, \sum_{m=1}^{\infty} b_m / c_m < \infty \quad (15)$$

$$M : \bigvee_{m=M_0, M_0+1, \dots, M-1} | \hat{K}(q_{m+1}) - \hat{K}(q_m) | \leq \varepsilon \quad (16)$$

gdzie: M_0 - ilość sprawdzeń warunku (16),

ε - dopuszczalny błąd oszacowania średnich kosztów przy rozwiązaniu optymalnym (suboptymalnym) $q \cong q^0$,

$\hat{K}(q)$ - oszacowanie wartości średniej kosztów EK(q).

Uruchomiony na maszynie cyfrowej ODRA 1305 program pozwolił wyznaczyć suboptymalną wartość zmiennej $q \cong q^0 \cong 0,54009$. Obliczenia trwały około 80 min. Program realizował badania dla 20-elementowego obiektu, eksploatowanego w sposób ciągły przez 50 tys.h. Wartości normatywów trwałości μ_1 elementów a_1 zawierały się w przedziale 600 - 6000 h. Oszacowanie $\hat{K}(q)$ średnich kosztów EK(q) z błędem 1% na poziomie ufności 99% wymagało realizacji 3 przebiegów symulacyjnych w każdym eksperymencie symulacyjnym.

Wyniki eksperymentów prezentuje tabela 1. Uzyskanie rozwiązania suboptymalnego - spełniającego warunek (16) - wymagało zbadania 10 wariantów zmiennej q . Koszty $\hat{K}(q)$ wykazują tendencję malejącą dla kolejnych wariantów: q_1, q_2, q_3, q_4 . Świadczyć to może o zbieżności kolejnych rozwiązań do wartości optymalnej q^0 .

Tabela 1

Wyniki eksperymentów symulacyjnych dla metody aproksymacji stochastycznej

LP	Zmienna q	Koszty $\hat{K}(q)$ [mln zł]	Uwagi
1.	0,40000	128,660	$q=q_1$
2.	0,50000	124,051	$q=q_1+c$
3.	0,30000	127,658	$q=q_1-c_1$
4.	0,58038	125,469	$q=q_2=q_1-b_1g_1$
5.	0,63038	124,062	$q=q_2+c_2$
6.	0,53038	123,922	$q=q_2-c_2$
7.	0,57342	125,277	$q=q_3=q_2-b_2g_2$
8.	0,60675	125,624	$q=q_3+c_3$
9.	0,54009	123,253	$q=q_3-c_3$
10.	0,45484	124,317	$q=q_4=q_3-b_3g_3$

Niewielka modyfikacja programu umożliwiła określenie kosztów dla poawaryjnej strategii remontowej. Poziom tych kosztów kształtował się w granicach 148,0 mln zł i był istotnie wyższy od minimalnych kosztów $\bar{K}(q^0) = 123,0$ mln zł otrzymanych dla prewencyjnej strategii oportunistyczno-sekwencyjnej ($q^0 \cong 0,54009$).

4. Wnioski końcowe.

Przedstawiony w zarysie model procesu remontowego charakteryzuje się względną prostotą i elastycznością, co sprawia, że potencjalne możliwości jego zastosowania w praktyce są dość duże. Jednocześnie należy podkreślić, że opracowane w ramach teorii odnowy i niezawodności modele i metody optymalizacji posiadają ograniczone możliwości praktycznych zastosowań - głównie ze względu na wysoki stopień ich abstrakcji. Konkretyzacja modeli abstrakcyjnych, czyli zbliżanie ich do warunków rzeczywistych, wymaga natomiast uchylenia założeń idealizacyjnych, co z reguły znacznie komplikuje otrzymane w ten sposób modele i w konsekwencji uniemożliwia ich badanie metodami analitycznymi.

Stan ten powoduje, że w wielu dziedzinach działalności organizacji gospodarczych, zwłaszcza w odniesieniu do problemów zarządzania, możliwe i wskazane jest wykorzystanie metod symulacyjnych, których przydatność wzrastać będzie wraz z upowszechnianiem i doskonaleniem środków informatyki. Komputeryzacja stwarza bowiem nowe i szersze możliwości w zakresie optymalizacji decyzji, a tym samym pozwala na systematyczne podnoszenie procesów zarządzania również w sferze gospodarki remontowej organizacji gospodarczych.

LITERATURA:

- [1] Bussman K., Mertens P.: Operations Research und Datenverarbeitung bei der Instandhaltungsplanung. Poeschel Verlag, Stuttgart 1968.
- [2] Bubnicki Z., Identyfikacja obiektów sterowania, PWN, Warszawa 1974.
- [3] Łętkowski J., Modele oportunistycznych strategii remontowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1977 nr 1(29).
- [4] Łętkowski J., Optymalizacja struktury procesu remontowego (rozprawa doktorska). Komunikat nr 225, Instytut Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977.
- [5] Stańko J., Biblioteki programów i podprogramów maszyn ODRA serii 1300, Wyd. WASK Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
- [6] Zieliński R., Metody Monte Carlo. WNT, Warszawa 1970.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕМОУТНОГО ПРОЦЕССА БОЛЬШИХ ГОРНЫХ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНИКИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Резюме

В общих чертах определен ремонтный процесс сложных объектов. Представлена модель этого процесса, учитывающая правила планирования сроков и объемов вещественных ремонтов согласно оппортунистической и секвенционной ремонтной стратегии. Приводится определение оптимизации процесса. В качестве критерия оптимизации принят минимум средней ремонтной стоимости. Для конструкции процедуры оптимизации процесса применили метод

стохастической аппроксимации и технику имитационного моделирования. В работе представлены и обсуждены результаты проведенных имитационных экспериментов.

THE MAINTENANCE PROCESS OPTIMIZATION FOR
COMPLEX MINING MASHINES WITH USING THE
SIMULATION MODELLING TECHNIQUE

S u m m a r y

The maintenance process for complex objects is generally defined. Model of this process, which includes the rules of planning of repair-time limits and repair ranges as the rules of the opportunistic and sequential maintenance policy, is shown. The problem of the maintenance process optimization is formulated. The minimum of maintenance costs as the optimization criterion is taken. The stochastic approximation method of Kiefer and Wolfowitz and the modelling simulation technique are used for calculation of the optimal solution.