dr inż. Adam Kadziński
dr Aleksandra Woźniak
Politechnika Poznańska

Model diagnostyczno – niezawodnościowo – bezpiecznościowy systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych

Przedstawiono model systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych. W modelu istnieje możliwość uwzględnienia wybranych aspektów diagnostycznych, niezawodnościowych i bezpieczeństwa w procesach eksploatacji lokomotyw. Zamieszczono opis formalny modelu matematycznego. Zdefiniowano model sumarycznego zadania nakładanego na system i na tej podstawie zaproponowano miarę gotowości systemu eksploatacji lokomotyw. Model matematyczny odwzorowano w postaci komputerowego modelu symulacyjnego.

1. Wprowadzenie

Eksploatacja wielu klas obiektów technicznych oparta jest na systemie planowo -zapobiegawczych obsług. Do takich obiektów zalicza się lokomotywy spalinowe. System planowo -zapobiegawczych obsług nakłada na posiadacza obiektu technicznego obowiązek wykonywania okresowych zabiegów regulacyjnych, konserwacyjnych i naprawczych. Kolejność i zakres wykonywanych czynności obsługowych określa cykl obsługowy. Czynności obsługowe takiego cyklu realizowane są przez macierzyste jednostki eksploatujące obiekty (przeglądy kontrolne, sezonowe i okresowe, naprawy bieżące i rewizyjne) oraz przez specjalistyczne zakłady naprawcze (naprawy rewizyjne, średnie, główne, awaryjne i reklamacyjne).

Eksploatację obiektów technicznych według opisanego tu systemu obsług charakteryzują wartości wskaźników efektywnościowych. Poszukując możliwości zwiększenia wartości tych wskaźników wprowadza się często do procesu obsługiwania dodatkowe operacje diagnostyczne [2].

Efektem wprowadzenia diagnostyki niektórych zespołów lokomotyw spalinowych jest często wcześniejsze zauważenie symptomów uszkodzeń. Prowadzi to w konsekwencji do uniknięcia lub zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia stanów zawodności bezpieczeństwa i stanów zawodności sprawności lokomotyw lub ich obiektów technicznych (np. silników spalinowych).

Celem niniejszej pracy jest prezentacja modelu do ilościowych ocen wpływu wybranych aspektów diagnostycznych, niezawodnościowych i bezpieczeństwa na charakterystyki systemu eksploatacji lokomotyw.

2. Model matematyczny systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych

System eksploatacji lokomotyw spalinowych można odwzorować za pomocą wielofazowego modelu cyklicznego. Wielofazowy cykliczny model systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych (model DNB) jest modelem integrującym model lokomotyw spalinowych i następujące modele podsystemów (rys. 1):

- model podsystemu **U** użytkowania (na rys. 1 – model stanowiska użytkowania U lokomotyw i model kolejki KU lokomotyw oczekujących w rezerwie),
- model podsystemu **D** diagnostyki silników spalinowych lokomotyw (na rys. 1 – model stanowiska D i model kolejki KD),
- model podsystemu **P** do przeprowadzania przeglądów okresowych lokomotyw (na rys. 1 – model stanowiska P i model kolejki KP),
- model podsystemu **B** do wykonywania napraw bieżących lokomotyw w jednostce macierzystej (na rys. 1 – model stanowiska B i model kolejki KB),
- model podsystemu **Z** do wykonywania planowych naprawach okresowych lokomotyw oraz wykonywania napraw awaryjnych przekraczających możliwości technologiczne jednostek macierzystych - przebywanie lokomotyw w specjalistycznych zakładach naprawczych (na rys. 1 – model stanowiska Z),
- model podsystemu **ZB** odwzorowującego przebywanie lokomotyw w stanie zawodności bezpieczeństwa takim, że istnieje możliwość przywrócenia lokomotyw do stanu zdatności (na rys. 1 – model stanowiska ZB).

Rozpatrywane są dwa warianty działania systemu. Wariant V.1 zakłada eksploatację lokomotyw bez prowadzenia okresowego diagnozowania silników spalinowych lokomotyw. W wariancie V.2 przyjmuje się, że przeprowadza się diagnozowanie silników spalinowych przed każdym przeglądem okresowym lokomotyw. Warianty rozpatrywanego systemu oznaczono m.in. na rys. 1 przedstawiającym strukturę statyczną jego modelu.

System pracuje w czasie ciągłym, ale wszystkie możliwe zmiany stanu, zarówno systemu eksploatacji lokomotyw jak i samych lokomotyw, dokonywane są w określonych chwilach czasu $t_1, t_2, \ldots$. W stałych przedziałach czasu $T_i=(t_{i-1}, t_i>$ pomiędzy kolejnymi chwilami t_i $(i=1,2,\ldots)$ stan systemu i stan lokomotyw nie zmienia się. Długość wszystkich przedziałów T_i - okresów pracy jest taka sama $t_i - t_{i-1} = \Delta t$ i wynosi np. 1 dzień kalendarzowy.

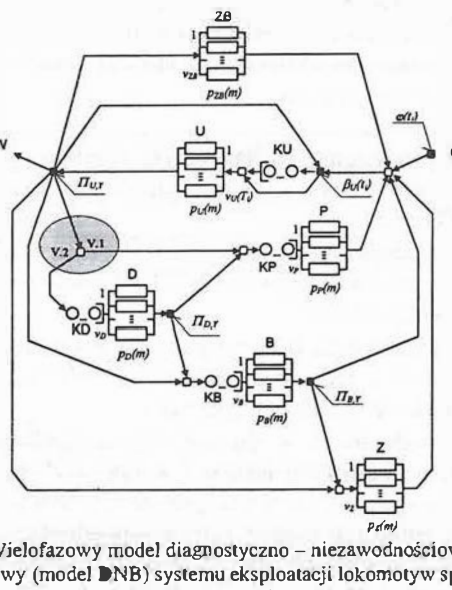
W systemie znajduje się losowa liczba lokomotyw $N(T_i)$ o rozkładzie dyskretnym

$$P\{N(T_i)=N, N\in \mathrm{N}\}=p_N(T_i), \qquad \sum_N p_N(T_i)=1, \quad (1)$$

możliwe jest bowiem, z jednej strony - opuszczenie systemu przez lokomotywę, której stan zawodności bezpieczeństwa jest taki, że nie można liczyć na przywrócenie jej stanu zdatności (przejście do podsystemu **W**), z drugiej strony - system może być uzupełniany nowymi lokomotywami. Każda lokomotywa w chwili wejścia do systemu otrzymuje kolejny numer, który jest jej kodem identyfikacyjnym.

Zarówno nowe lokomotywy, jak i lokomotywy powracające do podsystemu **U** użytkowania po zakończeniu różnych procesów obsługiwania, otrzymują określony zasób czasu zdatności $\gamma \cdot \Delta t$. Zasób czasu zdatności τ_L ma rozkład dyskretny postaci:

$$P\{\tau_L = \gamma \cdot \Delta t,\ \gamma \in \mathrm{N}\} = p_L(\gamma), \qquad \sum_{\gamma} p_L(\gamma) = 1 . \quad (2)$$



Rys. 1. Wielofazowy model diagnostyczno – niezawodnościowo – bezpiecznościowy (model DNB) systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych (wyjaśnienie oznaczeń w tekście)

Stan k-tej lokomotywy na okres T_i zostaje ustalony w chwili t_{i-1} (początek okresu T_i) i określa się go następująco (rys. 2):

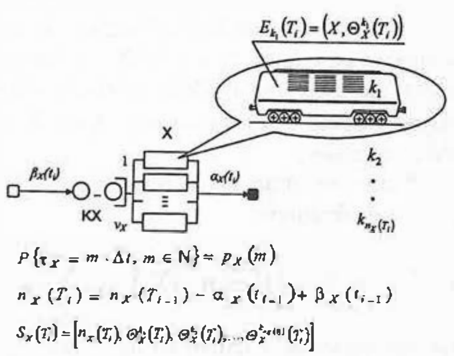
$$E_k(T_i) = \left(X, \Theta_X(T_i)\right), \quad (3)$$

gdzie:

X - oznacza miejsce lokomotywy w okresie T_i w jednym z podsystemów, tzn. $X \in \Phi = \{\mathbf{U}, \mathbf{D}, \mathbf{P}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \mathbf{ZB}, \mathbf{W}\}$, przy czym **W** oznacza wyjście k-tej lokomotywy z systemu,

$\Theta_X(T_i) = m \cdot \Delta t$ dla $m = 1,2,\ldots$ - jest pozostałym czasem przebywania lokomotywy w podsystemie X, ustalonym w chwili t_{i-1}.

Ponieważ podsystemy obsługi lokomotyw **D, P, B, Z** i **ZB** funkcjonują na podobnych zasadach, zatem zostaną one omówione łącznie.



Rys. 2. Model podsystemu X (wyjaśnienie oznaczeń w tekście)

Podsystem X $(X \in \Phi = \{\mathbf{D}, \mathbf{P}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \mathbf{ZB}, \mathbf{O}\})$ składa się z v_X kanałów obsługowych, a czas τ_X potrzebny na obsługę lokomotywy ma rozkład dyskretny postaci:

$$P\{\tau_X = m \cdot \Delta t,\ m \in \mathrm{N}\} = p_X(m), \qquad \sum_{m} p_X(m) = 1 \quad (4)$$

i nie zależy ani od numeru lokomotywy k, ani numeru kanału obsługowego j $(1 \le j \le v_X)$.

Stan podsystemu X (rys. 2) w okresie T_i jest jednoznacznie określony przez liczbę lokomotyw $n_X(T_i)$ przebywających w tym okresie w podsystemie oraz przez pozostałe czasy przebywania tych lokomotyw w podsystemie X, ustalone na początku okresu T_i:

$$S_X(T_i) = \left[n_X(T_i), \Theta_X^{k_1}(T_i), \Theta_X^{k_2}(T_i), \ldots, \Theta_X^{k_{n_X(T_i)}}(T_i)\right]. \quad (5)$$

Indeksy $k_1, k_2, \ldots, k_{n_X(T_i)}$ określają numery lokomotyw znajdujących się w okresie T_i w tym podsystemie.

W chwili t_i (zakończenia okresu T_i) ustala się liczbę lokomotyw

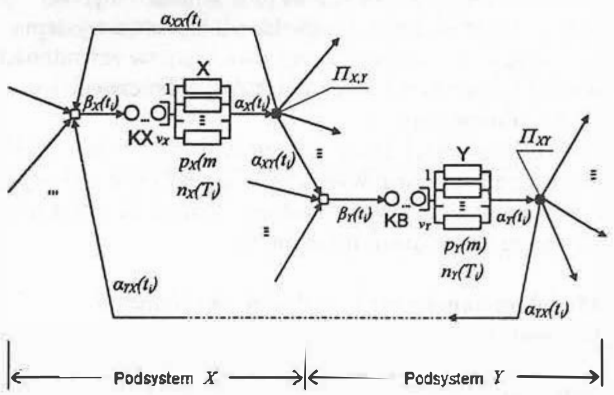
$$\alpha_X(t_i) \in \{0,1,2,\ldots,n_X(T_i)\}, \quad (6)$$

dla których pozostały czas pobytu w podsystemie X wynosi

$$\Theta_X^{k_j}(t_i) = 0, \qquad 1 \le j \le n_X(T_i). \quad (7)$$

Lokomotywy zmieniają swoje miejsce (podsystemy) w systemie i niech $\alpha_{XY}(t_i)$ wskazuje ile z nich przechodzi z podsystemu X do podsystemu Y (rys. 3). Wtedy obowiązuje oczywiście związek:

$$\alpha_X(t_i) = \sum_{Y} \alpha_{XY}(t_i). \quad (8)$$



Rys. 3. Model przemieszczeń lokomotyw między podsystemami X i Y (wyjaśnienie oznaczeń w tekście)

Jeśli $\Theta_X^{k_j}(t_i) > 0, 1 \le j \le n_X(T_i)$, to $\Theta_X^{k_j}(T_{i+1}) = \Theta_X^{k_j}(t_i)$ jest jednocześnie pozostałym czasem przebywania lokomotywy k_j w podsystemie X.

Równocześnie do podsystemu X wchodzą lokomotywy z innych podsystemów Y w ilości:

$$\beta_X(t_i)=\sum_Y \alpha_{YX}(t_i). \qquad (9)$$

Wszystkie lokomotywy będące w chwili t_i w podsystemie X są porządkowane według kodów identyfikacyjnych k.

Jeśli $n_X(T_i)-\alpha_X(t_i)<v_X$, to na wolne kanały stanowiska obsługowego w podsystemie X wchodzą nowoprzybyłe lokomotywy w kolejności ich uporządkowania:

- w przypadku, gdy

$$\beta_X(t_i)\le v_X-n_X(T_i)+\alpha_X(t_i), \qquad (10)$$

to wszystkie nowoprzybyłe lokomotywy wchodzą natychmiast na kanały obsługowe stanowisk i ich pozostałe czasy przebywania w podsystemie X ustalone dla okresu T_{i+1} wynoszą $\Theta_X(T_{i+1})=\tau_X$, niezależnie od numeru lokomotywy k, tzn. są równe czasowi obsługi lokomotywy w tym podsystemie o rozkładzie wyrażonym zależnością (4),

- w przypadku, gdy

$$\beta_X(t_i)>v_X-n_X(T_i)+\alpha_X(t_i), \qquad (11)$$

to na wolne kanały stanowiska w podsystemie X wchodzą nowoprzybyłe lokomotywy w kolejności ich uporządkowania, a pozostałe, dla których nie ma wolnych kanałów obsługowych, oczekują w kolejce na obsługę.

Jeśli $n_X(T_i)-\alpha_X(t_i)\ge v_X$, to wszystkie kanały są zajęte i nowoprzybyłe lokomotywy zajmują według uporządkowania kolejne miejsca w kolejce w oczekiwaniu na obsługę.

Jeśli lokomotywa w chwili wejścia na stanowisko X otrzyma kolejny numer k_{v_X+r}, gdzie $r=1,2,\ldots$, to jej pozostały czas przebywania na stanowisku X jest równy sumie czasu potrzebnego na obsługę oraz czasu oczekiwania

$$\Theta_X^{k_{v_X+r}}(T_{i+1})=\tau_X+\sum_{l=1}^{r}\hat{\Theta}_X^{(l)}(t_i), \qquad (12)$$

gdzie: $\hat{\Theta}_X^{(l)}(t_i)$ są kolejnymi statystykami pozycyjnymi pozostałych czasów przebywania w podsystemie X dla lokomotyw o numerach k_l, gdzie $1\le l\le v_X+r-1$.

Oczywiście, pozostały czas przebywania na stanowisku X dla lokomotyw, których $\Theta_X^{k_l}(t_i)>0$ jest równy $\Theta_X^{k_l}(t_i)=\Theta_X^{k_l}(T_i)-\Delta t$.

W ten sposób w chwili t_i ustalany jest nowy stan podsystemu X na okres czasu T_{i+1}:

$$S_X(T_{i+1})=\left[n_X(T_{i+1}),\Theta_X^{k_1}(T_{i+1}),\Theta_X^{k_2}(T_{i+1}),\ldots,\Theta_X^{k_{n_X(T_{i+1})}}(T_{i+1})\right] \qquad (13)$$

gdzie:

$$n_X(T_{i+1})=n_X(T_i)-\alpha_X(t_i)+\beta_X(t_i), \qquad (14)$$

a pozostałe czasy przebywania $\Theta_X^{k_l}(T_{i+1})$ lokomotyw w podsystemie X zostały już określone zależnością (12).

Podsystem **U** użytkowania lokomotyw ma bardziej skomplikowaną strukturę niż pozostałe podsystemy, dlatego jego opis zostanie przedstawiony oddzielnie.

W chwili t_{i-1} określane jest zadanie systemu eksploatacji, wyrażające się liczbą lokomotyw q, które są potrzebne do realizacji zadania. Można więc wskazać rozkład $G_U(T_i,q)$ określający liczbę lokomotyw, które realizują zadanie systemu eksploatacji w okresie T_i, jako:

$$G_U(T_i,q)=P\{v_U(T_i)=q,\ q\in \mathrm{N}\},\qquad \sum_q G_U(T_i,q)=1 \qquad (15)$$

Jednocześnie w okresie T_i w podsystemie U znajduje się $n_U(T_i)$ lokomotyw mogących realizować zadanie systemu. Zasoby czasu zdatności tych lokomotyw, ustalone w chwili t_{i-1}, wynoszą odpowiednio $\Theta_U^{k_l}(T_i)$ dla $1\le l\le n_U(T_i)$.

Stan podsystemu użytkowania U w okresie T_i można więc określić wektorem

$$S_U(T_i)=\left[v_U(T_i),n_U(T_i),\Theta_U^{k_1}(T_i),\Theta_U^{k_2}(T_i),\ldots,\Theta_U^{k_{n_U(T_i)}}(T_i)\right] \qquad (16)$$

Indeksy $k_1,k_2,\ldots,k_{n_U(T_i)}$ określają numery lokomotyw mogących w okresie T_i realizować zadanie systemu $v_U(T_i)$.

Jeśli $n_U(T_i)\ge v_U(T_i)$, to zadanie zostanie w okresie T_i w pełni zrealizowane i $n_U(T_i)-v_U(T_i)$ lokomotyw pozostanie w rezerwie (kolejka KU – rys. 1).

Jeśli $n_U(T_i)<v_U(T_i)$, to zadanie wyznaczone na okres T_i nie zostanie zrealizowane; wszystkie lokomotywy znajdujące się w podsystemie użytkowania U będą pracowały i zabraknie $v_U(T_i)-n_U(T_i)$ lokomotyw do pełnej realizacji zadania systemu eksploatacji.

Niech $\eta_{k_l}(T_i)$ będzie indykatorem określającym, czy k_l-ta lokomotywa pracowała w okresie T_i

$$\eta_{k_l}(T_i)=\begin{cases}1, \text{gdy } k_l \text{ - ta lokomotywa pracow. w okresie } T_i\\ 0, \text{gdy } k_l \text{ - ta lokomotywa nie pracow. w okresie } T_i\end{cases} \qquad (17)$$

Podczas pracy w okresie T_i lokomotywa może ulec uszkodzeniu. Fakt uszkodzenia zostanie jednak stwierdzony dopiero w chwili t_i zakończenia okresu pracy T_i. Można zatem przyjąć, że uszkodzenia lokomotyw w okresie T_i opisuje rozkład dwupunktowy postaci:

$$V_{k_l}(T_i)=P\{\chi_{k_l}(T_i)=x,\ x=0,1\}=\begin{cases}p & \text{dla } x=0\\ 1-p & \text{dla } x=1\end{cases}, \qquad (18)$$

gdzie: $x=0$ oznacza, że lokomotywa ulega uszkodzeniu w okresie T_i,

$x=1$ oznacza, że lokomotywa nie ulega uszkodzeniu w okresie T_i.

Po zakończeniu okresu pracy T_i, w chwili t_i przeprowadza się kontrolę stanu wszystkich lokomotyw i podejmowana jest decyzja, do którego z podsystemów trafi lokomotywa na następny okres czasu T_{i+1}.

Zasób zdatności lokomotyw (niezależnie od numeru identyfikacyjnego k_l), które znajdowały się w okresie T_i w podsystemie **U** użytkowania - ustalany w chwili t_i - jest określony zależnością (w zależności pominięto numer identyfikacyjny lokomotywy, by nie komplikować zapisu):

$$\hat{\Theta}_U(t_i) = \chi(T_i)[\Theta_U(T_i) - \eta(T_i)\cdot \Delta t] \tag{19}$$

Tak więc, jeśli:

- $\eta(T_i) = 1$, tzn., że lokomotywa pracowała w okresie T_i, to możliwe są dwa przypadki:
  1. $\chi(T_i) = 0$ - lokomotywa uległa uszkodzeniu w czasie pracy i wówczas jej zasób zdatności $\hat{\Theta}_U(t_i) = 0$,
  2. $\chi(T_i) = 1$ - lokomotywa nie uległa uszkodzeniu w okresie pracy T_i i wówczas jej zasób zdatności $\hat{\Theta}_U(t_i) = \Theta_U(T_i) - \Delta t$, przy czym $0 < \Theta_U(T_i) \le \gamma \cdot \Delta t$, gdzie $\gamma \cdot \Delta t$ jest zasobem czasu zdatności lokomotywy wchodzącej do podsystemu U.
- $\eta(T_i) = 0$, tzn., że lokomotywa nie pracowała w okresie T_i i jej zasób zdatności nie uległ zmianie $\hat{\Theta}_U(t_i) = \Theta_U(T_i)$, $0 < \Theta_U(T_i) \le \gamma\cdot\Delta t$.

Dla wszystkich lokomotyw, niezależnie od tego czy w okresie T_i pracowały, czy znajdowały się w rezerwie, czy też uległy uszkodzeniu w czasie pracy, podejmowana jest decyzja o skierowaniu ich do jednego z podsystemów **D, P, B, Z, ZB, W**, lub ewentualnym pozostawieniu w podsystemie **U** (w przypadku, gdy $\hat{\Theta}_U(t_i) > 0$).

Niech $\alpha_U(t_i)$ jest liczbą lokomotyw w podsystemie U, dla których została podjęta decyzja o zmianie miejsca w systemie w okresie T_{i+1}. Jest to więc liczba lokomotyw, które w chwili t_i opuszczają podsystem **U**. Jeśli przez $\alpha_{UX}(t_i)$ oznaczy się liczbę lokomotyw, które przechodzą do podsystemu X, to

$$\text{sss}\alpha_U(t_i) = \sum_X \alpha_{UX}(t_i). \tag{20}$$

Jak określa się czas pozostawania lokomotyw w nowym podsystemie X, omówiono wcześniej dla podsystemów **D, P, B, Z, ZB**, natomiast dla podsystemu **W** (opuszczenie przez lokomotywę systemu eksploatacji) czas przebywania w tym podsystemie $\Theta_W(T_{i+1}) = \infty$. Lokomotywa znajduje się wówczas w stanie pochłaniającym $E_k(T_{i+1}) = (W, \infty)$.

Jednocześnie, w chwili t_i do podsystemu U z zasobem zdatności $\Theta_U(T_{i+1}) = \gamma\cdot\Delta t$ wchodzą lokomotywy z pozostałych podsystemów Y. Może także pojawić się w systemie nowa lokomotywa z prawdopodobieństwem $\varphi(t_i)$, co odnotować można jako wejście do podsystemu **U** lokomotywy z podsystemu **O**. Nowa lokomotywa uzyskuje kolejny numer identyfikacyjny, zatem w trakcie porządkowania lokomotyw przy wchodzeniu do podsystemu **U** znajdzie się ona na końcu kolejki.

Przez $\beta_{XU}(t_i)$ oznacza się liczbę lokomotyw, które wchodzą do podsystemu U z innych podsystemów X ($X \in \Phi = \{$**D, P, B, Z, ZB, O**$\}$). Do podsystemu **U** wchodzi zatem w chwili t_i

$$\beta_U(t_i) = \sum_X \beta_{XU}(t_i) \tag{21}$$

lokomotyw. W okresie T_{i+1} będzie zatem w podsystemie U

$$n_U(T_{i+1}) = n_U(T_i) - \alpha_U(t_i) + \beta_U(t_i) \tag{22}$$

lokomotyw.

Tak więc stan podsystemu U w okresie pracy T_{i+1} określa wektor

$$S_U(T_{i+1}) = \left[\nu_U(T_{i+1}), n_U(T_{i+1}), \Theta_U^{k_1}(T_{i+1}), \Theta_U^{k_2}(T_{i+1}), \ldots, \Theta_U^{k_{n_U(T_{i+1})}}(T_{i+1})\right] \tag{23}$$

W chwili t_i ustalany jest stan każdej z $N(T_i)$ lokomotyw znajdujących się w systemie eksploatacji. Na tej podstawie podejmowana jest decyzja $d_k(t_i,X,Y)$ o skierowaniu k-tej lokomotywy, która w okresie T_i znajdowała się w podsystemie X do podsystemu Y na okres T_{i+1}, lub o pozostawieniu jej w tym samym podsystemie.

W przypadku, gdy lokomotywa w okresie T_i znajduje się w podsystemie **U**, decyzja o pozostawieniu jej w tym podsystemie, lub skierowaniu do któregoś z pozostałych podsystemów podejmowana jest w oparciu o:

- pozostały czas zdatności $\hat{\Theta}_U(t_i) = m\cdot\Delta t$, ustalony w chwili t_i na końcu okresu T_i,
- wartość zmiennej losowej $\chi(T_i) = x$ - określającej, czy wystąpiło uszkodzenie lokomotywy w okresie T_i,
- wartość zmiennej losowej $\eta(T_i) = y$ - określającej, czy lokomotywa pracowała w okresie T_i.

Wprowadza się następujące oznaczenie możliwych zdarzeń, które decydują o prawdopodobieństwie podjęcia odpowiedniej decyzji w stosunku do lokomotywy, która w okresie T_i znajdowała się w podsystemie użytkowania **U** – $\omega(m,x,y)$. Dodatkowo prawdopodobieństwo podjęcia decyzji $d(t_i,X,Y)$ pod warunkiem zajścia jednego z możliwych zdarzeń oznacza się następująco:

$$\Pi_{UY}(m,x,y) = P\{d(t_i,U,Y)|\omega(m,x,y)\}. \tag{24}$$

Dla lokomotyw, które w okresie T_i znajdowały się w innych podsystemach niż U, decyzja jest podejmowana tylko w oparciu o pozostały czas przebywania w podsystemie $\hat{\Theta}_X(t_i) = m\cdot\Delta t$, $m = 0,1,2,\ldots$, zatem możliwe zdarzenia oznacza się przez $\omega(m)$, a prawdopodobieństwo podjęcia decyzji $d(t_i,X,Y)$ pod warunkiem zajścia tego zdarzenia oznacza się następująco:

$$\Pi_{XY}(m) = P\{d(t_i,X,Y)|\omega(m)\}. \tag{25}$$

Prawdopodobieństwa warunkowe podjęcia decyzji dotyczących zmiany stanu poszczególnych lokomotyw zależą od przyjętej struktury modelu systemu. Dla wariantu V.1 funkcjonowania systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych, zestawienie prawdopodobieństw warunkowych podjęcia decyzji o zmianie podsystemu przez lokomotyw z X na Y – przedstawiono w tabeli 1. Taki sam zbiór prawdopodobieństw dla wariantu V.2 funkcjonowania systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych, zamieszczono w tabeli 2.

Rozpatrując system eksploatacji w długim okresie czasu T takim, że jest on wielokrotnością okresów T_i o długości Δt

$$T = M \cdot \Delta t, \quad M \in \mathbb{N}, \tag{26}$$

można w następujący sposób określić sumaryczne zadanie nakładane na system eksploatacji w kolejnych okresach czasu $T_1, T_2, \ldots, T_M$:

$$v_U(T) = \sum_{i=1}^{M} v_U(T_i) \cdot \Delta t \ . \tag{27}$$

W tym samym okresie czasu T, sumaryczną realizację zadań w kolejnych okresach czasu T_i $(i = 1, 2, \ldots, M)$ można przedstawić za pomocą zależności:

$$Z_U(T) = \sum_{i=1}^{M} \min\{n_U(T_i), v_U(T_i)\} \cdot \Delta t \ . \tag{28}$$

Zestawienie prawdopodobieństw warunkowych podjęcia decyzji o zmianie stanu lokomotyw dla wariantu V.1 funkcjonowania systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych

Tabela 1

X \ Y		U	P	B	Z	ZB	W
U:	$\omega(0,0,1)$	0	$\Pi_{UP}(0,0,1)$	$\Pi_{UB}(0,0,1)$	$\Pi_{UZ}(0,0,1)$	$\Pi_{UZB}(0,0,1)$	$\Pi_{UW}(0,0,1)$
	$\omega(0,1,1)$	0	$\Pi_{UP}(0,1,1)$	0	$\Pi_{UZ}(0,1,1)$	$\Pi_{UZB}(0,1,1)$	0
	$\omega(m,0,1)$	0	0	$\Pi_{UB}(m,0,1)$	$\Pi_{UZ}(m,0,1)$	$\Pi_{UZB}(m,0,1)$	$\Pi_{UW}(m,0,1)$
	$\omega(m,1,0)$	$\Pi_{UU}(m,1,0)$	$\Pi_{UP}(m,1,0)$	0	$\Pi_{UZ}(m,1,0)$	$\Pi_{UZB}(m,1,0)$	0
	$\omega(m,1,1)$	$\Pi_{UU}(m,1,1)$	$\Pi_{UP}(m,1,1)$	$\Pi_{UB}(m,1,1)$	$\Pi_{UZ}(m,1,1)$	$\Pi_{UZB}(m,1,1)$	0
P:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	1	0	0	0	0
B:	$\omega(0)$	$\Pi_{BU}(0)$	0	0	$\Pi_{BZ}(0)$	0	0
	$\omega(m)$	0	0	1	0	0	0
Z:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	0	0	1	0	0
ZB:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	0	0	0	1	0

Zestawienie prawdopodobieństw warunkowych podjęcia decyzji o zmianie stanu lokomotyw dla wariantu V.2 funkcjonowania systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych

Tabela 2

X \ Y		U	D	P	B	Z	ZB	W
U:	$\omega(0,0,1)$	0	$\Pi_{UD}(0,0,1)$	0	$\Pi_{UB}(0,0,1)$	$\Pi_{UZ}(0,0,1)$	$\Pi_{UZB}(0,0,1)$	$\Pi_{UW}(0,0,1)$
	$\omega(0,1,1)$	0	$\Pi_{UD}(0,1,1)$	0	0	$\Pi_{UZ}(0,1,1)$	0	0
	$\omega(m,0,1)$	0	$\Pi_{UD}(m,0,1)$	0	$\Pi_{UB}(m,0,1)$	$\Pi_{UZ}(m,0,1)$	$\Pi_{UZB}(m,0,1)$	$\Pi_{UW}(m,0,1)$
	$\omega(m,1,0)$	$\Pi_{UU}(m,1,0)$	$\Pi_{UD}(m,1,0)$	0	0	$\Pi_{UZ}(m,1,0)$	0	0
	$\omega(m,1,1)$	$\Pi_{UU}(m,1,1)$	$\Pi_{UD}(m,1,1)$	0	$\Pi_{UB}(m,1,1)$	$\Pi_{UZ}(m,1,1)$	$\Pi_{UZB}(m,1,1)$	0
D:	$\omega(0)$	0	0	$\Pi_{DP}(0)$	$\Pi_{DB}(0)$	0	0	0
	$\omega(m.)$	0	1	0	0	0	0	0
P:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	0	1	0	0	0	0
B:	$\omega(0)$	$\Pi_{BU}(0)$	0	0	0	$\Pi_{BZ}(0)$	0	0
	$\omega(m)$	0	0	0	1	0	0	0
Z:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	0	0	0	1	0	0
ZB:	$\omega(0)$	1	0	0	0	0	0	0
	$\omega(m)$	0	0	0	0	0	1	0

Miary przedstawione zależnościami (26) i (27), pozwalają na zdefiniowanie miary gotowości systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych postaci:

$$\Gamma(T)=\frac{Z_U(T)}{v_U(T)}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\min\{n_U(T_i),v_U(T_i)\}}{\sum_{i=1}^{M}v_U(T_i)} \tag{29}$$

Współczynnik $\Gamma(T)$ zależy więc, zarówno od liczby lokomotyw zdatnych do realizacji zadań, jak i od liczby zadań nakładanych na system eksploatacji.

3. Symulator cyfrowy

Strukturę statyczną zintegrowanego wielofazowego modelu systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych przedstawioną na rys. 1 odwzorowano w symulatorze cyfrowym SEL_DNB.Exe (System Eksploatacji Lokomotyw – Diagnostyka, Niezawodność, Bezpieczeństwo). Program SEL_DNB.Exe został oprogramowany w języku Turbo Pascal. Włączono go do pakietu programów PSES (Pakiet Symulacyjny Eksploatacyjnych Systemów) [1]. W ramach tego pakietu symulator korzysta z programów: DATA_97.EXE, ROZZ_97.EXE [3]. Jeden z podstawowych ekranów programu SEL_DNB.Exe pokazano na rys. 4.

4. Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono opis formalny modelu systemu eksploatacji lokomotyw spalinowych. Integruje on model lokomotyw spalinowych i modele podsystemów systemu eksploatacji. Model stworzono w koncepcji systemów kolejkowych.

Przedstawiony model jest pierwszym ze znanych autorom niniejszego artykułu modeli pozwalających uwzględnić trzy następujące aspekty eksploatacji lokomotyw spalinowych: diagnostyczny, niezawodnościowy i bezpieczeństwa.

Aspekt diagnostyczny wyraża się m.in. tym, że w modelu istnieją możliwości uwzględnienia diagnozowania spalinowych silników trakcyjnych w procesach eksploatacji lokomotyw.

Aspekt niezawodnościowy występuje w tym, że model odwzorowuje stany niezawodnościowe lokomotyw, a w szczególności pozwala uwzględnić zdarzenia zawodności sprawności i konsekwencje tych zdarzeń dla procesów eksploatacji lokomotyw.

Aspekt bezpieczeństwa w zaprezentowanym modelu to możliwość modelowania w odwzorowywanym systemie zdarzeń zawodności bezpieczeństwa oraz ich konsekwencji.

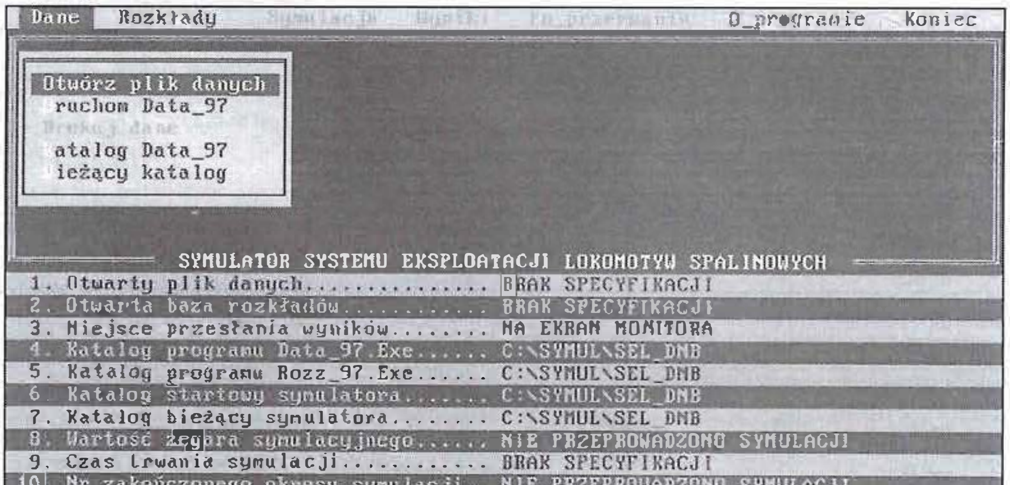
Wobec złożoności warunków działania systemów eksploatacji lokomotyw spalinowych jedną z najefektywniejszych metodą badania tych systemów jest metoda modelowania cyfrowego. Możliwości aplikacyjne tej metody do badania wybranych aspektów diagnozowania, niezawodności i bezpieczeństwa (symulator SEL_DNB.Exe) zostaną przedstawione w kolejnej publikacji.

Literatura

[1] *Kadziński A., Koncepcje planowania i optymalizacji eksploatacji pojazdów z uwzględnieniem ich niezawodności na przykładzie pojazdów szynowych. Czasopismo Techniczne. Mechanika. Z.2-M/1991, s.108÷122. Wyd. Politechniki Krakowskiej.*

[2] *Kadziński A., Tomaszewski F., Badanie wpływu fazy diagnozowania spalinowych silników trakcyjnych na charakterystyki efektywnościowe systemów eksploatacji lokomotyw. Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej DIAGNOSTYKA'99 nt. Diagnostyka maszyn roboczych i pojazdów, Bydgoszcz – Borówno, 1999, część. 1, s. 267÷275.*

[3] *Modernizacja pakietu komputerowych modeli symulacyjnych systemów eksploatacji kolejowych pojazdów szynowych. Raport z badań prowadzonych w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej, 1997, temat TB52-671/97, kierownik tematu A. Kadziński, nie publikowane.*



Rys. 4. Jeden z podstawowych ekranów programu SEL_DNB.Exe