

METODA WYZNACZANIA GOTOWOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU MIEJSKIEGO Z UWZGLĘDNIENIEM SKUTECZNOŚCI WYKONYWANYCH NAPRAW

Maciej WOROPAY
Klaudiusz MIGAWA

Katedra Eksploatacji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Akademia Techniczno – Rolnicza
w Bydgoszczy

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania gotowości systemu transportowego z wykorzystaniem oceny skuteczności realizowanych napraw na stanowiskach podsystemu utrzymania ruchu. W wyniku identyfikacji procesu eksploatacji realizowanego w rzeczywistym systemie transportu miejskiego został zbudowany zdarzeniowy model tego procesu. Na tej podstawie wyznaczono prawdopodobieństwa graniczne p_i^* przebywania pojedynczego autobusu w poszczególnych stanach procesu eksploatacji zakładając, że modelem procesu eksploatacji obiektów technicznych (autobusów miejskich) jest jednorodny proces Markowa $X(t)$.

Słowa kluczowe: system transportowy, gotowość, proces Markowa, diagnozowanie.

THE METHOD OF SHAPING THE AVAILABILITY DESIGNED FOR THE TRANSPORT SYSTEM ON THE BASIS OF THE EFFECTIVENESS OF PERFORMED REPAIRS

Maciej WOROPAY
Klaudiusz MIGAWA

Summary

The paper presents the method of shaping the availability of the transport system on the basis of evaluation of the effectiveness of repairs, performed on special stations of the road traffic subsystem. The occurrence model was created as the result of identification of the maintenance process, realized in the real urban transport system. Furthermore, all border probabilities p_i^* of finding the single bus in individual maintenance conditions have been determined, with the general assumption, that the homogeneous Markov's process $X(t)$ is the model of the maintenance process of mentioned technical objects (urban buses).

1. WPROWADZENIE

Systemy transportowe są systemami, których głównym celem jest realizacja zadań przewozowych na wyznaczonym obszarze terytorialnym. Do podstawowych wymagań stawianych nowoczesnym systemom transportowym, w tym również systemom transportu miejskiego, należy zapewnienie:

- bezpieczeństwa przewozów,
- terminowości przewozów,
- odpowiedniej częstotliwości kursów.

Bezpośrednią realizacją zadań systemu zajmuje się podsystem wykonawczy złożony z podsystemów elementarnych typu człowiek – obiekt techniczny (kierowca – autobus).

Na możliwość prawidłowej realizacji zadań przewozowych w istotny sposób wpływa gotowość systemu transportowego. Gotowość systemu

transportowego utrzymywana jest na odpowiednim poziomie w wyniku realizacji procesów dotyczących obsługiwanego eksploatacyjnych obiektów technicznych i zależy od skuteczności realizacji tych procesów. Procesy te realizowane są na poszczególnych stanowiskach podsystemu utrzymania ruchu.

Wyznaczanie wartości wskaźników skuteczności realizacji procesów obsługiwanego obiektów technicznych umożliwia ocenę procesów realizowanych na poszczególnych stanowiskach podsystemu utrzymania ruchu.

Natomiast kształtowanie wartości wskaźników gotowości systemu transportu miejskiego umożliwia racjonalne sterowanie procesem eksploatacji realizowanym w tym systemie.

2. OBIEKT BADAŃ

System eksploatacji autobusowego transportu miejskiego złożony jest z następujących podsystemów:

- 1) systemu logistycznego, złożonego z:
 - a) podsystemu sterującego:
 - podsystemu zarządzania eksploatacją (kierownik zakładu i jego zastępcy),
 - podsystemu informacyjnego (wydział techniczno-eksploatacyjny),
 - podsystemu użytkownika (wydział dyspozycji ruchu),
 - b) podsystemu utrzymania ruchu:
 - podsystemu zaopatrzenia w paliwo,
 - podsystemu obsługiwanego,
 - podsystemu diagnostycznego,
 - c) podsystemu zasilającego;
- 2) systemu wykonawczego, złożonego z podsystemów elementarnych (autobus miejski - kierowca), które realizują zadanie systemu transportowego (przewozy pasażerskie).

Obiektem badań jest system utrzymania ruchu będący podsystemem rzeczywistego systemu eksploatacji autobusowego transportu miejskiego w wybranej aglomeracji miejskiej.

Podsystem utrzymania ruchu złożony jest z podsystemu zaopatrzenia w paliwo, podsystemu obsługiwanego oraz współdziałającego z nim podsystemu diagnostycznego.

W podsystemie obsługiwanego realizowane są procesy odnowy oraz obsługi środków transportu. Zadaniem podsystemu diagnostycznego jest wyznaczanie, na podstawie sygnałów i symptomów diagnostycznych, przeszłych, aktualnych oraz przyszłych stanów eksploatowanych w systemie środków transportu.

Wyżej wymienione procesy realizowane są na specjalnie do tego celu przeznaczonych stanowiskach. W analizowanym podsystemie utrzymania ruchu wyróżniono następujące rodzaje stanowisk:

- stanowisko stacji paliw,
- stanowisko obsługi w dniu użytkowania,
- stanowisko obsługi technicznych,
- stanowisko diagnostyczne,
- stanowiska napraw bieżących i specjalistycznych.

3. ZDARZENIOWY MODEL PROCESU EKSPLOATACJI

Poszczególne obiekty techniczne (autobusy) użytkowane w systemie transportu miejskiego

mogą znajdować się w różnych stanach eksploatacyjnych. Na podstawie identyfikacji podsystemu utrzymania ruchu w systemie autobusowego transportu miejskiego i realizowanego w nim wielostanowego procesu eksploatacji obiektów technicznych, wyróżniono istotne stany tego procesu, zdefiniowane poniżej w następujący sposób:

S₁ – Stan uzupełniania paliwa

Stan uzupełniania paliwa w autobusach jest to stan, w którym realizowane są czynności związane z napełnieniem zbiorników paliwa w autobusach.

W analizowanym systemie transportu miejskiego uzupełnianie paliwa w autobusach wykonywane jest na stanowisku stacji paliw:

- w autobusach zdalnych (zjazd planowy) – bezpośrednio po zakończeniu realizacji dziennego zadania przewozowego,
- w autobusach, w których wystąpiło uszkodzenie (zjazd awaryjny) – przed diagnozowaniem przednaprawczym lub naprawą.

S₂ – Stan realizacji obsługi w dniu użytkowania

Stan realizacji obsługi w dniu użytkowania autobusu jest to stan, w którym realizowane są czynności obsługowo-kontrolne zgodnie z instrukcją obsługi w dniu użytkowania autobusu, wynikające ze stosowanej strategii eksploatacji.

W badanym systemie transportu miejskiego obsługa w dniu użytkowania autobusu wykonywana jest w Stacji Obsługi na przeznaczonym do tego celu stanowisku:

- w autobusach zdalnych - po uzupełnieniu paliwa,
- w autobusach, w których wystąpiło uszkodzenie – po przywróceniu stanu zdalności.

S₃ – Stan realizacji obsługi technicznej

Stan realizacji obsługi technicznej autobusu jest to stan, w którym realizowane są czynności obsługowo-kontrolne zgodnie z instrukcją obsługi technicznej autobusu, wynikające ze stosowanej strategii eksploatacji.

W badanym systemie transportu miejskiego obsługa techniczna autobusu wykonywana jest w Stacji Obsługi na przeznaczonym do tego celu stanowisku według harmonogramu obsługi technicznych.

S₄ – Stan diagnozowania

Stan diagnozowania autobusu jest to stan, w którym znajdujący się na stanowisku diagnostycznym Stacji Obsługi autobus podlega procesowi diagnozowania.

Jako diagnozowanie autobusu w szczególności rozumie się:

- diagnozowanie przednaprawcze (gdy autobus znajduje się w stanie niezdatności zadaniowej),
- diagnozowanie ponaprawcze (jako kontrola poprawności procesu odnowy)
- diagnozowanie po obsłudze technicznej (jako kontrola realizacji procesu obsługi technicznej).

S_5 – Stan realizacji odnowy

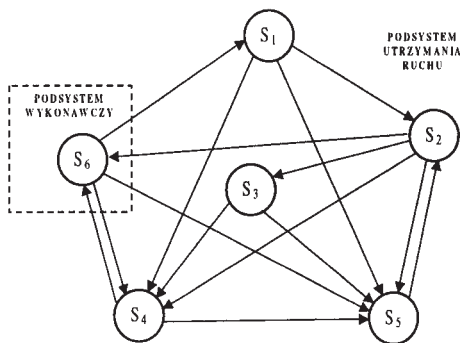
Stan realizacji odnowy autobusu wykonywanej na stanowiskach napraw Stacji Obsługi jest to stan, w którym niezdatny zadaniowo autobus podlega działaniom zmierzającym do przywrócenia mu stanu zdatności zadaniowej.

S_6 – Stan przebywania w podsystemie wykonawczym

Stan przebywania autobusu w podsystemie wykonawczym jest stanem zagregowanym dotyczącym zarówno podstanów autobusu, gdy znajduje się on na trasie oraz gdy przebywa na placu postojowym.

W niniejszym opracowaniu, ze względu na jego cel, podstany stanu przebywania autobusu w podsystemie wykonawczym nie są analizowane.

W wyniku identyfikacji procesu eksploatacji realizowanego w badanym systemie zostały wyznaczone możliwe przejścia między wyróżnionymi stanami eksploatacyjnymi. Na tej podstawie został zbudowany wstępny graf zmian stanów procesu eksploatacji, przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Graf skierowany odwzorowania procesu eksploatacji transportu miejskiego

Stan S_5 realizacji odnowy autobusu jest stanem zagregowanym, złożonym z podstanów. W pracy przyjęto, że stan ten złożony jest z 10 podstanów. Wówczas stan S_5 jest tzw. stanem przełączającym.

Podstany stanu odnowy autobusu zostały wyróżnione ze względu na rodzaj uszkodzonego (naprawianego) układu autobusu:

- S_{51} – Stan realizacji odnowy silnika z osprzętem (SI)
- S_{52} – Stan realizacji odnowy układu przeniesienia napędu (PN)

S_{53} – Stan realizacji odnowy układu kierowniczego (UK)

S_{54} – Stan realizacji odnowy układu hamulcowego (HA)

S_{55} – Stan realizacji odnowy układu zawieszenia (ZA)

S_{56} – Stan realizacji odnowy układu jezdnego (UJ)

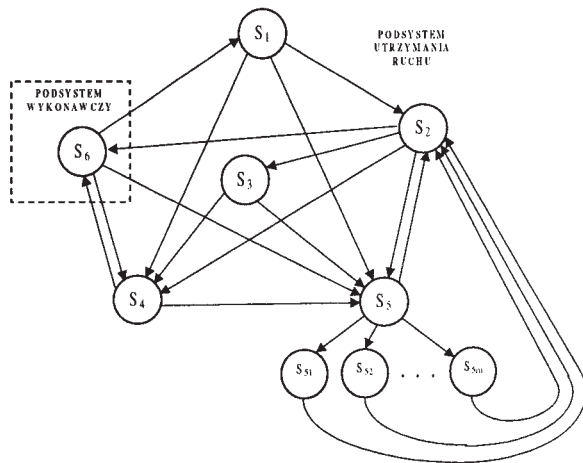
S_{57} – Stan realizacji odnowy nadwozia (NA)

S_{58} – Stan realizacji odnowy układu elektrycznego (UE)

S_{59} – Stan realizacji odnowy układu zasilania sprężonym powietrzem (ZP)

S_{510} – Stan realizacji odnowy układów pozostałych (IN)

Na tej podstawie został zbudowany wynikowy graf zmian stanów procesu eksploatacji, przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Graf skierowany odwzorowania procesu eksploatacji transportu miejskiego

4. SKUTECZNOŚĆ WYKONYWANYCH NAPRAW

W celu oceny wykonywanych napraw w systemie transportu miejskiego, został wprowadzony wskaźnik skuteczności wykonywanych napraw, zdefiniowany poniżej za pomocą wzorów. Ocena skuteczności wykonywania napraw obiektów technicznych (autobusów), eksploatowanych w analizowanym systemie transportu miejskiego, dotyczy poszczególnych układów autobusu. Z tego powodu statystyczny autobus miejski został zdekomponowany na j układów, $j = 1, 2, \dots, m$.

Wprowadzając następujące oznaczenia:

$L(t)$ – sumaryczna liczba uszkodzeń badanych autobusów do chwili t , opisana zależnością:

$$L(t) = \sum_j L_{S_j}(t), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$L_{5j}(t)$ – liczba uszkodzeń j -tego układu do chwili t , opisana zależnością:

$$L_{5j}(t) = L_{5j}^Z(t) + L_{5j}^P(t), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

gdzie:

$L_{5j}^Z(t)$ – liczba uszkodzeń j -tego układu do chwili t , spowodowanych niewłaściwą jakością wykonania poprzedniej naprawy,

$L_{5j}^P(t)$ – liczba uszkodzeń j -tego układu, powstałych do chwili t z przyczyn innych niż niewłaściwa jakość wykonania poprzedniej naprawy.

Zarówno wartości $L_{5j}^Z(t)$ oraz $L_{5j}^P(t)$ wyznaczane są w trakcie tzw. diagnozowania przednaprawczego, realizowanego na stanowisku diagnostycznym S_4 przed naprawą każdego uszkodzonego układu autobusów.

Wówczas wskaźnik skuteczności wykonywania napraw j -tego układu autobusu opisany jest zależnością:

$$U_{5j}(t) = \frac{L_{5j}(t) - L_{5j}^Z(t)}{L_{5j}(t)} = \frac{L_{5j}^P(t)}{L_{5j}(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Dodatkowo zostały wprowadzone następujące wielkości, charakteryzujące omawiany system transportowy:

$\pi_{5j}(t)$ – prawdopodobieństwo tego, że spośród m układów autobusu uszkodzi się j -ty układ, opisane zależnościami:

$$\pi_{5j}(t) = \frac{L_{5j}(t)}{L(t)} = \frac{L_{5j}^Z(t) + L_{5j}^P(t)}{L(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

lub

$$\pi_{5j}(t) = \pi_{5j}^Z(t) + \pi_{5j}^P(t), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

gdzie:

$\pi_{5j}^Z(t)$ – prawdopodobieństwo tego, że spośród m układów autobusu uszkodzi się j -ty układ oraz uszkodzenie to będzie spowodowane niewłaściwą jakością wykonania poprzedniej naprawy, opisane zależnością:

$$\pi_{5j}^Z(t) = \frac{L_{5j}^Z(t)}{L(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$\pi_{5j}^P(t)$ – prawdopodobieństwo tego, że spośród m układów autobusu uszkodzi się j -ty układ oraz uszkodzenie to będzie spowodowane innymi przyczynami niż niewłaściwa jakość wykonania poprzedniej naprawy, opisane zależnością:

$$\pi_{5j}^P(t) = \frac{L_{5j}^P(t)}{L(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$F_{5j}(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia autobusu do chwili t oraz, że uszkodzonym układem będzie j -ty układ autobusu, opisane zależnością:

$$F_{5j}(t) = \pi_{5j}(t) \cdot F(t), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

gdzie:

$F(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia autobusu do chwili t , opisane zależnością:

$$F(t) = \frac{L(t)}{N} \quad (9)$$

gdzie:

N – liczba wszystkich autobusów w systemie,

lub

$$F_{5j}(t) = \frac{L_{5j}(t)}{L(t)} \cdot \frac{L(t)}{N} = \frac{L_{5j}(t)}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Wówczas wskaźnik skuteczności wykonywania napraw j -tego układu autobusu opisany jest zależnościami:

$$U_{5j}(t) = \frac{\pi_{5j}(t) - \pi_{5j}^Z(t)}{\pi_{5j}(t)} = \frac{\pi_{5j}^P(t)}{\pi_{5j}(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$U_{5j}(t) = \frac{F_{5j}(t) - F_{5j}^Z(t)}{F_{5j}(t)} = \frac{F_{5j}^P(t)}{F_{5j}(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

gdzie:

$F_{5j}^Z(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia j -tego układu autobusu do chwili t oraz, że uszkodzenie to będzie spowodowane niewłaściwą jakością wykonania poprzedniej naprawy, opisane zależnością:

$$F_{5j}^Z(t) = \frac{L_{5j}^Z(t)}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$F_{5j}^P(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia j -tego układu autobusu do chwili t oraz, że uszkodzenie to będzie spowodowane innymi przyczynami niż niewłaściwa jakość wykonania poprzedniej naprawy, opisane zależnością:

$$F_{5j}^P(t) = \frac{L_{5j}^P(t)}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

5. WYZNACZENIE GOTOWOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU MIEJSKIEGO

Każdemu łukowi grafu przedstawionego na rys. 2, łączącemu dwa stany odpowiada wartość prawdopodobieństwa p_{ij} przejścia procesu $X(t)$ ze stanu $i = 1, 2, 3, 4, 5, 5_1, 5_2, \dots, 5_{10}, 6$ do stanu $j = 1, 2, 3, 4, 5, 5_1, 5_2, \dots, 5_{10}, 6$, według wzoru:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad i, j = 1, 2, \dots; \quad i \neq j \quad (15)$$

$$p_{ii} = 0, \quad i = 1, 2, \dots \quad (16)$$

gdzie:

n_{ij} – liczba przejść procesu $X(t)$ ze stanu i do stanu j w czasie obserwacji T , według zależności:

$$n_{ij} = N_{ij}(T), \quad i, j = 1, 2, \dots; \quad i \neq j \quad (17)$$

$$n_{ii} = N_{ii}(T) = 0, \quad i = 1, 2, \dots \quad (18)$$

gdzie:

$N_{ij}(T)$ – estymator liczby przejść procesu $X(t)$ ze stanu i do stanu j w czasie obserwacji T ,

n_i – sumaryczna liczba wyjść procesu $X(t)$ ze stanu i w czasie T , według zależności:

$$n_i = N_i(T) = \sum_{j \neq i}^m N_{ij}(T), \quad i = 1, 2, \dots \quad (19)$$

gdzie:

$N_i(T)$ – estymator sumarycznej liczby wyjść procesu $X(t)$ ze stanu i w czasie T .

Prawdopodobieństwa p_{ij} przejść procesu ze stanu $i = 5$ do stanów $j = 5_1, 5_2, \dots, 5_{10}$ zostały oznaczone:

$$p_{5.51} = q_1;$$

$$p_{5.52} = q_2;$$

.

.

.

$$p_{5.510} = q_{10}.$$

Na podstawie grafu skierowanego przedstawionego na rys. 2 została wyznaczona macierz prawdopodobieństw przejść P :

$$P = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & p_{14} & p_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{23} & p_{24} & p_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{26} \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & q_6 & q_7 & q_8 & q_9 & q_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{61} & 0 & 0 & p_{64} & p_{65} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Zakładamy, że modelem procesu eksploatacji autobusów jest jednorodny proces Markowa $X(t)$. Proces $X(t)$ ma skończoną przestrzeń fazową $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 5_1, 5_2, \dots, 5_{10}, 6\}$. Wówczas wyróżnić można następujące stany procesu $X(t)$:

$X(t)=1$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie uzupełniania paliwa;

$X(t)=2$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie realizacji obsługi codziennej;

$X(t)=3$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie realizacji obsługi technicznej;

$X(t)=4$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie diagnozowania;

$X(t)=5$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie przełączającym;

$X(t)=5_1$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy silnika z osprzętem;

$X(t)=5_2$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu przeniesienia napędu;

$X(t)=5_3$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu kierowniczego;

$X(t)=5_4$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu hamulcowego;

$X(t)=5_5$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu zawieszenia;

$X(t)=5_6$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu jezdnego;

$X(t)=5_7$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy nadwozia;

$X(t)=5_8$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu elektrycznego;

$X(t)=5_9$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układu zasilania sprężonym powietrzem;

$X(t)=5_{10}$, to w chwili t autobus znajduje się w stanie naprawy układów pozostałych;

$X(t)=6$, to w chwili t autobus znajduje się w podsystemie wykonawczym.

Oznaczmy przez $p_i(t) = P\{X(t)=i\}$ prawdopodobieństwo tego, że w chwili t proces $X(t)$ znajduje się w i -tym stanie. Zakładamy, że w chwili początkowej $t=0$ proces $X(t)$ znajduje się w stanie S_6 (stan S_6 jest stanem początkowym procesu). Wówczas rozkład początkowy ma następującą postać:

$$p_6(t) = P\{X(0)=6\} = 1;$$

$$p_i(t) = P\{X(0)=i\} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 5_1, 5_2, \dots, 5_{10}. \quad (21)$$

Intensywności przejść między poszczególnymi stanami procesu $X(t)$ zostały przedstawione za pomocą macierzy Λ :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 & \lambda_{14} & \lambda_{15} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & 0 & 0 & & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & -\lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_{44} & \lambda_{45} & 0 & 0 & & 0 & \lambda_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{55} & \lambda_{51} & \lambda_{52} & & \lambda_{510} & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_2 & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \mu_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & -\mu_{10} & 0 \\ \lambda_{61} & 0 & 0 & \lambda_{64} & \lambda_{65} & 0 & 0 & & 0 & -\lambda_{66} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Wykonanie obliczeń polegających na wyznaczeniu kolejnych potęg macierzy P umożliwiło sformułowanie następującego wniosku:

Wniosek 1: Dla analizowanego procesu Markowa zachodzi twierdzenie ergodyczne, tzn. istnieją granice:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i^*, \text{ dla } i = 1, 2, \dots, 6. \quad (23)$$

Jednocześnie dla tak wyznaczonych prawdopodobieństw granicznych spełnione są następujące warunki:

$$\sum_{i=1}^6 \lambda_{ij} \cdot p_i^* = 0, \text{ dla } j = 1, 2, \dots, 6; \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^6 p_i^* = 1. \quad (25)$$

Na podstawie macierzy intensywności przejść Λ został zbudowany układ równań liniowych (26) spełniający warunek (24):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda_{11} \cdot p_1^* + \lambda_{61} \cdot p_6^* = 0 \\ \lambda_{12} \cdot p_1^* - \lambda_{22} \cdot p_2^* + \mu_1 \cdot p_{51}^* + \mu_2 \cdot p_{52}^* + \dots + \mu_0 \cdot p_{510}^* = 0 \\ \lambda_{23} \cdot p_2^* - \lambda_{33} \cdot p_3^* = 0 \\ \lambda_{14} \cdot p_1^* + \lambda_{24} \cdot p_2^* + \lambda_{34} \cdot p_3^* - \lambda_{44} \cdot p_4^* + \lambda_{64} \cdot p_6^* = 0 \\ \lambda_{15} \cdot p_1^* + \lambda_{25} \cdot p_2^* + \lambda_{35} \cdot p_3^* + \lambda_{45} \cdot p_4^* - \lambda_{55} \cdot p_5^* + \lambda_{65} \cdot p_6^* = 0 \\ \lambda_{q1} \cdot p_5^* - \mu_1 \cdot p_{51}^* = 0 \\ \lambda_{q2} \cdot p_5^* - \mu_2 \cdot p_{52}^* = 0 \\ \dots \\ \lambda_{q10} \cdot p_5^* - \mu_{10} \cdot p_{510}^* = 0 \\ \lambda_{26} \cdot p_2^* + \lambda_{46} \cdot p_4^* - \lambda_{66} \cdot p_6^* = 0 \end{array} \right. \quad (26)$$

Układ równań (26) jest układem zależnym. Oznacza to, że dla rozwiązania tego układu jedno z równań układu (np. równanie piąte) należy zastąpić warunkiem normalizacyjnym (25). Wówczas układ równań (26) został zapisany w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_{61} \\ \lambda_{12} & -\lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \mu_1 & \mu_2 & & \mu_0 & 0 \\ 0 & \lambda_{23} & -\lambda_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_{44} & 0 & 0 & 0 & & 0 & \lambda_{64} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} & -\mu_1 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{52} & 0 & -\mu_2 & & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{510} & 0 & 0 & & -\mu_{10} & 0 \\ 0 & \lambda_{26} & 0 & \lambda_{46} & 0 & 0 & 0 & & 0 & -\lambda_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \\ p_3^* \\ p_4^* \\ p_5^* \\ p_{51}^* \\ p_{52}^* \\ \dots \\ p_{510}^* \\ p_6^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

W wyniku rozwiązania układu (27) otrzymano prawdopodobieństwa graniczne p_i^* przebywania

w stanach S_i dla procesu Markowa $X(t)$, opisane następującymi zależnościami:

$$p_1^* = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{61}} - \frac{b}{a} \left(1 + \frac{\lambda_{33}}{\lambda_{23}} \right) + d + c} \quad (28)$$

$$p_2^* = -p_1^* \frac{\lambda_{33} \cdot b}{\lambda_{23} \cdot a} \quad (29)$$

$$p_3^* = -p_1^* \frac{b}{a} \quad (30)$$

$$p_4^* = p_1^* \cdot d \quad (31)$$

$$p_{51}^* = p_1^* \frac{\lambda_{q1} \cdot c}{\mu_1} \quad (32)$$

$$p_{52}^* = p_1^* \frac{\lambda_{q2} \cdot c}{\mu_2} \quad (33)$$

$$\dots \\ \dots \\ p_{510}^* = p_1^* \frac{\lambda_{q10} \cdot c}{\mu_{10}} \quad (41)$$

$$p_6^* = p_1^* \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{61}} \quad (42)$$

gdzie:

$$a = \lambda_{34} + \frac{\lambda_{24} \cdot \lambda_{33}}{\lambda_{23}} + \frac{\lambda_{26} \cdot \lambda_{33} \cdot \lambda_{44}}{\lambda_{23} \cdot \lambda_{46}} \quad (43)$$

$$b = \lambda_{14} + \frac{\lambda_{64} \cdot \lambda_{11}}{\lambda_{61}} - \frac{\lambda_{11} \cdot \lambda_{44} \cdot \lambda_{66}}{\lambda_{61} \cdot \lambda_{46}} \quad (44)$$

$$c = - \left(\frac{b \cdot \lambda_{22} \cdot \lambda_{33}}{a \cdot \lambda_{23} \cdot \sum_{i=1}^{10} \lambda_{qi}} + \frac{\lambda_{12}}{\sum_{i=1}^{10} \lambda_{qi}} \right) \quad (45)$$

$$d = \frac{\lambda_{11} \cdot \lambda_{66}}{\lambda_{61} \cdot \lambda_{46}} + \frac{b \cdot \lambda_{26} \cdot \lambda_{33}}{a \cdot \lambda_{23} \cdot \lambda_{46}} \quad (46)$$

W ogólnym przypadku, dla wyznaczonych prawdopodobieństw granicznych p_i^* przebywania w stanach S_i procesu Markowa $X(t)$, gotowość systemu eksploatacji wyznaczyć można ze wzoru przedstawionego zależnością:

$$G = \sum_{i \in E^+} p_i^*, \quad i = 1, 2, \dots \quad (47)$$

gdzie:

E^+ - zbiór stanów procesu, zaliczanych do stanów gotowości do działania w systemie eksploatacji.

6. PODSUMOWANIE

1. Przedstawiona metoda umożliwia wyznaczenie gotowości systemu

transportowego z uwzględnieniem skuteczności realizowanych napraw.

2. Skuteczność napraw oceniana jest na podstawie wartości wskaźnika skuteczności realizacji napraw poszczególnych układów autobusów eksploatowanych w systemie transportu miejskiego.
3. Wyznaczenie wartości wskaźnika skuteczności realizacji napraw możliwe jest na podstawie diagnozy przednaprawczej, określającej przyczyny powstania uszkodzeń układów autobusów.
4. Zwiększenie gotowości systemu transportowego można uzyskać przez poprawę skuteczności wykonywanych napraw na stanowiskach podsystemu utrzymania ruchu. Dlatego proponuje się:
 - wprowadzenie procesów diagnostycznych, zarówno przed naprawą jak i po naprawie, o szerszym zakresie i dla wszystkich uszkodzonych (naprawionych) układów autobusów,
 - weryfikację, na podstawie wartości wskaźnika skuteczności realizowanych napraw, kwalifikacji pracowników podsystemu utrzymania ruchu,
 - zwiększenie kwalifikacji pracowników podsystemu utrzymania ruchu przez ich kształcenie lub wymianę na pracowników o wyższych kwalifikacjach.

7. LITERATURA

- [1] Będkowski L.: Elementy diagnostyki technicznej. WAT, Warszawa 1992
- [2] Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach. WNT, Warszawa 1985
- [3] Iosifescu M.: Skończone procesy Markowa i ich zastosowania. PWN, Warszawa 1988
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją J. Migdalskiego: Inżynieria niezawodności – Poradnik. ATR Bydgoszcz, ZETOM, Warszawa 1992
- [5] Praca zbiorowa pod redakcją И. А. Ушакова: Надежность технических систем – Справочник. Радио и Связь, Moskwa 1985
- [6] Sołowiew A. D.: Analityczne metody w teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1983
- [7] Woropay M.: Diagnostyka a niezawodność systemów technicznych. Postępy Cybernetyki, Ossolineum, Zeszyt 2/1983

[8] Woropay M.: Ocena istotności czynników w procesie modelowania jako wielokrotne zadanie diagnostyczne. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Warszawa 1992

[9] Żurek J.: Problemy gotowości techniki lotniczej. Rozdział 13. Praca zbiorowa: Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej. Tom 2. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 1993



Prof. dr hab. inż. **Maciej Woropay** jest kierownikiem Katedry Eksploatacji Maszyn Wydziału Mechanicznego Akademii Techniczno – Rolniczej w Bydgoszczy.

W pracy naukowej zajmuje się problemami dotyczącymi teorii systemów, teorii niezawodności i bezpieczeństwa i sterowania procesami eksploatacji w złożonych systemach biotechnicznych, a w szczególności sterowaniem tymi procesami w systemach transportu miejskiego.

Jest autorem i współautorem ponad 100 prac naukowych opublikowanych w kraju i za granicą, autorem podręczników i skryptów akademickich, promotorem ponad 120 prac magisterskich i inżynierskich oraz prac doktorskich.



Mgr inż. **Klaudiusz Migawa** jest asystentem w Katedrze Eksploatacji Maszyn Wydziału Mechanicznego Akademii Techniczno – Rolniczej w Bydgoszczy.

W pracy naukowej zajmuje się problemami dotyczącymi modelowania procesów i systemów eksploatacji oraz sterowania procesami eksploatacji realizowanymi w złożonych systemach eksploatacji. Prowadzi badania dotyczące zagadnień gotowości systemów eksploatacji środków transportu miejskiego i realizuje badania eksploatacyjne tych systemów.