

Dr inż. Adam Rosiński  
Politechnika Warszawska

# WYBRANE ZAGADNIENIA OPTIMALIZACJI PRZEGLĄDÓW OKRESOWYCH URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Optymalizacja procesu eksploatacji
3. Komputerowe wspomaganie zarządzania procesem eksploatacji
4. Wnioski

## STRESZCZENIE

*Urządzenia elektroniczne są obecnie stosowane w wielu gałęziach transportu. Szczególne znaczenie mają w transporcie kolejowym, zwłaszcza w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym, gdzie ich niezawodność i poprawność funkcjonowania w istotny sposób wpływa na bezpieczeństwo przewożonych osób i ładunków. W artykule zaprezentowano metodę optymalizacji przeglądów okresowych tych urządzeń, która uwzględnia wybrane własności niezawodnościowe (intensywność uszkodzeń), eksploatacyjne (intensywność napraw, intensywność obsługiwanego eksploatacyjnego) i ekonomiczne (nakłady finansowe przeznaczone na przeglądy okresowe). Kryterium optymalizacyjne maksymalizuje wartość wskaźnika gotowości.*

## 1. WSTĘP

Urządzenia elektroniczne są obecnie stosowane w wielu gałęziach transportu. Wśród nich szczególne znaczenie mają w transporcie kolejowym, a zwłaszcza w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym, gdzie ich niezawodność i poprawność funkcjonowania w istotny sposób wpływa na bezpieczeństwo przewożonych osób i ładunków. Jest możliwe zaprojektowanie systemów elektronicznych o bardzo dużych wartościach wskaźników niezawodnościowych przez zastosowanie struktur niezawodnościowych (np. zastosowanie nadmiarowości) i użycie niezawodnych elementów (czyli o odpowiednich parametrach niezawodnościowych). Tak zaprojektowane urządzenie elek-

troniczne jest uruchamiane i każde pracuje w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych. Jego poprawne funkcjonowanie jest uzależnione nie tylko od niezawodności poszczególnych części składowych tworzących system, ale także od przyjętych do realizacji strategii eksploatacji (np. według rezerwu, stanu, strategii mieszanej lub strategii efektywności) [1, 2, 4, 5, 9].

W artykule zaprezentowano – opracowaną przez autora [6, 7, 8] – strategię eksploatacji umożliwiającą maksymalizację wskaźnika gotowości. Pozwala ona wyznaczyć intensywność przeglądów okresowych przy uwzględnieniu wybranych własności niezawodnościowych (intensywność uszkodzeń<sup>1</sup>), eksploatacyjnych (intensywność napraw<sup>2</sup>, intensywności obsługiwanie eksploatacyjnego<sup>3</sup> i ekonomicznych (nakłady finansowe przeznaczone na przeglądy okresowe). Umożliwia ona wyznaczenie intensywności przeglądów okresowych przy kryterium optymalizacyjnym, które maksymalizuje wartość wskaźnika gotowości.

Opracowanie strategii eksploatacji umożliwiającej maksymalizację wartości wskaźnika gotowości wymagało przyjęcia założeń, iż znane są następujące warunki początkowe: intensywność uszkodzeń  $\lambda$ , intensywność napraw  $\mu$ , intensywność obsługiwanie eksploatacyjnego I rodzaju  $\mu_1$ , intensywność obsługiwanie eksploatacyjnego II rodzaju  $\mu_2$  i współczynnik nakładów finansowych<sup>4</sup> C. Poszukiwana jest funkcja kryterium, której zmiennymi są: intensywność przeglądu I rodzaju  $\lambda_1$  i intensywność przeglądu II rodzaju  $\lambda_2$  – pozwalająca na maksymalizację wartości wskaźnika gotowości.

## 2. OPTIMALIZACJA PROCESU EKSPLOATACJI

Omówienie optymalizacji procesu eksploatacji urządzeń elektronicznych wymaga przypomnienia pojęcia wskaźnika gotowości, który jest określany wzorem:

$$K_g = \frac{T_m}{T_m + T_n}, \quad (1)$$

gdzie:  $T_m$  – średni czas poprawnej pracy między uszkodzeniami,  
 $T_n$  – średni czas naprawy.

Z przedstawionej zależności wynika, że system może znajdować się w jednym z dwóch stanów (rys. 1):

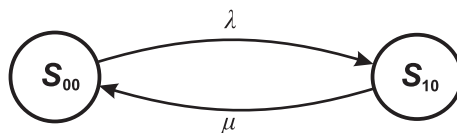
- stan użytkowania (sprawności),
- stan naprawy.

<sup>1</sup> Uszkodzenie – utrata zdolności obiektu do wypełniania wymaganych funkcji.

<sup>2</sup> Naprawa – czynności mające na celu odtworzenie stanu zdatności obiektu.

<sup>3</sup> Obsługiwanie eksploatacyjne – czynności mające na celu podtrzymanie obiektu w stanie zdatności.

<sup>4</sup> Współczynnik nakładów finansowych – określa wpływ nakładów finansowych przeznaczonych na przeglądy okresowe na wskaźnik gotowości systemu.

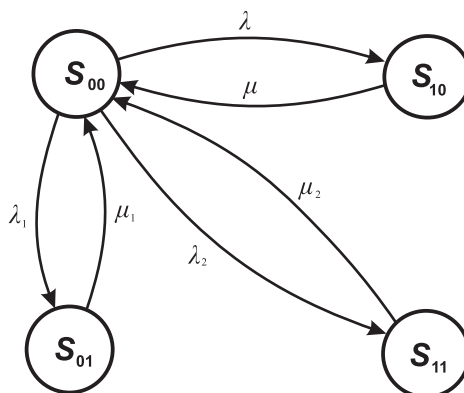


Rys. 1. Graf przejść między stanem użytkowania ( $S_{00}$ ) i naprawy ( $S_{10}$ ):  
 $\lambda$  – intensywność uszkodzeń,  $\mu$  – intensywność napraw

Przedstawiony na rysunku 1 graf przejść nie zawiera wszystkich możliwych i występujących w rzeczywistości stanów. W rzeczywistych warunkach eksploatacji urządzeń elektronicznych dokonywane są przeglądy okresowe. Ich intensywność może być stała w czasie (np. strategia według resursu) lub zależna od wartości sygnałów diagnostycznych (np. strategia według stanu). W artykule przyjęto, że są realizowane dwa rodzaje przeglądów ze stałymi intensywnościami. Dlatego graf z rysunku 1 uzupełniono o następujące dwa stany (rys. 2):

- stan przeglądu I rodzaju  $S_{01}$  (podczas którego wykonuje się podstawowe czynności wymagane zakresem obsługi),
- stan przeglądu II rodzaju  $S_{11}$  (podczas którego wykonuje się rozszerzony zakres czynności).

Wymienione stany są rozróżniane pod względem czasu trwania czynności mających na celu podtrzymanie obiektu w stanie zdatności. Założono również, że intensywność obsługiwanie eksploatacyjnego I rodzaju i II rodzaju jest stała w czasie.



Rys. 2. Graf przejść między stanem użytkowania ( $S_{00}$ ), naprawy ( $S_{10}$ ), przeglądu I ( $S_{01}$ ) i II rodzaju ( $S_{11}$ ):  $\lambda$  – intensywność uszkodzeń,  $\mu$  – intensywność napraw,  
 $\lambda_1$  – intensywność przeglądów I rodzaju,  $\mu_1$  – intensywność obsługiwanie eksploatacyjnego I rodzaju,  $\lambda_2$  – intensywność przeglądów II rodzaju,  
 $\mu_2$  – intensywność obsługiwanie eksploatacyjnego I rodzaju

Dla grafu przejść przedstawionego na rysunku 2 otrzymano prawdopodobieństwo przebywania w stanie użytkowania, które odpowiada wartości wskaźnika gotowości [7]:

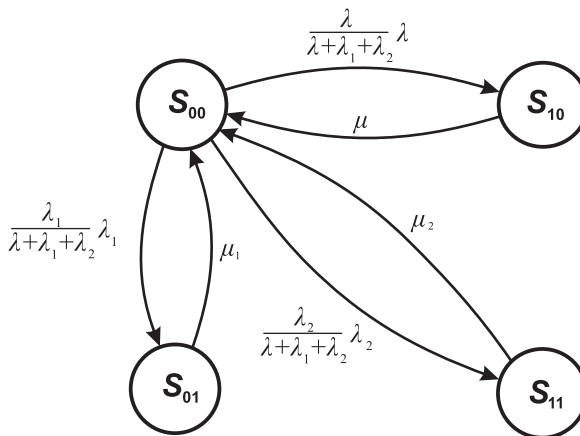
$$K_{g1} = P_{00} = \frac{\mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{\mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda_1 \cdot \mu \cdot \mu_2 + \lambda_2 \cdot \mu \cdot \mu_1}, \quad (2)$$

gdzie:  $K_{g1}$  – wskaźnik gotowości.

Wprowadźmy następnie współczynnik, który uzależni wartości intensywności  $\lambda$ ,  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  od siebie (tzn. jeśli jedna z tych wartości będzie wzrastać, to pozostałe będą maleć). Współczynnikiem tym będzie stosunek danej intensywności przejścia do sumy wszystkich intensywności naprawy oraz przeglądów I i II rodzaju:

- współczynnik intensywności napraw  $\frac{\lambda}{\lambda + \lambda_1 + \lambda_2}$ ,
- współczynnik intensywności przeglądu I rodzaju  $\frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1 + \lambda_2}$ ,
- współczynnik intensywności przeglądu II rodzaju  $\frac{\lambda_2}{\lambda + \lambda_1 + \lambda_2}$ .

Graf przejść przedstawiony na rysunku 2 będzie miał teraz postać przedstawioną na rysunku 3:



Rys. 3. Graf przejść między stanem użytkowania ( $S_{00}$ ), naprawy ( $S_{10}$ ), przeglądu I ( $S_{01}$ ) i II rodzaju ( $S_{11}$ ) [uwzględniono współczynnik korygujący]

Dla grafu przejść przedstawionego na rysunku 3 otrzymano zależność [7]:

$$K_{g2} = P_{00} = \frac{(\lambda + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda_1^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + \lambda_2^2 \cdot \mu \cdot \mu_1}, \quad (3)$$

gdzie:  $K_{g2}$  – wskaźnik gotowości z uwzględnieniem współczynnika korygującego.

Otrzymana zależność pozwala określić wpływ przyjętych do realizacji intensywności przeglądów I i II rodzaju na wskaźnik gotowości danego systemu (przy znanej intensywności uszkodzeń, intensywności obsługiwanego eksploatacyjnego I i II rodzaju). Jeśli funkcja posiada maksimum, to wyznaczenie odpowiadającej mu wartości współrzędnych, jakimi są intensywność przeglądu I oraz intensywność przeglądu II rodzaju jest wskazane, ponieważ umożliwi zwiększenie wskaźnika gotowości. Wartości te byłyby wtedy wartościami optymalnymi, zapewniającymi maksymalizację wskaźnika gotowości.

Warunkiem koniecznym jest, aby funkcja  $P_{00}(\lambda_1, \lambda_2)$  miała ekstremum w punkcie  $P_{00}(\lambda_{1\text{optym}}, \lambda_{2\text{optym}})$  tak, aby pierwsze pochodne cząstkowe funkcji w tym punkcie były równe zero, tj.:

$$\begin{cases} \frac{dP_{00}}{d\lambda_1}(\lambda_{1\text{optym}}, \lambda_{2\text{optym}}) = 0, \\ \frac{dP_{00}}{d\lambda_2}(\lambda_{1\text{optym}}, \lambda_{2\text{optym}}) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

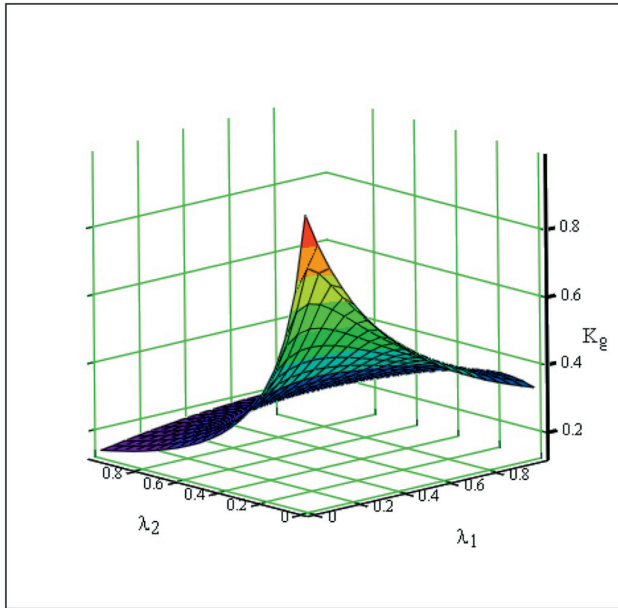
Z uwagi na złożoność przekształceń matematycznych posłużono się programem Mathcad 2001 Professional. Umożliwił on zobrazowanie graficzne funkcji  $P_{00}(\lambda_1, \lambda_2)$ . Dzięki temu wyznaczono wartości współrzędnych  $(\lambda_{1\text{optym}}, \lambda_{2\text{optym}})$  odpowiadających maksimum. Zobrazowano to przykładem 1.

### Przykład 1

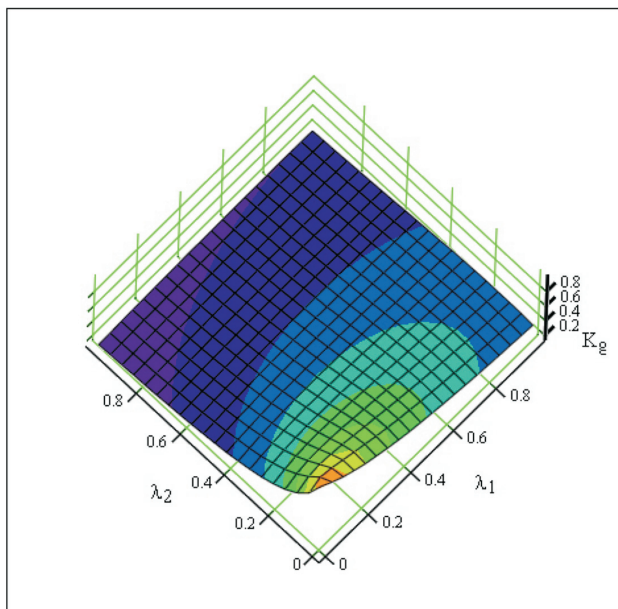
Przyjęto, że:

- intensywność uszkodzeń  $\lambda = 1,2027 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to systemowi, którego niezawodność wynosi 0,9),
- intensywność napraw  $\mu = 0,0666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi naprawy 15 h),
- intensywność realizacji przeglądów I rodzaju  $\mu_1 = 0,5 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 2 h),
- intensywność realizacji przeglądów II rodzaju  $\mu_2 = 0,1666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 6 h).

Dla tak przyjętych założeń otrzymano wykres, który został przedstawiony na rysunku 4 (widok od strony osi poziomych układu współrzędnych) i rysunku 5 (widok z góry).

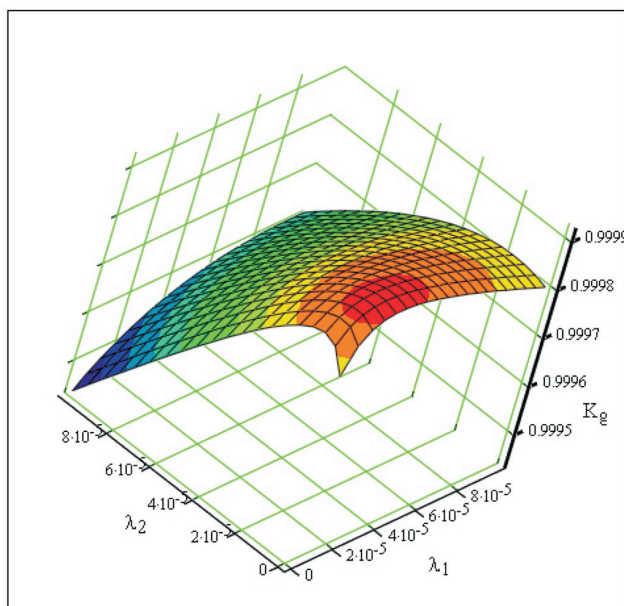


Rys. 4. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji intensywności przeglądów I rodzaju  $\lambda_1$  i intensywności przeglądów II rodzaju  $\lambda_2$



Rys. 5. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji intensywności przeglądów I rodzaju  $\lambda_1$  i intensywności przeglądów II rodzaju  $\lambda_2$  (widok z góry)

Analizując je, można stwierdzić, że wartość wskaźnika gotowości  $K_g$  osiąga maksimum dla wartości intensywności przeglądów I i II rodzaju zawartych w przedziale  $(0, 0,1)$ . Aby precyzyjnie (graficznie) określić wartości poszukiwanych intensywności, niezbędne jest zmniejszenie maksymalnych wartości na osiach poziomych układu współrzędnych. Po analizie przyjęto wartość: 0,0001. Dla tych warunków otrzymano wykres przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji intensywności przeglądów I rodzaju  $\lambda_1$  i intensywności przeglądów II rodzaju  $\lambda_2$  (dla maksymalnych wartości poziomych układu współrzędnych = 0,0001)

Wartości współrzędnych  $(\lambda_{1\text{optym}}, \lambda_{2\text{optym}})$  odpowiadające maksimum są następujące:

$$\lambda_{1\text{optym}} = 2 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right],$$

$$\lambda_{2\text{optym}} = 6 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right].$$

Zostały one odczytane z rysunku 6, dla tych współrzędnych wartość wskaźnika gotowości jest maksymalna.

Przedstawiona optymalizacja przeglądów I i II rodzaju umożliwia wyznaczenie optymalnych intensywności przeglądów, dla których wskaźnik gotowości  $K_g$  przyjmuje wartość maksymalną. W rzeczywistych warunkach pracy tych systemów, przeglądy są dokonywane z różnymi intensywnościami, które nie są wartościami optymalnymi. Wynika to z konieczności przeznaczenia przez właściciela (lub osoby odpowiedzialnej za proces eksploatacji urządzeń elektronicznych) określonych nakładów finansowych na przeprowadzenie przeglądów okresowych. Dlatego rzeczywiste przeglądy urządzeń elektronicznych przeprowadzane są z intensywnościami najczęściej mniejszymi niż optymalne, w skrajnych przypadkach zaś, w ogóle nie są przeprowadzane. Najczęściej jest to spowodowane poszukiwaniem oszczędności w wydatkach finansowych, np. przedsiębiorstwa. Może też wystąpić sytuacja, w której przeglądy dokonywane są z intensywnościami większymi niż optymalne (tzn. „za często”). Z punktu widzenia procesu eksploatacji wpływa to niekorzystnie na wartość wskaźnika gotowości. Zachodzi więc potrzeba określenia zależności pomiędzy intensywnościami przeglądów i poniesionymi kosztami a wskaźnikiem gotowości.

Wprowadźmy współczynniki, które uzależnią wartości intensywności  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  od siebie i optymalnych intensywności przeglądów obu rodzajów. Niech:

- $k_1$  – współczynnik przeglądu I rodzaju: określa zależność liniową pomiędzy aktualną intensywnością przeglądu I rodzaju, a optymalną intensywnością przeglądu I rodzaju dla której wartość wskaźnika gotowości jest maksymalna,
- $k_2$  – współczynnik przeglądu II rodzaju: określa zależność liniową pomiędzy aktualną intensywnością przeglądu II rodzaju, a optymalną intensywnością przeglądu II rodzaju dla której wartość wskaźnika gotowości jest maksymalna.

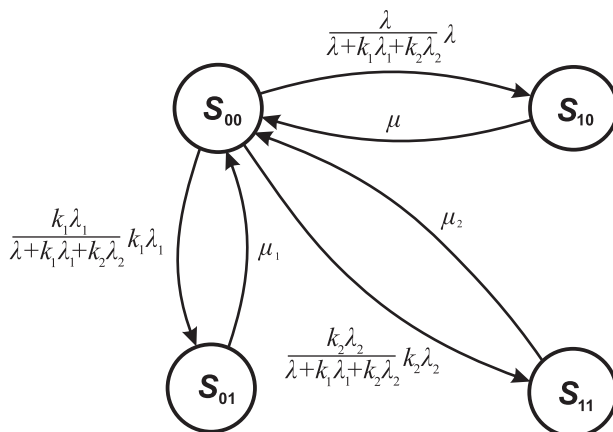
Założono również, że suma powyższych współczynników wynosi 1:

$$k_1 + k_2 = 1.$$

(Dzięki temu założeniu nakłady finansowe przeznaczone na przeglądy okresowe są stałe. Zmienia się tylko proporcja intensywności obu przeglądów). W przypadku, gdy któryś ze współczynników wzrośnie (czyli wzrośnie także odpowiadająca mu intensywność przeglądu), to drugi maleje (czyli zmniejszy się odpowiadająca mu intensywność przeglądu). Pozwoli to na optymalizację przypadków, gdy osoba odpowiedzialna za proces eksploatacji urządzeń elektronicznych dysponuje określonym poziomem środków finansowych i przeglądy są realizowane z intensywnościami nie będącymi wartościami optymalnymi. Można to porównać do przepływów środków finansowych między wyróżnionymi przeglądami.



Graf przejść przedstawiony na rysunku 3 będzie miał teraz następującą postać (rys. 7):



Rys. 7. Graf przejść między stanem użytkowania ( $S_{00}$ ), naprawy ( $S_{10}$ ), przeglądu I ( $S_{01}$ ) i II rodzaju ( $S_{11}$ ), uwzględniający współczynniki przeglądów ( $k_1$  i  $k_2$ )

Dla grafu przejść przedstawionego na rysunku 7 otrzymano zależność według wzoru (5) [7]:

$$K_{g3} = P_{00} = \frac{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_1 + k_2 \cdot \lambda_2) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_1 + k_2 \cdot \lambda_2) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + (k_1 \cdot \lambda_1)^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + (k_2 \cdot \lambda_2)^2 \cdot \mu \cdot \mu_1} \quad (5)$$

gdzie:  $K_{g3}$  – wskaźnik gotowości z uwzględnieniem współczynników przeglądów ( $k_1$  i  $k_2$ ).

Otrzymana zależność pozwala określić wpływ przyjętych do realizacji intensywności przeglądów I i II rodzaju z uwzględnieniem współczynników przeglądów ( $k_1$  i  $k_2$ ) na wskaźnik gotowości danego systemu (przy znanej intensywności uszkodzeń i intensywności obsługiwanego eksploatacyjnego I i II rodzaju). W dalszych rozważaniach przyjęto, że znane są wcześniej wyznaczone optymalne intensywności przeglądów I i II rodzaju:

$$\lambda_1 = \lambda_{1\text{optym}}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{2\text{optym}}$$

Równanie (5) przyjmie następującą postać:

$$K_{g3} = P_{00} = \frac{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} + k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}}) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} + k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}}) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + (k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}})^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + (k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}})^2 \cdot \mu \cdot \mu_1} \quad (6)$$

W rozprawie [7] wykazano, że:

- Wartość wskaźnika gotowości  $K_g$  osiąga maksimum dla wartości intensywności przeglądu I i II rodzaju odpowiadającym wartościom optymalnym. Dla wartości mniejszych (czyli mniejszych nakładów finansowych) wskaźnik  $K_g$  maleje.
- Istnieje nieliniowa zależność między współczynnikami  $k_1$  i  $k_2$  a wskaźnikiem gotowości. Dlatego też w przypadku mniejszych nakładów finansowych niż te, dla których otrzymano optymalne wartości intensywności przeglądów I i II rodzaju, należy wyznaczyć nowe optymalne intensywności obu przeglądów, dla których nastąpi maksymalizacja wskaźnika gotowości.

Przedstawione stwierdzenia potwierdzono w przykładzie 2. Obrazuje on graficznie funkcję  $P_{00}(k_1, k_2)$ .

### Przykład 2

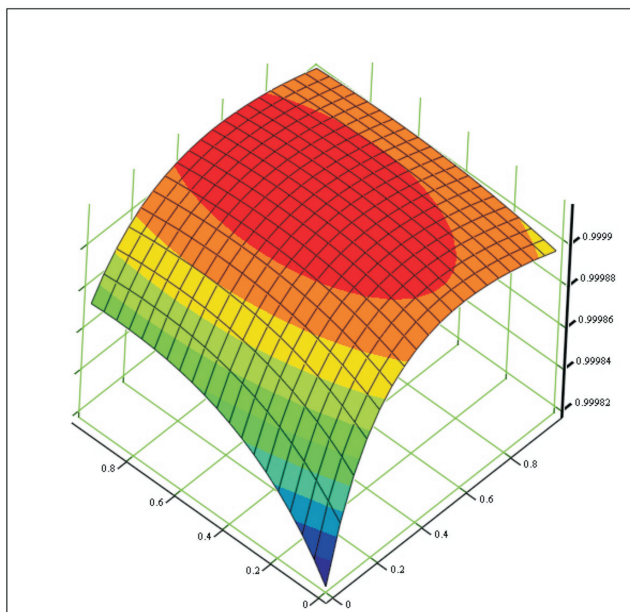
Przyjęto, że:

- intensywność uszkodzeń  $\lambda = 1,2027 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to systemowi, którego niezawodność wynosi 0,9),
- intensywność napraw  $\mu = 0,0666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi naprawy 15 h),
- intensywność realizacji przeglądów I rodzaju  $\mu_1 = 0,5 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 2 h),
- intensywność realizacji przeglądów II rodzaju  $\mu_2 = 0,1666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 6 h),
- intensywność przeglądów I rodzaju  $\lambda_{1\text{optym}} = 2 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$ ,
- intensywność przeglądów II rodzaju  $\lambda_{2\text{optym}} = 6 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$ .

Dla tak przyjętych założeń otrzymano wykres (rys. 8). Korzystając z tego wykresu, należy uwzględnić równanie:

$$k_1 + k_2 = 1.$$

Tak więc obszar dalszych rozważań zawiera się w polu trójkąta ograniczonego wierzchołkami wyznaczonymi przez punkty o współrzędnych  $k_1$  i  $k_2$ : (0,0), (0,1), (1,0).



Rys. 8. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji współczynnika przeglądów I rodzaju  $k_1$  i współczynnika przeglądów II rodzaju  $k_2$

Ważnym zagadnieniem praktycznym dla użytkownika lub osoby odpowiedzialnej za proces eksploatacji urządzeń elektronicznych, jest ograniczony zasób środków finansowych przeznaczonych na przeglądy okresowe. W rozważaniach założono, że środki finansowe są stałe i odpowiadają optymalnym intensywnościom przeglądów I i II rodzaju. Aby określić wpływ nakładów finansowych przeznaczonych na przeglądy okresowe na wskaźnik gotowości systemu, wprowadzono współczynnik  $C$ . Określa on dostępne środki finansowe przeznaczane na przeglądy I i II rodzaju. Przyjęto, że:

- $C = 2$  dla optymalnych intensywności przeglądów I i II rodzaju ( $K_g = \max$ ),
- $C = 0$  dla intensywności przeglądów I i II rodzaju = 0 (brak przeglądów).

Równanie (6) przyjmie następującą postać [7]:

$$K_{g4} = P_{00} = \frac{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C + k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C + k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + (k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C)^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + (k_2 \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C)^2 \cdot \mu \cdot \mu_1}, \quad (7)$$

gdzie:  $K_{g4}$  – wskaźnik gotowości z uwzględnieniem współczynnika nakładów finansowych  $C$ .

Zobrazowanie graficzne równania (7) w przestrzeni trójwymiarowej jest niemożliwe z uwagi na występowanie trzech zmiennych:  $k_1, k_2, C$ . Dlatego zastosowano zależność:

$$k_1 + k_2 = 1, \quad \text{więc: } k_2 = 1 - k_1.$$

Stosując tę zależność, równanie (7) przyjmie następującą postać:

$$K_{g4} = P_{00} = \frac{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C + (1 - k_1) \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{\left[ \lambda + k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C + (1 - k_1) \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C \right] \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + (k_1 \cdot \lambda_{1\text{optym}} \cdot C)^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + \left[ (1 - k_1) \cdot \lambda_{2\text{optym}} \cdot C \right]^2 \cdot \mu \cdot \mu_1} \quad (8)$$

W [7] wykazano, że:

- Wartość wskaźnika gotowości  $K_g$  osiąga maksimum dla  $C = 2$  i  $k_1 = 0,5$ . Dla wartości mniejszych (czyli mniejszych nakładów finansowych) wskaźnik  $K_g$  maleje.
- Istnieje nieliniowa zależność między współczynnikiem nakładów  $C$  i współczynnikiem przeglądu  $k_1$ . Dlatego w wypadku mniejszych nakładów finansowych niż te, dla których  $K_g = \max$ , należy wyznaczyć nowe optymalne intensywności obu przeglądów, dla których nastąpi maksymalizacja wskaźnika gotowości.

Przedstawione stwierdzenia potwierdzono w przykładzie 3. Obrazuje on graficznie funkcję  $P_{00}(k_1, C)$ .

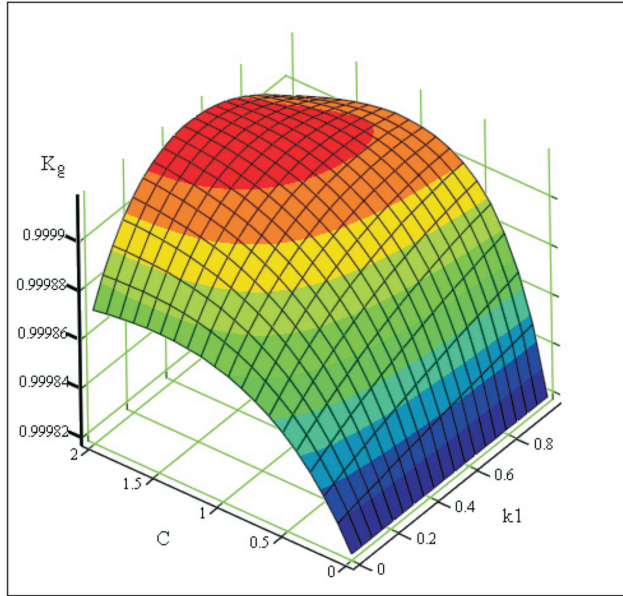
### Przykład 3

Przyjęto, że:

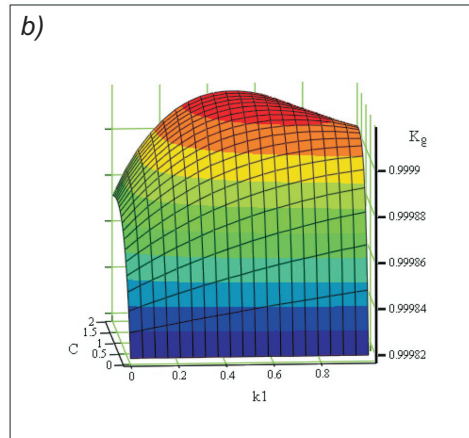
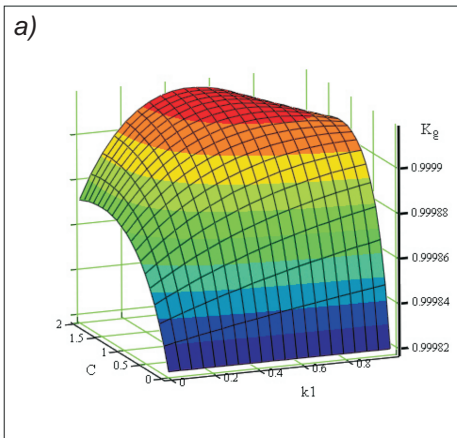
- intensywność uszkodzeń  $\lambda = 1,2027 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to systemowi, którego niezawodność wynosi 0,9),
- intensywność napraw  $\mu = 0,0666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi naprawy 15 h),
- intensywność realizacji przeglądów I rodzaju  $\mu_1 = 0,5 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 2 h),
- intensywność realizacji przeglądów II rodzaju  $\mu_2 = 0,1666 \left[ \frac{1}{h} \right]$  (odpowiada to czasowi przeglądu 6 h),

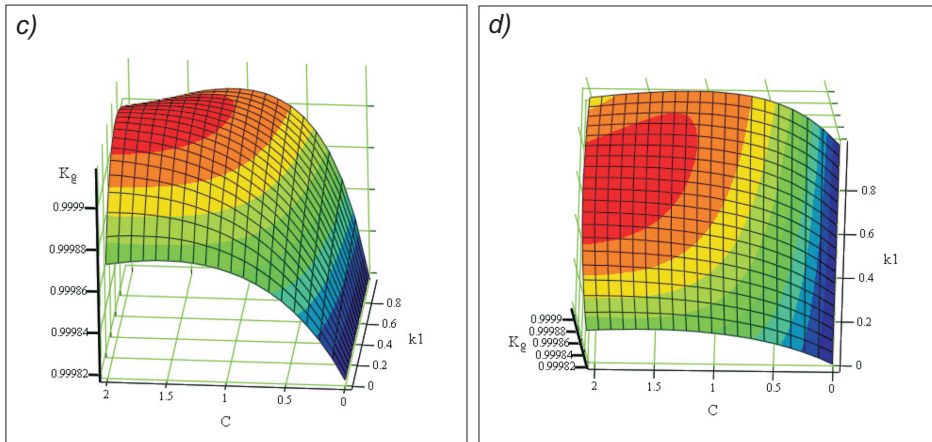
- intensywność przeglądów I rodzaju  $\lambda_{1\text{optym}} = 2 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$ ,
- intensywność przeglądów II rodzaju  $\lambda_{2\text{optym}} = 6 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$ .

Dla tak przyjętych założeń otrzymano wykresy pokazane na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji współczynnika przeglądów I rodzaju  $k_1$  i współczynnika nakładów finansowych  $C$  (widok ogólny)





Rys. 10. Zależność wskaźnika gotowości  $K_g$  w funkcji współczynnika przeglądów I rodzaju  $k_1$  i współczynnika nakładów finansowych: a, b – widok od osi  $k_1$ ; c, d – widok od osi  $C$

W metodzie optymalizacji procesu eksploatacji przyjęto kryterium niezbędne do jego oceny. Jest ono związane ze wskaźnikiem gotowości systemu. Wartość tego wskaźnika powinna być maksymalna przy założonych warunkach początkowych dotyczących:

- intensywności uszkodzeń  $\lambda$ ,
- intensywności napraw  $\mu$ ,
- intensywności obsługiwanego eksploatacyjnego I rodzaju  $\mu_1$ ,
- intensywności obsługiwanego eksploatacyjnego II rodzaju  $\mu_2$ ,
- współczynnika nakładów finansowych  $C$ .

Dla przedstawionej metody, funkcja kryterium będzie miała następującą postać:

$$K_g(\lambda_1, \lambda_2, k_1, k_2) = \frac{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_1 \cdot C + k_2 \cdot \lambda_2 \cdot C) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda + k_1 \cdot \lambda_1 \cdot C + k_2 \cdot \lambda_2 \cdot C) \cdot \mu \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + \lambda^2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 + (k_1 \cdot \lambda_1 \cdot C)^2 \cdot \mu \cdot \mu_2 + (k_2 \cdot \lambda_2 \cdot C)^2 \cdot \mu \cdot \mu_1} \quad (9)$$

Poszukuje się wartości liczbowych:

- intensywności przeglądu I rodzaju  $\lambda_1$ ,
- intensywności przeglądu II rodzaju  $\lambda_2$ ,
- współczynnika przeglądu I rodzaju  $k_1$ ,
- współczynnika przeglądu II rodzaju  $k_2$ ,

dla których nieliniowa funkcja kryterium przyjmie wartość maksymalną:

$$\max_{\{(\lambda_1, \lambda_2, k_1, k_2)\}} K_g(\lambda_1, \lambda_2, k_1, k_2),$$

przy ograniczeniach:

$$k_1 + k_2 = 1; \lambda_1 \in \langle 0,1 \rangle; \lambda_2 \in \langle 0,1 \rangle; k_1 \in \langle 0,1 \rangle; k_2 \in \langle 0,1 \rangle.$$

### 3. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE ZARZĄDZANIA PROCESEM EKSPLOATACJI

Metody i symulacje komputerowe są obecnie stosowane w wielu dziedzinach przemysłu, m.in. także w transporcie kolejowym. Są wykorzystywane podczas procesu projektowania urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Dzięki temu istnieje możliwość szybkiego określenia wpływu zmian wskaźników niezawodnościowych poszczególnych elementów tworzących system SRK na niezawodność całego systemu. Oczywiście wcześniej musi być znana struktura niezawodnościowa systemu oraz charakterystyki niezawodnościowe poszczególnych elementów i podsystemów.

Wcześniejszym etapem rozwoju wspomaganie komputerowego było zastosowanie go w zarządzaniu procesem eksploatacji, a w szczególności w podsystemie utrzymywania zdadności systemów SRK, w zapewnieniu bezpieczeństwa podróżowania. Systemy komputerowe służyły do zbierania informacji (powstawały bazy danych zawierające informację o procesie eksploatacyjnym danych urządzeń), a następnie do ich opracowywania i na tej podstawie wnioskowania o podstawowych wskaźnikach eksploatacyjnych. Pozwoliło to na podejmowanie optymalnych decyzji dotyczących procesu eksploatacji (np. przeglądy okresowe i czas ich trwania, naprawy główne), które przy danych warunkach początkowych zapewniały maksymalizację efektu końcowego (np. maksymalizację wartości wskaźnika gotowości, minimalizację czasu naprawy, optymalizację intensywności obsługi technicznych).

Kolejnym etapem (szczególnie istotnym w warunkach gospodarki rynkowej) było uwzględnienie danych ekonomicznych podczas komputerowego wspomaganie podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Istotne stały się pytania:

- Ile będzie kosztować eksploatacja systemu?
- Ile będzie kosztować przegląd okresowy?
- Ile będzie kosztować naprawa?
- Ile będą kosztować materiały eksploatacyjne?
- Jak liczny personel będzie wymagany?
- Jakie kwalifikacje zawodowe musi posiadać personel?
- Jakie wyposażenie techniczne musi posiadać personel?
- Jak zorganizować pracę personelu?
- Jak rozmieścić personel na określonym obszarze?

W tym etapie należy uwzględnić ograniczony zasób środków finansowych przeznaczonych na eksploatację systemów. Powstało zagadnienie decyzyjne: w jaki sposób przy ograniczonych zasobach finansowych, zapewnić ciągłość działania (zdatność

systemu) przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa i spełnieniu założonych celów (np. maksymalizację wskaźników eksploatacyjnych, minimalizację kosztów, maksymalizację efektywności wykorzystania środków finansowych). Odpowiedzią jest stworzenie wielu programów komputerowych, które pozwalają udzielić odpowiedzi na te pytania i zagadnienia decyzyjne. Są to m.in. następujące pakiety komputerowe: Vips-Carsis, Spear 2000, RCOM [3]. Zazwyczaj są one bardzo rozbudowane i mają moduły, które razem mogą stanowić jeden zintegrowany system, umożliwiający m.in.:

- archiwizację informacji o nadzorowanych urządzeniach (np. dokumentacja techniczna, struktura techniczna i organizacyjna),
- zbieranie i archiwizację informacji eksploatacyjnej (np. liczba i rodzaj uszkodzeń, czas trwania awarii, czas trwania naprawy, typ przeglądu okresowego, informacje diagnostyczne z podsystemu diagnostycznego),
- analizę ekonomiczną stosowanych i planowanych rozwiązań eksploatacyjnych (np. koszty zastosowanych przeglądów okresowych, koszty napraw),
- wspieranie procesu podejmowania decyzji eksploatacyjnych (np. typ zastosowanego przeglądu okresowego, okresy między poszczególnymi typami przeglądów okresowych, optymalizacja procesu eksploatacyjnego),
- tworzenie raportów i zestawień (np. wartości wskaźników niezawodnościowych czy eksploatacyjnych, koszty całkowite procesu eksploatacyjnego całego systemu lub poszczególnych typów urządzeń).

Przedstawiona metoda optymalizacji procesu eksploatacyjnego jest przykładem zapewnienia maksymalizacji wartości wskaźnika gotowości systemu przy ograniczonych nakładach finansowych. Została ona zaimplementowana w autorskim programie komputerowym o nazwie „Wspomaganie Decyzji Niezawodnościowo-Exploatacyjnych Transportowych Systemów Nadzoru” (w skrócie: WDNETS), podając następujące wartości wejściowe:

- liczbę badanych systemów,
- czas badań systemów,
- średni czas naprawy,
- średni czas realizacji przeglądów<sup>5</sup> I rodzaju,
- średni czas realizacji przeglądów II rodzaju,
- współczynnik nakładów finansowych,
- liczbę uszkodzonych elementów badanego typu systemu,

program wyznacza m.in. następujące wartości:

- niezawodność poszczególnych elementów tworzących badany system,
- niezawodność całego systemu,
- intensywność uszkodzeń elementów tworzących badany system,

---

<sup>5</sup> Realizacja przeglądu – w przedstawionej metodzie nazywana obsługiwaniem eksploatacyjnym.



- intensywność uszkodzeń całego systemu,
- średni czas pracy elementów tworzących badany system,
- wskaźnik gotowości elementów tworzących badany system,
- wskaźnik gotowości całego systemu,
- intensywność napraw,
- intensywność realizacji przeglądów I rodzaju,
- intensywność realizacji przeglądów II rodzaju,
- maksymalną wartość wskaźnika gotowości systemu,
- optymalne intensywności realizacji przeglądów I i II rodzaju dla maksymalnej wartości wskaźnika gotowości systemu,
- wartość wskaźnika gotowości systemu z uwzględnieniem nakładów finansowych,
- optymalne intensywności realizacji przeglądów I i II rodzaju dla wartości wskaźnika gotowości systemu z uwzględnieniem nakładów finansowych.

Widok okna programu pokazano na rysunku 11.

liczba badanych systemów	20
czas badań systemów w [h]	8760
średni czas naprawy w [h]	15
średni czas realizacji przeglądów I rodzaju w [h]	2
średni czas realizacji przeglądów II rodzaju w [h]	6
współczynnik nakładów finansowych w [%] (od 0 do 100)	80
liczba uszkodzonych jednostek centralnych	1
liczba uszkodzonych modułów mocy	1
liczba uszkodzonych modułów rozszerzających	3

Wylicz

Obliczone wartości

Rys. 11. Widok okna programu „Wspomaganie Decyzji Niezawodnościowo-Eksploatacyjnych Transportowych Systemów Nadzoru”

Program WDNETSN posiada 5 zakładek, które odpowiadają systemom o następujących strukturach niezawodnościowych:

- system JMTI RS-232C, JMTI RS-485, WMTI RS-232C – struktura szeregową,
- system WMTI RS-485 – struktura mieszana,
- system WCATSR – struktura równoległa.

Zastosowanie przedstawionego programu „Wspomaganie Decyzji Niezawodnościowo-Eksploatacyjnych Transportowych Systemów Nadzoru” pozwala na zaplanowanie procesu eksploatacyjnego w już istniejących i użytkowanych systemach, jak również na wyznaczenie wskaźników niezawodnościowych na etapie projektowania systemów. Użycie programu ułatwia właścicielowi danego systemu podejmowanie decyzji dotyczących sterowania procesem eksploatacji (nawet przy braku wiedzy z teorii niezawodności i eksploatacji).

## 4. WNIOSKI

W artykule zaprezentowano strategię eksploatacji, która maksymalizuje wskaźnik gotowości. Umożliwia ona optymalizację procesu eksploatacyjnego przez wyznaczenie wartości intensywności przeglądów okresowych, przy uwzględnieniu wybranych własności niezawodnościowych (intensywność uszkodzeń), eksploatacyjnych (intensywność napraw, intensywność obsługiwanego eksploatacyjnego) i ekonomicznych (nakłady finansowe przeznaczone na przeglądy okresowe). Możliwe jest także wyznaczenie intensywności przeglądów okresowych z jakimi powinny się one odbywać, zarówno przy możliwości, jak i braku ich realizacji z wartościami optymalnymi.

Kryterium optymalizacyjne maksymalizuje wartość wskaźnika gotowości. Dalsze rozważania i badania naukowe tego zagadnienia są ukierunkowane na wyznaczenie efektywności wykorzystania nakładów finansowych przeznaczonych na przeglądy okresowe (jest to w pewnym zakresie zrealizowane przez autora) oraz modernizację opracowanych grafów przejść pomiędzy wyróżnionymi stanami eksploatacyjnymi, tak aby uwzględniły sygnały diagnostyczne (obecnie na etapie analiz i symulacji).

## BIBLIOGRAFIA

1. Będkowski L., Dąbrowski T.: *Podstawy eksploatacji. Cz. II, Podstawy niezawodności eksploatacyjnej*. Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2006.
2. Dyduch J., Rosiński A.: *Proces eksploatacji systemów nadzoru*. „Prace Naukowe Politechniki Radomskiej”, Radom, 2003, nr 1(17).
3. Erd A.: *Nowoczesne technologie informatyczne a konstrukcja systemów wspomaganie eksploatacji złożonych obiektów technicznych*. „Prace Naukowe Politechniki Radomskiej”, Radom, 2003, nr 1(17).

4. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K.: *Bezpieczeństwo systemów*. Warszawa, PWN, 1993.
5. Rosiński A.: *Analiza niezawodnościowa struktur transportowych systemów nadzoru*. „Prace Naukowe Politechniki Radomskiej”. Radom, 2005, nr 3(23).
6. Rosiński A.: *Metoda optymalizacji przeglądów okresowych transportowych systemów nadzoru*. VI Krajowa Konferencja: „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów – DIAG’2006”, Ustroń, 2006.
7. Rosiński A.: *Metoda wyboru strategii eksploatacji w transportowych systemach nadzoru*. Rozprawa doktorska. Warszawa, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 2007.
8. Rosiński A.: *Strategie eksploatacyjne w transportowych systemach nadzoru*. „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport” z. 62. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
9. Ważyńska-Fiok K.: *Podstawy teorii eksploatacji i niezawodności systemów transportowych*. Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1993.