

Marek MALARSKI
Politechnika Warszawska

PROBLEM BŁĘDNYCH DECYZJI STERUJĄCYCH

Streszczenie. Celem artykułu jest próba formalnej analizy błędnych decyzji sterujących w złożonym systemie sterowania. Przykładowym obiektem analizy są błędne decyzje sterujące pilota i kontrolera ruchu w systemie sterowania ruchem lotniczym kontrolowanym.

PROBLEM OF CONTROLLER WRONG DECISION

Summary. The paper's goal is formerly analysis of controller wrong decisions in composed control system. For example the pilot and air traffic controller wrong decisions in air traffic control system are analyzing.

1. Wprowadzenie

Ogólna analiza błędnych decyzji sterujących w transporcie w systemie zbliżonym do rzeczywistego jest bardzo złożona. Przy pewnych założeniach można jednak zbudować modele uproszczone. W tym celu konieczne jest dobre zidentyfikowanie struktury procesu podejmowania błędnych decyzji. W dalszej części pracy pokazano jeden z przykładów wskazujący na możliwość oszacowania i weryfikacji poprawności szacowania aktualnych poziomów bezpieczeństwa systemu sterowania ruchem.

We współczesnych systemach transportowych występują elementy, obiekty i systemy o dużej i bardzo dużej niezawodności. Szczególnie dużą niezawodność posiadają elementy systemów sterowania ruchem [4]. Podobnie wyszkolenie i kwalifikacje personelu sterującego są dobrze sprawdzone przez rozbudowane systemy kontroli, weryfikacji wyszkolenia i sprawności fizycznej operatorów. Prawdopodobieństwo wystąpienia stanu niesprawności pojedynczego elementu (urządzenia technicznego, operatora) w systemie transportowym nierzadko osiąga wartości 10^{-8} .

Doświadczenie (Polska [3], UE, USA [5]) wskazuje, że błędy człowieka (kontrolera, pilota) decydują o wystąpieniu ponad 80% zarejestrowanych zdarzeń niebezpiecznych. W pracy przedstawiona jest pewna metoda określania wpływu błędnych decyzji operatora na bezpieczeństwo systemu. W tym celu przeprowadzono analizę wielostanowego procesu podejmowania błędnych decyzji w sytuacji ewentualnego wystąpienia niesprawności sprzętu.

2. Modelowanie obiektów o elementach wielostanowych

Niestety, sytuacje niebezpieczne i wypadki zdarzają się częściej, niż wynikałoby to z analizy prawdopodobieństw poprawnej pracy elementów składowych systemów decyzyjnych. Konieczne jest więc odejście od klasycznego pojęcia uszkodzenia (awarii) lub błędu operatora i wyróżniania tylko dwóch stanów: sterowania bezpiecznego i sterowania niebezpiecznego. Sięgnięcie do ogólnej teorii procesów stochastycznych pozwala rozszerzyć klasyczną teorię eksploatacji na obiekty o elementach wielostanowych.

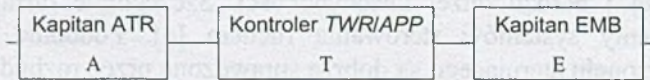
W teorii niezawodności definiujemy prawdopodobieństwa przejścia ze stanu B (pełnego bezpieczeństwa pracy elementu) do stanu N (zdarzenia niebezpiecznego) jako prawdopodobieństwo utraty sprawności (operatora). Wielkość ta $p_{ij}(t, \tau)$ oznacza prawdopodobieństwo przejścia ze stanu $i \in \{B, N\}$, w jakim znajdował się obiekt w chwili t , do stanu $j \in \{B, N\}$ w chwili $t + \tau$ (po upływie czasu τ). Czas t (przedział $(0, t)$) jest dotychczasowym czasem pracy operatora.

Zmiany stanu elementu (decydenta) mogą zależeć od wielu czynników. Dlatego też stan decydenta $x(t)$ można traktować jako realizację procesu stochastycznego $\bar{x}(t)$. W takim ujęciu [2] istotne jest wprowadzenie charakterystyki procesu przechodzenia w stan niebezpieczny, definiowanej zwykle jako szybkość narastania wartości $p_{BN}(t, \tau)$ w zależności od τ . Wielkość tę $\lambda_{BN}(t)$ nazywamy *intensywnością podejmowania błędnych decyzji* i definiujemy

$$\lambda_{BN}(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{p_{BN}(t, \tau) - p_{BN}(t, 0)}{\tau} = \left. \frac{\partial}{\partial \tau} p_{BN}(t, \tau) \right|_{\tau=0} \quad (1)$$

3. Struktura bezpieczeństwa systemu sterowania

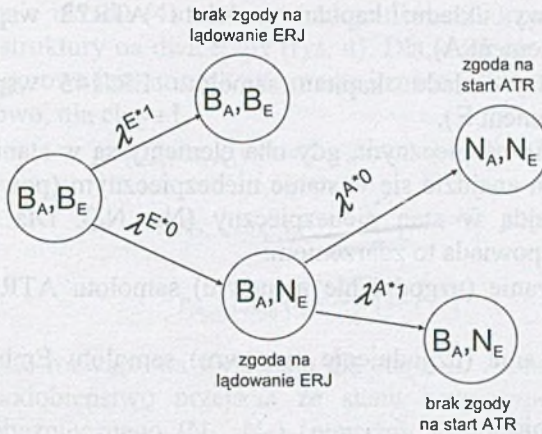
Analiza przebadanych dotychczas zdarzeń lotniczych (poważnych incydentów) prowadzi w zdecydowanej większości do szeregowej struktury niezawodnościowej (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa struktura niezawodnościowa jednego z przeanalizowanych zdarzeń lotniczych

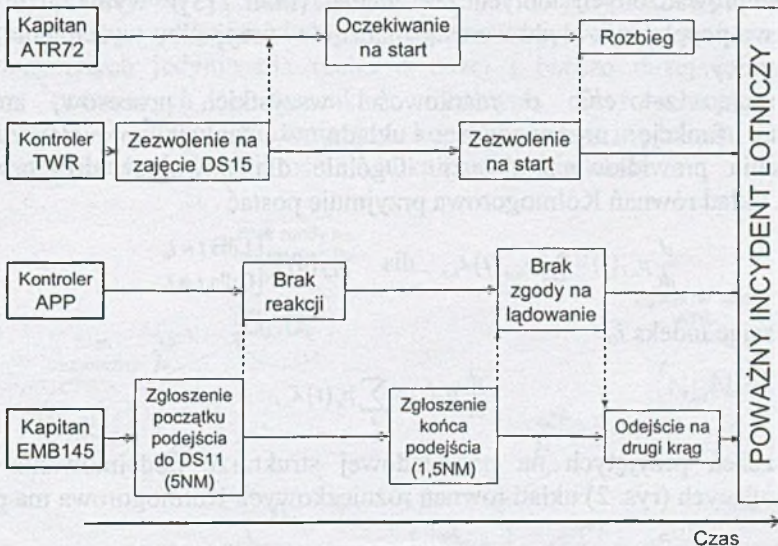
Przykładowo analizowany system składa się ze współdziałających elementów:

- kapitan samolotu A współdziałający z kontrolerem TWR,
- kapitan samolotu E współdziałający z kontrolerem APP.



Rys. 2. Przykładowa struktura uproszczonego procesu podejmowania błędnych sterowań

W prawie wszystkich przeanalizowanych dotychczas przypadkach struktura procesu podejmowania błędnych decyzji jest podobna (rys. 2). Przykładowe schematy (rys. 1, 2) pochodzą z analizy poważnego incydentu lotniczego na lotnisku Okęcie w Warszawie w 2005, którego analizę czasową pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowa analiza czasowa poważnego incydentu lotniczego

4. Przykładowa analiza procesu podejmowania błędnych decyzji sterujących

Analizowany przykładowo system w założonym uproszczeniu składa się z dwu elementów:

- stan bezpieczeństwa układu: kapitan samolotu ATR72 współdziałający z kontrolerem TWR (element A),
- stan bezpieczeństwa układu: kapitan samolotu ERJ145 współdziałający z kontrolerem APP (element E).

System jest w stanie bezpiecznym, gdy oba elementy są w stanie bezpiecznym (B_A, B_E) (rys. 2). System znajdzie się w stanie niebezpiecznym (poważny incydent), gdy oba elementy przejdą w stan niebezpieczny (N_A, N_E). Dla przykładowego poważnego incydentu odpowiada to zdarzeniom:

- nieprecyzyjne sterowanie (uzgodnienie manewru) samolotu ATR72 – zdarzenie $B_A \rightarrow N_A$,
- nieprecyzyjne sterowanie (uzgodnienie manewru) samolotu Embraer ERJ145 – zdarzenie $B_E \rightarrow N_E$.

Przyjmujemy oznaczenia:

λ^{A^*0} - intensywność podejmowania błędnego sterowania (uzgadniania nieprecyzyjnych decyzji) przez kontrolera TWR z kapitanem ATR72,

λ^{E^*0} - intensywność podejmowania błędnego sterowania (uzgadniania nieprecyzyjnych decyzji) przez kontrolera APP z kapitanem ERJ145,

λ^{A^*1} - intensywność podejmowania prawidłowego sterowania (uzgadniania prawidłowych decyzji) przez kontrolera TWR z kapitanem ATR72,

λ^{E^*1} - intensywność podejmowania prawidłowego sterowania (uzgadniania prawidłowych decyzji) przez kontrolera APP z kapitanem ERJ145.

Z przeprowadzonych dotychczas analiz (m.in. [3]) wynika, że prawdopodobieństwo popełnienia błędu wzrasta znacznie w przypadku wystąpienia znużenia, monotonii pracy.

Przyjmując założenie o markowości wszystkich procesów, analitycznie wyznaczono funkcję niezawodności układu – funkcję prawdopodobieństwa podejmowania prawidłowych decyzji. Ogólnie dla dowolnej struktury procesu sterowania układ równań Kołmogorowa przyjmuje postać

$$\frac{d}{dt} p_{i,j}(t) = \sum_s p_{i_0,s}(t) \lambda_{s,j} \quad \text{dla} \quad p_{i,j}(0) = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = i_0 \\ 0 & \text{dla } i \neq i_0 \end{cases} \quad (2)$$

lub opuszczając indeks i_0

$$\frac{d}{dt} p_j(t) = \sum_s p_s(t) \lambda_{s,j} \quad (3)$$

Dla uproszczeń przyjętych na przykładowej strukturze podejmowania błędnych decyzji sterujących (rys. 2) układ równań różniczkowych Kołmogorowa ma postać

$$\frac{\partial}{\partial r} p_{i,r}(t,r) = \lambda_{i-1,i} p_{i-1,r}(t,r) - \lambda_{i,i+1} p_{i,r}(t,r) \quad \text{dla } i=1, 2, \dots, s \quad (4)$$

gdzie: $p_{1,0}(t,r) = 0$,

$$\lambda_{s,s+1} = 0$$

z warunkami początkowymi: $p_{1,j}(t,0) = 1$,

$$p_{i,j}(t,0) = 0 \quad \text{dla } i > 1$$

Rozwiązanie układu (4) może być kłopotliwe. Skorzystano więc z możliwości dekompozycji struktury na dwa etapy (rys. 4). Dla każdego etapu rozwiązanie układu równań Kolmogorowa jest stosunkowo proste i znane z literatury [1], [6].

Przykładowo, dla etapu I

$$P_{(B_A, B_E) \rightarrow (B_A, B_E)}(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{gdzie: } \lambda = \lambda^{A^*1} + \lambda^{A^*0} \quad (5)$$

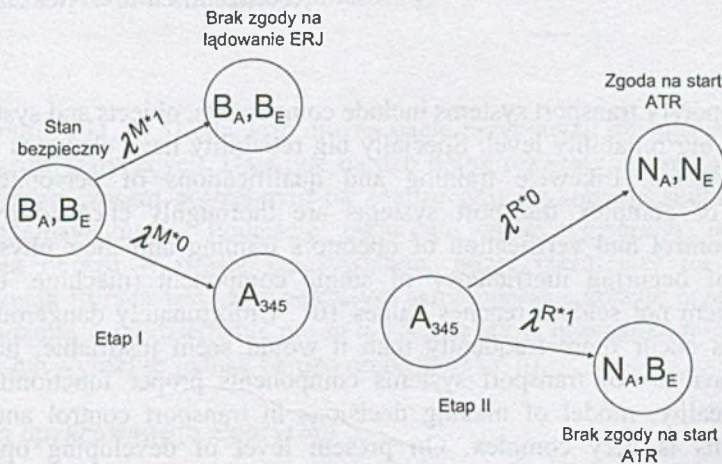
$$P_{(B_A, B_E) \rightarrow (B_A, B_E)}(t) = \frac{\lambda^{A^*1}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (6)$$

$$P_{(B_A, B_E) \rightarrow A_{345}}(t) = \frac{\lambda^{A^*0}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (7)$$

Analogiczne rozwiązania występują dla etapu II. Złożenie rozwiązań wyznacza m.in. prawdopodobieństwo przejścia ze stanu bezpiecznego (B_A, B_E) do stanu najbardziej niebezpiecznego (N_A, N_E) (poważny incydent lotniczy w wyniku zbyt wolno i niestarannie uzgodnionych i wykonanych manewrów uniknięcia kolizji), które wynosi

$$P_{(B_A, B_E) \rightarrow (N_A, N_E)}(t) = \frac{\lambda^{A^*0}}{\lambda^{A^*0} + \lambda^{A^*1}} \frac{\lambda^{E^*0}}{\lambda^{E^*0} + \lambda^{E^*1}} \cdot \left\{ 1 - \frac{\lambda^{A^*0} + \lambda^{A^*1}}{\lambda^{A^*0} + \lambda^{A^*1} - \lambda^{E^*0} - \lambda^{E^*1}} e^{-(\lambda^{E^*0} + \lambda^{E^*1})t} + \frac{\lambda^{E^*0} + \lambda^{E^*1}}{\lambda^{A^*0} + \lambda^{A^*1} - \lambda^{E^*0} - \lambda^{E^*1}} e^{-(\lambda^{A^*0} + \lambda^{A^*1})t} \right\} \quad (8)$$

Na przedstawionym modelu bezpieczeństwa przeprowadzono serię obliczeń symulacyjnych. Wyniki są, niestety, bardzo pesymistyczne. Uzyskane wartości prawdopodobieństwa podjęcia błędnych decyzji sterujących są zgodne z wynikami testów medycznych jedynie dla ruchu o dużej i bardzo dużej intensywności i operatorów pracujących w warunkach idealnych. Dla ruchu o niewielkiej intensywności i w sytuacji znużenia (np. koniec zmiany) modelowa intensywność podejmowania błędnych decyzji rośnie o kilka rzędów wielkości.



Rys. 4. Dekompozycja przykładowej struktury niezawodnościowej

5. Podsumowanie

Ogólny model procesu podejmowania decyzji w systemach sterowania ruchem w transporcie zbliżony do rzeczywistego jest bardzo złożony. Przy aktualnym poziomie rozwoju metod optymalizacji możliwe jest jedynie wykorzystanie modeli do badań prostych modeli podejmowania błędnych decyzji sterujących w celu wyznaczenia między innymi aktualnych poziomów bezpieczeństwa (CLS). Uzyskane wyniki modelowe wskazują jednak na możliwość analizy ilościowej CLS. Potwierdziły to m.in. wyniki obliczeń przykładu pokazanego w zarysie w rozdziale 4.

BIBLIOGRAFIA

1. Barlow R., Proschan R.: Statistical Theory of Reliability and Life Testing. Holt, Rinekat and Winston, N. York 1975.
2. Malarski M.: Bezpieczeństwo eksploatacji układu człowiek – złożone systemy transportowe. Zeszyty Naukowe AM, Szczecin 2006.
3. Malarski M., Winiewski A.: Problem oceny bezpieczeństwa ruchu lotniskowego. Transport XXI, Stare Jabłonki 2007.
4. Malarski M.: Inżynieria ruchu lotniczego. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
5. Mica E., Rodgers M. D.: Distribution of attention, situation awareness and workload in a passive air traffic control task: Implication of operational errors and automation.: Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine, Report No. DOT/FAA/AM-97/13, Washington 1997.
6. Piasecki S.: Elementy teorii niezawodności i eksploatacji obiektów o elementach wielostanowych. IBS PAN, Warszawa 1995.

Recenzent: Dr inż. Aleksander Nawrat

Abstract

Contemporary transport systems include components, objects and systems having big and very big reliability level. Specially big reliability have elements of transport managing systems. Likewise training and qualifications of personnel servicing components of complex transport systems are thoroughly checked by extensive systems of control and verification of operators training and their physical ability. Probability of occurring inefficiency of single component (machine, operator) in transport system not seldom reaches values 10^{-8} . Unfortunately dangerous situations and accidents occur more frequently than it would seem justifiable, judging from probability analysis of transport systems components proper functioning. Overall, resembling reality, model of making decisions in transport control and managing traffic systems is very complex. On present level of developing optimization methods, only applying models for simple examinations models of making wrong decisions - used for designating, among others, current levels of safety (CLS) - is possible. Obtained model results indicate, however, that quantity CLS analysis is possible.