PRACE NAUKOWE AKADEMII EKONOMICZNEJ WE WROCŁAWIU
Nr 1078 — 2005
Strategie i logistyka organizacji sieciowych

Tomasz Nowakowski
Politechnika Wrocławska

PROBLEMY MODELOWANIA NIEZAWODNOŚCI SIECI TRANSPORTOWYCH

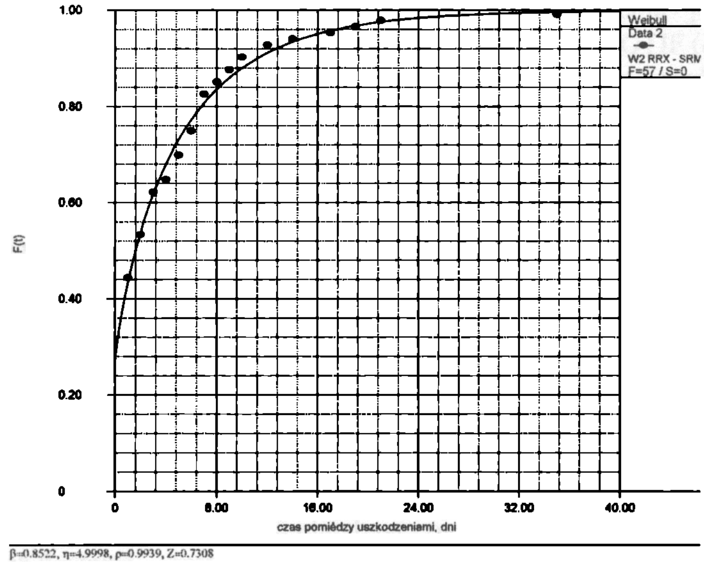
1. Wstęp

Branża transportowo-spedycyjno-logistyczna jest obecnie i będzie jedną z najszybciej rozwijających się w kraju. Prawdopodobnie kosztem zmniejszania się ogólnej masy ładunkowej będzie rosła wielkość przewozów towarów wysoko przetworzonych. Następstwem tego będzie wzrost wartości przewożonych towarów, a zatem wzrost wymagań klientów co do zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa ładunku oraz niezawodności dostawy. Dlatego też ważnym elementem w ocenie oferowanych i planowanych usług transportowo-logistycznych jest określenie ich niezawodności.

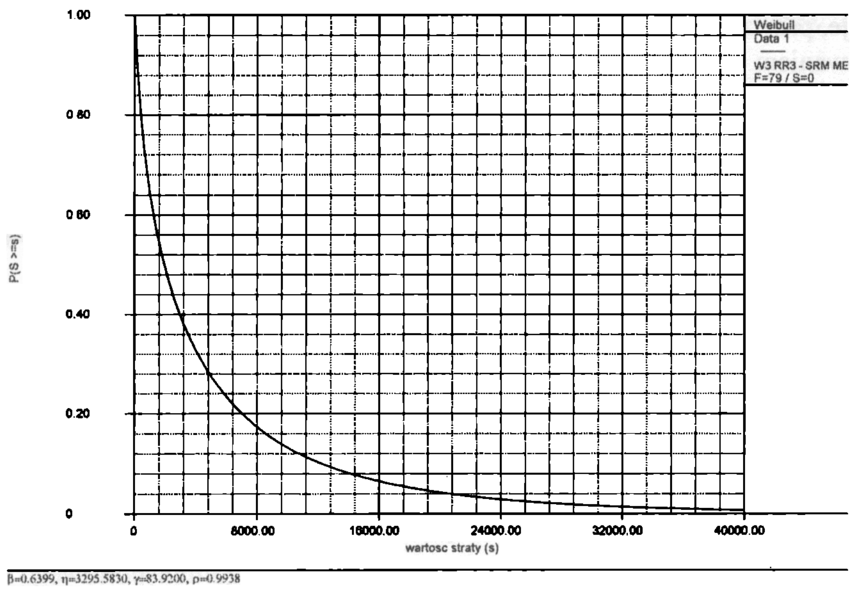
Podczas realizacji zadania transportowego występują zakłócenia uniemożliwiające prawidłowe wykonanie zlecenia. Mogą one być następstwem nieprawidłowego przygotowania całego procesu, ludzkich błędów, nierzetelności podwykonawców lub też zdarzeń losowych, takich jak wypadki drogowe, kataklizmy, kradzieże itp.

Na przykład w badaniach niezawodności procesu transportowego w przedsiębiorstwie spedycyjnym[1] ustalono rodzaje najczęściej występujących w procesie błędów. Należą do nich:
- zniszczenie lub uszkodzenie przesyłki,
- ubytek, czyli zaginięcie części przesyłki,
- utrata, czyli całkowite zaginięcie przesyłki,
- opóźnienie w wykonaniu zlecenia.

[1] M. Kierecki, *Ocena niezawodności procesu dystrybucji w transporcie drogowym*, praca dyplomowa magisterska (nie publikowana), Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.



Rys. 1. Rozkład prawdopodobieństwa czasu między zgłoszonymi i uznanymi szkodami



Rys. 2. Rozkład prawdopodobieństwa wartości odszkodowania

Przykładowe wyniki analizy niezawodności procesu (rys. 1 i 2) wskazują na istotną wartość prawdopodobieństwa wystąpienia szkody oraz znaczne skutki ekonomiczne takich zdarzeń.

2. Pojęcie niezawodności

W ujęciu technicznym niezawodność systemu (obiektu technicznego) jest definiowana jako[2] zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią czynniki: nieuszkadzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi. Termin „niezawodność" powinien być używany tylko do ogólnego nieliczbowego opisu.

Gotowość oznacza zdolność obiektu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnianie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne. Zakłada się, że środki zewnętrzne inne niż środki obsługi nie wpływają na gotowość obiektu.

Nieuszkadzalność jest rozumiana jako zdolność obiektu do poprawnego działania nie przerwanego uszkodzeniem. Oznacza więc zdolność obiektu do wypełniania wymaganych funkcji w danych warunkach w danym przedziale czasu. Zakłada się, że na początku danego przedziału czasu obiekt jest w stanie zdatności – może poprawnie funkcjonować.

Obsługiwalność jest to zdolność obiektu do utrzymania lub odtworzenia w danych warunkach eksploatacji stanu, w którym może on spełniać wymagane funkcje, przy założeniu, że obsługa jest przeprowadzona w ustalonych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków. Zapewnienie środków obsługi wiąże się ze zdolnością organizacji zajmującej się obsługą do zapewnienia w danych warunkach użytkowania i obsługiwania – na żądanie – środków potrzebnych do obsługi obiektu przy danej polityce obsługi.

Określenie niezawodności systemu technicznego wymaga zdefiniowania jego stanu granicznego, a więc określenia, przy jakich wartościach charakteryzujących stan systemu jest on zdatny do realizacji zadania. Zakładając, że:

– system może być tylko w dwóch stanach – niezdatny i zdatny:

$$z : X \to \{0,1\},$$

– proces losowy $\{X_t,\ t \geq 0\}$ przedstawia zmiany parametrów charakteryzujących stan systemu,

można niezawodność określić zależnością [1]:

$$R(t) = P[z(X_t) = 1],\quad t \geq 0.$$

Odnosząc się do niezawodności systemu logistycznego/transportowego należy sprecyzować definicję adekwatną do istoty prowadzonej analizy systemowej. Należy więc wziąć pod uwagę znacznie większą różnorodność pojawiających się błędów i zakłóceń niż tylko uszkodzenia obiektu technicznego.

---

[2] PN-93/N-50191 pt. „Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usługi".

Jedną z możliwości zdefiniowania niezawodności systemu jest metoda „perfekcyjnej realizacji zamówienia", wykorzystująca wskaźnik OTIF (*on-time, in-full, error-free*)[3], tzn. na czas, kompletnie i bezbłędnie – bez uszkodzenia towaru. Perfekcyjnie wykonane zamówienie oznacza, że towar został dostarczony bez żadnego opóźnienia, dostarczono wszystkie zamówione części i żadna część nie została w procesie logistycznym uszkodzona. Wartość wskaźnika OTIF można wyznaczyć z wzoru:

$$\mathrm{OTIF} = P_{o-t} P_{i-f} P_{e-f}.$$

Przyjęto następujące kryteria oceny poszczególnych czynników:

- dostawa dostarczona na czas – dostawę uważa się za dostarczoną na czas, gdy termin pojawienia się jej w magazynie zakładu nie przekracza terminu ustalonego z góry (P_{o-t} = 1,0); w innym przypadku stopień spełnienia kryterium wyraża się ilorazem wyznaczonym przez stosunek liczby dni opóźnienia do czasu dostarczenia poprzedniej dostawy (liczba wszystkich dni łącznie z dniami wolnymi od pracy),
- kompletna dostawa – dostawę uważa się za kompletną, jeżeli ilość dostarczona odpowiada dokładnie ilości podanej w zamówieniu (P_{i-f} = 1,0); w innym przypadku do obliczenia stopnia spełnienia kryterium wykorzystano iloraz wyrażony stosunkiem liczby brakujących części w dostawie do liczby zamówionych części,
- jakość dostarczonych części – warunek uważa się za spełniony, jeżeli dostawa jest pozbawiona jakichkolwiek wad jakościowych (P_{e-f}= 1,0); jeżeli w dostawie zaobserwowano dowolną niezgodność jakościową to wartość wskaźnika P_{e-f} = 0,98 i zmniejsza się proporcjonalnie do stosunku liczby części z wadą jakościową do łącznej liczby części w dostawie.

3. Model niezawodności sieci transportowej

System transportowy może być zamodelowany z wykorzystaniem teorii grafów. W takim modelu wierzchołki grafu odwzorowują miejsca wysyłki towaru (źródła), miejsca odbioru, punkty zwrotne, w których dokonuje się przeładunku towarów lub ich magazynowania, a łuki (gałęzie) – elementy korytarza transportowego.

[3] T. Krajeński, *Badanie niezawodności dostaw zewnętrznych...*, praca dyplomowa magisterska (nie publikowana), Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.

3.1. Stany systemu

Biorąc pod uwagę problemy niezawodności i bezpieczeństwa transportu, najczęściej[4] stosuje się modele Markowa lub semi-Markowa. Można wówczas wprowadzić dodatkowe punkty korekcyjne pozwalające na uwzględnienie losowych zdarzeń ograniczających ciągły przepływ towarów (np. uszkodzenia środków transportu lub urządzeń przeładunkowych, błędy w przepływie informacji) oraz zamodelowanie negatywnych skutków takich zdarzeń dla otoczenia systemu transportowego (zagadnień bezpieczeństwa).

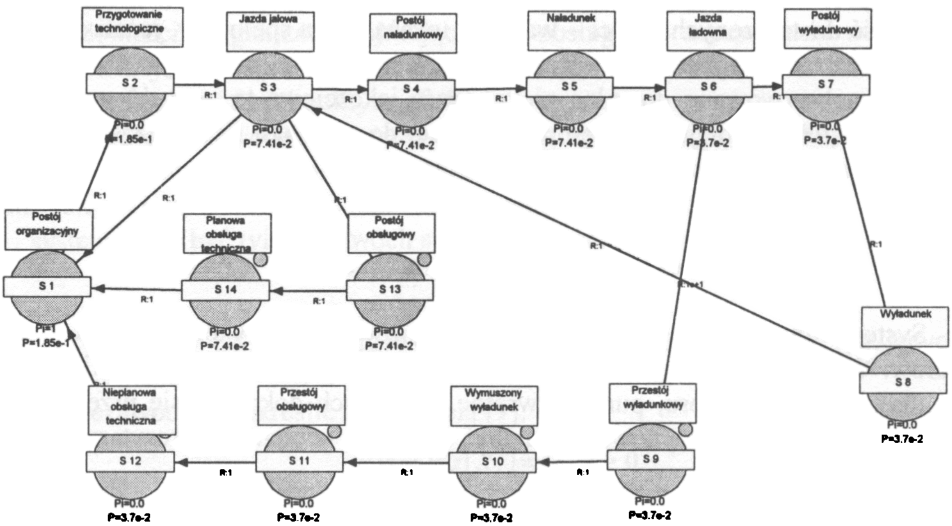
Korzysta się z modelu matematycznym złożonego obiektu technicznego, którym jest uporządkowany zbiór[5]

$$(S_1, S_2, ..., S_n, S, \sigma),$$

gdzie: S_i – stan i-tego elementu systemu,
S – stan systemu,
W tym modelu σ oznacza funkcję.

$$\sigma : S_1 \times S_2 \times ... \times S_n \to S,$$

przyporządkowującą stanom elementów systemu stan systemu. Funkcję σ nazywa się strukturą systemu (N, σ).



Rys. 3. Model niezawodności systemu transportowego

[4] T. Nowakowski, *Problems of Safety & Reliability Analysis of Combined Road-Rail Transportation System*. Systems 2001; 1–2.

[5] D. Bobrowski, *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1985.

Przykład takiego modelu pokazano na rys. 3[6]. Wadą takiego modelu, z punktu widzenia możliwości podejmowania decyzji służących zwiększeniem niezawodności realizacji zadania transportowego, jest trudność odwzorowania sieci transportowej na strukturę niezawodności systemu transportowego. Wydaje się, że efektywniejszym modelem będzie bezpośrednia analiza niezawodności sieci transportowej.

3.2. Sieć transportowa

Ogólnie siecią S nazywa się uporządkowaną trójkę[7]:

$$S = \langle G, \varphi, \psi \rangle,$$

przy czym: $G = \langle W, U, P \rangle$ jest dowolnym grafem,
$\varphi = \{f_1, f_2, ..., f_L\}$ jest zbiorem funkcji $f_i : W \to R$, $i = 0, 1, ...,$
$\psi = \{g_1, g_2, ... g_J\}$ jest zbiorem funkcji $g_j : U \to R, j = 0, 1, ...,$
określonych na zbiorze gałęzi grafu.

Dopuszcza się w sieci, żeby jeden ze zbiorów φ lub ψ był pusty. W przypadku, gdy $\varphi = \psi = 0$, sieć staje się grafem G. Oznacza to, że sieć jest grafem opisanym – takim grafem, którego wierzchołki i gałęzie są charakteryzowane odpowiednimi liczbami. Wówczas graf G opisuje strukturę sieci, a funkcje φ, ψ – odpowiednie własności elementów tej struktury.

Podziały sieci są dokonywane w zależności od rodzaju grafu sieci i w zależności od własności funkcji ψ i φ. Siecią transportową nazywa się sieć[8]

$$S = \langle G, a(x), h(x, y) \rangle$$

spełniającą warunki:

- $G = \langle W, U \rangle$ jest spójnym unigrafem skierowanym bez pętli;
- $a(x)$ jest funkcją określoną na zbiorze wierzchołków, tzn. $x \in W$ taką, że

$$a(x) = \begin{cases} 1 \text{ dla } x = x_p, \\ 0 \text{ dla } x \neq x_p \wedge x \neq x_k, \\ -1 \text{ dla } x = x_k, \end{cases}$$

gdzie: x_p – źródło sieci,
x_k – ujście sieci.

- $h(x, y)$ jest funkcją określoną na łukach grafu $<x, y> \in U$ taką, że;

$$0 \leq h(x, y) < \infty,$$

której wartości najczęściej są interpretowane jako przepustowość łuków.

---

[6] T. Nowakowski, wyd. cyt.

[7] S. Piasecki, *Optymalizacja systemów przewozowych*, WKŁ, Warszawa 1973; L. Skoczyński, I. Szczepanik, *Modelowanie procesów transportowych*. Politechnika Warszawska, Warszawa 1991.

[8] L. Skoczyński, I. Szczepanik, wyd. cyt.

Załóżmy, że na łukach grafu opisana jest także funkcja $r(x, y) = r_i$, określająca prawdopodobieństwo niezawodnego wykonania zadania transportowego pomiędzy węzłami x i y, wynikające m.in. z niezawodności pojazdów realizujących przewozy, niezawodności systemów sterujących ruchem, trwałości infrastruktury itp. Ponadto, dla uproszczenia problemu, przyjęto także, że:

- w węzłach (np. podczas załadunku lub przeładunku) nie występują uszkodzenia;
- proces transportowy jest nienaprawialny, nie ma możliwości usunięcia uszkodzenia/błędu.

Wówczas, dla prostych struktur (szeregowej, równoległej, szeregowo-równoległej lub równoległo-szeregowej) wyznaczenie niezawodności sieci transportowej $R_s(t)$ jest stosunkowo łatwe (tab. 1).

Wielu struktur złożonych nie można przedstawić za pomocą schematu blokowego – wprowadza się wówczas pojęcie pseudostruktury[9]. Każdą strukturę koherentną można przedstawić jako szeregowo-równoległą pseudostrukturę:

- podzbiór $P \subset N$ systemu (N, φ) nazywa się ścieżką zdatności systemu, gdy przy zdatności wszystkich elementów należących do tego zbioru system jest w stanie zdatności; ścieżkę nazywa się minimalną, gdy nie zawiera żadnej innej ścieżki jako podzbioru;
- podzbiór $K \subset N$ systemu (N, φ) nazywa się cięciem (przekrojem niezdatności systemu), jeżeli w następstwie niezdatności wszystkich elementów z K system jest niezdatny; cięcie nazywa się minimalnym, jeżeli nie zawiera jako podzbioru żadnego innego cięcia.

Własności minimalnych ścieżek zdatności i minimalnych przekrojów niezdatności są m.in. następujące [1]:

- strukturę systemu można przedstawić za pomocą pseudostruktury utworzonej z minimalnych ścieżek zdatności połączonych równolegle;
- strukturę systemu można przedstawić za pomocą pseudostruktury utworzonej z minimalnych cięć niezdatności połączonych szeregowo;
- struktura minimalnej ścieżki zdatności P_j ($j = 1, ..., p$) jest strukturą szeregową,
- struktura minimalnego przekroju niezdatności K_j ($j = 1, ..., k$) jest strukturą równoległą.

Strukturę systemu φ można wobec tego przedstawić za pomocą struktur jej minimalnych ścieżek:

$$\varphi(x) = \max_{1 \le j \le p} \min_{i \in P_j} x_i,$$

co odpowiada pseudostrukturze φ_P utworzonej z minimalnych ścieżek, lub za pomocą struktur minimalnych cięć:

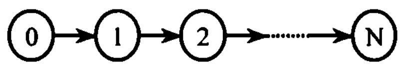
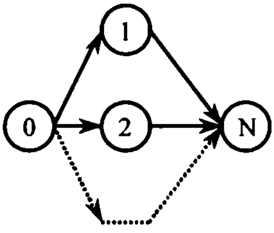
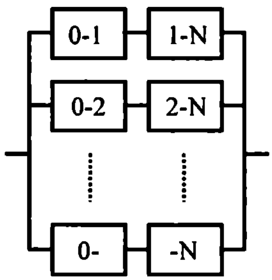
$$\varphi(x) = \min_{1 \le j \le k} \max_{i \in K_j} x_i,$$

co odpowiada pseudostrukturze φ_K utworzonej z minimalnych cięć.

---

[9] D. Bobrowski, wyd. cyt.

Tabela 1. Sposób obliczania niezawodności struktur podstawowych

<table>
<tr><td>Model sieci</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Schemat blokowy</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>R_s</td><td>$R_s = \prod_{i=1}^{n} r_i$</td><td>$R_s = 1 - \left(\prod_{i=1,3,\ldots}^{n} (1 - r_i \cdot r_{i+1}) \right)$</td></tr>
</table>

Wówczas można oszacować od góry i z dołu niezawodność systemu, która jest nie gorsza niż niezawodność systemu o pseudostrukturze φ_K i nie lepsza niż niezawodność systemu o pseudostrukturze φ_P. Niezawodność systemów o pseudostrukturach φ_P i φ_K jest stosunkowo łatwa do wyznaczenia:

$$\max_{1 \le j \le p} \left\{ P\left(\min_{i \in P_j} x_i = 1 \right) \right\} \le R_s \le \min_{1 \le j \le k} \left\{ P\left(\max_{i \in K_j} x_i = 1 \right) \right\}.$$

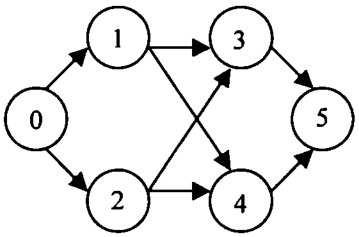
3.3. Przykład – niezawodność sieci transportowej

Dana jest sieć transportowa opisana grafem przedstawionym na rys. 4. Węzeł 0 stanowi źródło, a węzeł 5 – ujście sieci. Niezawodność poszczególnych gałęzi sieci dla danej chwili czasu jest taka sama:

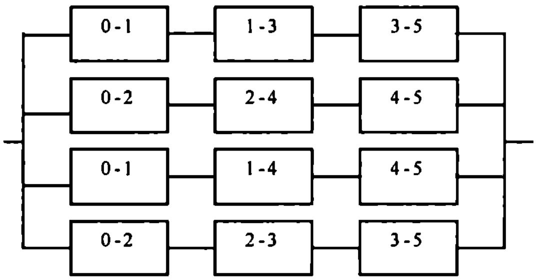
$$r_{0\text{-}1} = r_{1\text{-}2} = \ldots = r_{4\text{-}5} = r.$$

Minimalne ścieżki zdatności stanowią zbiory: {0-1, 1-3, 3-5}, {0-2, 2-4, 4-5}, {0-1, 1-4, 4,5}, {0-2, 2-3, 3-5}. Pseudostrukturę pokazano na rys. 5. Jej niezawodność wynosi:

$$R_s = 1 - \left(1 - r^3\right)^4.$$



Rys. 4. Schemat sieci transportowej

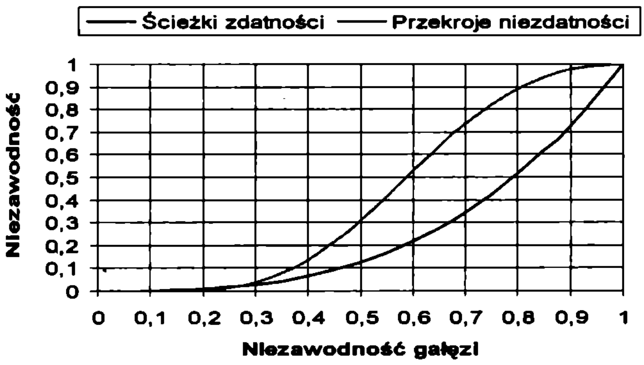


Rys. 5. Pseudostruktura φ_P

Minimalne przekroje niezdatności danej sieci stanowią zbiory: {0-1, 0-2}, {0-1, 2-3, 2-4}, 0-2, 1-3, 1-4}, {1-3, 2-4, 1-4, 2-3}, {1-3, 2-3, 4-5}, {2-4, 1-4, 3-5}, {3-5, 4-5}. Niezawodność pseudostruktury φ_K wynosi:

$$R_s = \left[1 - (1-r)^2\right]^2 \left[1 - (1-r)^3\right]^4 \left[1 - (1-r)^4\right].$$

Oszacowanie niezawodność sieci transportowej zależy od niezawodności elementów składowych, jak pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Oszacowania niezawodności sieci transportowej

Ponieważ poszczególne gałęzie sieci transportowej pojawiają się w pseudostrukturach kilkakrotnie, ich wpływ na niezawodność całej sieci jest zróżnicowany. Można też wyznaczyć te miejsca sieci, które mają największe znaczenie dla niezawodności funkcjonowania całej sieci.

Literatura

[1] Bobrowski D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1985.
[2] Kierecki M., *Ocena niezawodności procesu dystrybucji w transporcie drogowym*, praca dyplomowa magisterska (nie publikowana), Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
[3] Krajeński T., *Badanie niezawodności dostaw zewnętrznych...*, praca dyplomowa magisterska (nie publikowana), Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
[4] Nowakowski T., *Problems of Safety & Reliability Analysis of Combined Road-Rail Transportation System*. Systems 2001; 1–2.
[5] Piasecki S., *Optymalizacja systemów przewozowych*, WKŁ, Warszawa 1973.
[6] PN-93/N-50191 pt. „Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usługi".
[7] Skoczyński L., Szczepanik I., *Modelowanie procesów transportowych*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1991.

PROBLEMS OF TRANSPORTATION NET RELIABILITY ASSESSMENT

Summary

The article proves the usefulness of transport net reliability assessment. The example of reliability assessment of transport objectives realization in a forwarding firm is presented the base of theoretical assessment of transport nets reliability with the use of among others operating paths is discussed. The calculations is done for one transport net.