

Jacek Mazurkiewicz, Tomasz Walkowiak

Politechnika Wrocławska, Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTU DYSKRETNEGO Z WYKORZYSTANIEM DETEKCJI STANÓW KRYTYCZNYCH

Rękopis dostarczono, maj 2013

Streszczenie: Artykuł prezentuje analizę efektywności funkcjonowania systemu transportu dyskretnego. Zaproponowano formalny model tego typu systemów uwzględniając aspekty funkcjonalne i niezawodnościowe. Estymacja miar efektywności odbywa się z użyciem symulacji Monte Carlo. Miara ta staje się także punktem wyjścia do określenia trzech poziomów zdatności systemu – jako zdatnego, niezdatnego oraz pozostającego w stanie krytycznym wobec realizowanych zadań przewozowych. Zaproponowane rozwiązanie pozwala prognozować efektywność systemu w krótkim horyzoncie czasowym. Opisane podejście zostało zweryfikowane analizą zachowania rzeczywistego systemu transportu dyskretnego.

Słowa kluczowe: system transportu dyskretnego, stany krytyczne, symulacja Monte Carlo

1. WPROWADZENIE

Artykuł podejmuje problem analizy systemów transportu dyskretnego – czyli systemów transportowych, w których przemieszczanie towarów odbywa się pojazdami o ograniczonej ładowności. Pojazdy te przewożą ładunki zgodnie z pewnymi regułami dyspozycji [9], a same ładunki mają określone – zunifikowane gabaryty i cechy charakterystyczne – a tym samym ich wolumen można opisać wartością skalarną. Towary przeznaczone do przewozu pojawiają się w systemie w losowych chwilach i są obciążone pewnym reżimem czasowym ich dostarczenia do miejsca przeznaczenia [9][11][12]. Główny nacisk został położony na problem predykcji efektywności funkcjonowania systemu w krótkim horyzoncie czasowym. Efektywność systemu jest mierzona zaproponowanym współczynnikiem (1) – miarą wolumenu ładunków dostarczonych o czasie – zgodnie z założonym planem dostawy [11]. Efektywność działania systemu jest właściwa gdy wartość miary nie jest niższa niż przyjęty akceptowalny poziom. Na bazie miary efektywności określamy system jako zdatny lub niezdatny do realizacji zadań.

W artykule proponujemy wprowadzenie stanu trzeciego – krytycznego – jako przejściowego, granicznego wobec dwóch pierwotnych stanów zdatności [3][8]. Osiągnięcie stanu krytycznego może być traktowane jako sygnał alarmowy do podjęcia pilnych działań zwiększających zasoby systemu transportowego [1].

Struktura artykułu jest następująca: rozdział drugi prezentuje model systemu transportowego. Kolejna część jest poświęcona zagadnieniom mierzenia efektywności jego działania. Przedstawiono przyjęte podejście symulacyjne analizy systemu oraz obrane definicje miary efektywności. Rozdział czwarty to dyskusja stanów zdatności zamknięta przykładem obliczeniowym realnego systemu transportu dyskretnego.

2. MODEL SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Analizie poddano dyskretny system transportowy w którym towary transportowane są przez flotę pojazdów. Pojemności pojazdów wyrażone są w dyskretnych jednostkach pojemności nazywanych dalej kontenerami. System składa się z węzłów (lokalizacji, gdzie towar się pojawia lub dokąd jest on przesyłany) oraz pojazdów, które go przewożą pomiędzy węzłami. Pojazdy znajdujące się w ruchu muszą być obsługiwane przez operatorów (kierowców). Zasób kierowców jest ograniczony, a poszczególni kierowcy przydzielani są do różnych pojazdów w miarę potrzeb. Pojazdy przemieszczają się zgodnie z algorytmami dyspozycji, które określają ich trasy i częstotliwości kursowania. Analizowany system składa się z [7]:

- zbioru węzłów transportowych, wśród których wyróżniony jest węzeł centralny (dyspozytorski), w tym węzły rozpoczynają się i kończą się wszystkie kursy;
- zbioru tras łączących węzły – trasy charakteryzowane są rozkładami losowymi czasu potrzebnego na ich przebycie,
- zbioru pojazdów o określonych ładownościach (wyrażonych liczbą kontenerów),
- zbioru operatorów pojazdów (kierowców),
- zbioru zleceń transportowych (z określonymi węzłami źródłowymi i docelowymi),
- zbioru ekip remontowych.

Poszczególne elementy modelu można krótko scharakteryzować następująco [7]:

Węzły i trasy: Węzły są to lokalizacje, w których pojazdy mogą być przeładowywane. Jeżeli pojazd bezpośrednio przejeżdża od jednego węzła do drugiego, to trasa przejazdu określa czas potrzebny na to. Czas ten jest zadawany rozkładem losowym, odzwierciedlającym zmieniające się warunki ruchu. W węzłach pojawiają się losowo zlecenia na przewóz towaru do innych węzłów. W modelu występowanie zleceń opisane jest procesami losowymi. W systemie występuje jeden węzeł centralny, będący punktem początkowym i końcowym wszystkich kursów.

Pojazdy: Pojazdy poruszają się pomiędzy węzłami, odbierając z nich towar przeznaczony do dalszych węzłów na ich kursie. Zakładamy, że pojazdy jednego typu opisane są zbiorem jednakowych parametrów. W danej chwili pojazd jest charakteryzowany następującym stanem, w którym się znajduje: realizowanym kursem, odległością od początku trasy, liczbą przewożonych kontenerów.

Pojazd może być zaangażowany w realizację wielu zleceń równocześnie, przewożąc towar z różnych węzłów. Pojazd jest w pełni załadowany, jeśli obsługiwane w danej chwili zlecenia przewozowe to umożliwiają. Jeżeli brak odpowiedniej liczby zleceń, to pojazd może być częściowo załadowany.

Operatorzy pojazdów (kierowcy): Przydzielani są do pojazdów, aby mogły one realizować usługi transportowe. Przydział odbywa się w momencie opuszczania przez pojazd węzła centralnego. Praca operatorów regulowana jest przepisami dotyczącymi dopuszczalnego czasu pracy. Operator może w danej chwili bądź odpoczywać po pracy, czekać na przydział pojazdu, kierować pojazdem, albo mieć obowiązkową przerwę w pracy. Przydzielając operatora do pojazdu uwzględnia się jego limit czasu pracy tak, aby w miarę możliwości nie musiał jej przerwać w trakcie realizacji kursu.

Zlecenia transportowe: Zlecenia dotyczą przewozu towaru w zunifikowanych kontenerach. Dany kontener zawiera tylko jeden rodzaj przesyłki, a kontenery przewożone są pojazdami. Zlecenia transportowe określają adresata i nadawcę oraz gwarantowany czas dostawy [11]. Pojazdy są wysyłane do określonego miejsca przeznaczenia po przekroczeniu określonego progu liczby kontenerów ze wspólnym adresatem. Do realizacji przewozu wybierany jest ten pojazd, z grupy dostępnych, którego pojemność najlepiej odpowiada wolumenowi zadania – czyli pojazd największy, który może być załadowany. W przypadku dostępności wielu pojazdów jednakowych – wybór z tej grupy ma charakter losowy.

Ekipy remontowe: Ekipy są identyczne i nierozróżnialne. Nie są przypisane do żadnego węzła systemu, ani nie są przypisane do żadnej trasy. Jedynym parametrem je charakteryzującym jest ich liczba. W bieżącej chwili obserwacji systemu możemy mówić o liczbie ekip wolnych, albo o kolejce pojazdów oczekujących na naprawę.

Rozważane są dwie główne kategorie uszkodzeń występujących w systemie. Pierwszą kategorią są normalne uszkodzenia występujące w trakcie eksploatacji systemu. W tej grupie wyróżnia się trzy sytuacje awaryjne:

- *Uszkodzenia pojazdów*, występujące zgodnie z rozkładem czasu do uszkodzenia. Pojazd uszkodzony poddawany jest naprawie przez jedną z ekip remontowych. Pojazd pozostaje uszkodzony przez czas będący sumą czasu oczekiwania na ekipę remontową oraz czasu odnowy. Czas oczekiwania na ekipę wynika z zajętości ekip innymi remontami, natomiast czas odnowy modelowany jest rozkładem losowym.
- *Niezdolność do pracy kierowców:* Kierowcy z różnych przyczyn, na przykład chorób, czasowo nie mogą realizować swoich zadań. Na potrzeby modelowania sytuacji niezdolności do pracy kierowcy proponuje się rozróżnienie trzech przypadków [6]:
 - niezdolność krótka (1 do 3 dni),
 - niezdolność typowa (3 do 10 dni),
 - niezdolność długa (10 do 300 dni).

Dla każdej z tych kategorii przyjmuje się inny rozkład losowy występowania absencji oraz rozkład czasu jej trwania.

- *Przeszkody drogowe oraz zakłócenia ruchu:* Uwzględniane są one bezpośrednio w modelu dyskretnego systemu transportowego, poprzez dobór odpowiedniego rozkładu czasu przejazdu trasy. Ze względu na specyfikę tych sytuacji awaryjnych, stosowane rozkłady mogą mieć charakter wielomodalny.

Cechą charakterystyczną wymienionych uszkodzeń jest ich stosunkowo częste występowanie i duża przewidywalność. Dlatego możliwe jest przeciwdziałanie ich

skutkom, poprzez dobór odpowiednich redundancji (utrzymywanie dodatkowych pojazdów i operatorów, nadmiarowość czasowa w planowaniu tabel kursowych, itp.).

Drugą kategorią uszkodzeń jest występowanie sytuacji kryzysowych, bardzo mało prawdopodobnych, natomiast bardzo znacząco zakłócających działanie systemu. Przykładami tej kategorii uszkodzeń są [11]:

- *Równoczesna niedostępność wszystkich lub znaczącej części pojazdów*: Może być spowodowana różnymi, trudnymi do przewidzenia okolicznościami, takimi jak strajk kierowców, sabotaż, klęska żywiołowa powodująca zniszczenie pojazdów lub zanik dostaw paliwa. W rezultacie, system transportowy przestaje funkcjonować przez określony czas (kilka dni).
- *Nieprzewidywalny gwałtowny wzrost absencji kierowców*: Może być wynikiem np. panującej lokalnie epidemii, infekcji wirusowej, klęski żywiołowej. Powoduje, że brakuje obsady do znaczącej części pojazdów, przez co system pracuje przez pewien czas ze znacznie obniżoną wydajnością.
- *Okresowy gwałtowny wzrost liczby zleceń transportowych*: np. spowodowany upadkiem innych, konkurencyjnych systemów transportowych w rejonie. Powoduje, że system nie jest w stanie na bieżąco zrealizować wszystkich zleceń i powstają znaczne opóźnienia w dostawach. Ma to oczywiście znaczenie tylko w systemach, w których nie jest dopuszczalna odmowa przyjęcia zlecenia.

3. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI FUNKCJONOWANIA SYSTEMU

Analiza efektywności działania opisanego powyżej systemu transportowego jest realizowana z użyciem symulacji komputerowej jego zachowania w realnych warunkach pracy. Efektywność jest oceniana stosowną – zdefiniowaną przez autorów – miarą.

3.1. ZASADY SYMULACJI PROCESOWO-ZDARZENIOWEJ

Model systemu transportu dyskretnego opisany w poprzednim rozdziale trudno jest bezpośrednio wykorzystać w praktyce używając do tego metod analitycznych [2]. Jedyną, jak się wydaje, efektywną drogą pozostaje symulacja komputerowa. Istnieją różne techniki symulacyjne, ich wykorzystanie uzależnione jest od zastosowanych modeli systemu. Ogólnie techniki symulacyjne można podzielić na: ciągłe lub dyskretne, stochastyczne lub deterministyczne, statyczne lub dynamiczne. Symulacja ciągła bazuje na modelach opartych o opisy w postaci równań różniczkowych, a otrzymywane wyniki mają postać przebiegów ciągłych w czasie [4]. W przypadku symulacji dyskretnej, zmiany stanu modelu następują w określonych chwilach czasu. Ze względu na opisany wcześniej model dyskretnego systemu transportowego, ta technika musi być wykorzystana w tym przypadku. Symulacja statyczna służy odnalezieniu rozwiązania dla układu równań

opisujących system w stanie równowagi. Symulacja dynamiczna polega na próbie znalezienia zmian stanu systemu w czasie. Modele stochastyczne opisują system przy pomocy zmiennych losowych o znanych rozkładach. Ich symulacja opiera się na generatorach liczb losowych. Do symulacji stosuje się w tym przypadku metodę Monte-Carlo [5], polegającą na wielokrotnym symulowaniu zachowań systemu w podobnych warunkach w celu otrzymania rozkładów wyników i ich parametrów uśrednionych. W przypadku, gdy wykonamy dostatecznie dużo powtórzeń otrzymamy odpowiednio realistyczne rezultaty. Symulacja działania systemów dyskretnych może być zrealizowana na wiele sposobów: symulacja ze stałym krokiem czasowym, symulacja zdarzeniowa, symulacja rozproszona. Najodpowiedniejszą, jak się wydaje, techniką przydatną dla symulacji działania dyskretnego systemu transportowego jest symulacja zdarzeniowa. Wymaga ona zdefiniowania zbioru zdarzeń, które dotyczą poszczególnych elementów systemu, obserwowanych w następujących po sobie chwilach czasu. Jednocześnie bada się wpływ pojedynczego zdarzenia na inne elementy całego systemu. Definicja ta musi odzwierciedlić elementy systemu na żądanym i wyważonym jednocześnie poziomie szczegółowości. Jeśli liczba detali modelu zacznie rosnąć symulacja stanie się praktycznie bezużyteczna z uwagi na złożoność obliczeniową i dużą liczbę parametrów niezbędnych do ustalenia, by symulacja mogła się wykonać. Zbyt duży poziom szczegółowości skutkować może również zbyt obszernym strumieniem danych wyjściowych, które w praktyce uniemożliwią efektywne wyznaczanie miar opisujących system. Zatem ustalenie poziomu szczegółowości jest zagadnieniem nie trywialnym i wymagającym każdorazowego dopasowania do oczekiwanych rezultatów. Prowadzona w ten sposób symulacja systemu powinna odzwierciedlić zachowanie się jego elementów składowych oraz sposób ich współdziałania ze sobą. Z uwagi na niezbędną analizę niezawodnościową model systemu obejmuje także zdarzenia odpowiadające uszkodzeniom i odnowie. Algorytm symulacji polega na równoległym wykonywaniu procesów w poszczególnych elementach systemu w pewnym przedziale czasu, od punktu początkowego (czasu „zerowego”) przez ściśle określoną długość (czas trwania analizy). W systemie wyróżnione są zdarzenia. Ze zdarzeniem powiązana jest chwila czasu określająca moment jego wystąpienia. Efektem zdarzenia jest zmiana stanu niezawodnościowo-funkcjonalnego elementów systemu. Obsługa zdarzeń następuje w obiektach reprezentujących poszczególne elementy systemu. Obiekty działają równolegle. Cykl życia poszczególnych obiektów polega na oczekiwaniu na wystąpienia zdarzenia dla niego przeznaczonego i wykonaniu obsługi danego zdarzenia. Obsługa polega na wykonaniu zadań związanych z danym zdarzeniem (zmiana stanu elementów systemu) i ewentualnym wygenerowanie nowego zdarzenia skierowanego do tego samego lub innego obiektu.

3.2. ZDARZENIA LOSOWE W SYMULATORZE

Jak już wspomniano wcześniej, w procesie symulacji wykorzystywana jest technika Monte-Carlo, polegająca na wielokrotnym symulowaniu przebiegu procesu a następnie badaniu rozkładu otrzymanych wyników [5]. Wymaga ona określenia czasów trwania poszczególnych czynności, w szczególności tych, których czas trwania jest niedeterminowany (losowy). Pewne czynności mogą trwać przez czas o charakterze

losowym, lecz ich czas trwania wynika z funkcjonowania systemu, są to: oczekiwanie na najwcześniejszą chwilę przyjazdu do węzła; oczekiwanie w kolejce na rozładunek; oczekiwanie w kolejce na załadunek; oczekiwanie na ekipę remontową. Pozostałe czynności mają czas trwania określony przez zadany proces losowy i czas ten nie jest związany z innymi zjawiskami jakie zachodzą w systemie, dotyczy to: czasu przejazdu pojazdów; czasu załadunku; czasu rozładunku; czasu do uszkodzenia pojazdu; czasu naprawy pojazdu; czasu choroby kierowcy. W symulatorze odpowiednie odcinki czasu wyznaczane są przy pomocy losowania z użyciem generatorów liczb losowych o zadanym rozkładzie. Poza podstawową obsługą zdarzeń obiekty reprezentujące punkty koncentracji i centrum rozdzielcze posiadają dodatkowo wykonywane procesy związane z generowaniem kontenerów. Po jednym procesie dla każdego punktu docelowego. Cykl życia tego procesu jest bardzo prosty polega na losowym czasie oczekiwania, generowaniu kontenera i dodawaniu go do magazynu (reprezentowanego przez kolejkę) w danym węźle. Generatory wykorzystywane są do losowania czasu do wystąpienia następnego zdarzenia w systemie. Naturalnie, czas ten nie może być ujemny. W przypadku generatora wykładniczego jest to zagwarantowane właściwościami rozkładu. W przypadku rozkładu równomiernego, ujemny czas może wystąpić przy błędnie zadanych parametrach rozkładu (granicach przedziału równomierności) jest to wykrywane przez analizator danych wejściowych. W przypadku generatora normalnego zawsze istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia realizacji o wartości ujemnej. Z tego względu w symulatorze realizowany jest generator rozkładu obciętego. W przypadku wylosowania wartości ujemnej, wylosowana liczba jest odrzucana i generowana następna.

Parametrami procesu symulacji są: liczba powtórzeń procesu symulacji N i czas pojedynczej symulacji T . Dane dla procesu symulacji zapisywane są w pliku tekstowym z wykorzystaniem specjalnie do tego celu opracowanego języka, ułatwiającego ich redagowanie i edycję. Wyniki obliczeń zapisywane są również w pliku tekstowym w formie pełnej lub zagregowanej. Wyniki symulacji przetwarzane są następnie przy pomocy zewnętrznych narzędzi w zależności od rodzaju przeprowadzanej analizy. Do realizacji symulatora wykorzystano Framework [11] *PRIME SSF*. Jest to środowisko programistyczne pozwalające na równoległe symulacje oparte o zdarzenia i procesy. Używa ono autorskiego systemu wielowątkowego, który został specjalnie opracowany do zadania symulacji. W porównaniu z bibliotekami wielowątkowymi ogólnego przeznaczenia zużywa dużo mniej pamięci i charakteryzuje się krótkimi czasem przełączania kontekstu. Bardzo dobrze nadaje się do symulacji systemów, które mogą być zamodelowane jako kolekcja obiektów komunikujących się poprzez komunikaty. Framework *SSF* pozwala na automatyczne mapowanie na wiele procesorów, pozwalając na symulację równoległą w środowiskach rozproszonych. *SSF* jest podstawą dla popularnego symulatora sieci *TCP/IP* o nazwie *SSF.Net*.

3.3. MIARA EFEKTYWNOŚCI DZIAŁANIA SYSTEMU

Generalnie miarą efektywności funkcjonowania systemu transportowego jest jego zdolność do realizacji przewozów towarów w wymaganym reżimie czasowym. W analizowanym modelu przyjęto ziarnistą – kontenerową – strukturę transportowanego

medium. Tym samym kontener jest dostarczony terminowo jeśli czas upływający od momentu jego umieszczenia w systemie do momentu przekazania go do odbiorcy jest krótszy od gwarantowanego czasu dostawy. Proponowaną miarą efektywności systemu jest współczynnik terminowo dostarczonych kontenerów w 24-godzinnym odcinku czasu. Niech zatem $N_d(t)$ oznacza liczbę kontenerów dostarczonych w czasie jednego dnia t oraz $N_{pd}(t)$ – liczbę kontenerów dostarczonych terminowo w ciągu tych samym 24 godzin. Tym samym efektywność systemu transportowego wyrażona może być następująco:

$$a_t = \frac{N_{pd}(t)}{N_d(t)+1} \quad (1)$$

Wartość jeden dodawana w mianowniku wyrażenia (1) jest zabezpieczeniem przed dążeniem współczynnika do nieskończoności w przypadku zupełnego zatrzymania procesu przewozów – czyli sytuacji gdy nie dostarczono żadnego kontenera w czasie prowadzenia analizy działania systemu.

4. STANY KRYTYCZNE SYSTEMU

Określenie „krytyczny” – związane w pojęciem „kryzysowy” może oznaczać punkt zwrotny [2], bądź istotną zmianę stanu o charakterze nagłym z punktu widzenia funkcjonowania systemu [8]. Wydaje się, że znalezienie uniwersalnej definicji stanu krytycznego może być bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Większość podejść literaturowych próbuje określić stan poprzez ważony zestaw cech niezawodnościowych i funkcjonalnych analizowanego systemu. Dla rozważań prowadzonych w tym artykule zdefiniujemy trzy stany: zdatny, niezdatny i krytyczny (graniczny). Celem do którego dążymy jest prezentacja metody pozwalającej na predykcję zachowania systemu w krótkim horyzoncie czasowym – rzędu kilku dni – w oparciu o bieżący stan systemu opisany wynikami jego wielokryterialnej analizy prowadzonej z punktu widzenia właściciela tegoż systemu. Innymi słowy dokonujemy przewidywania najsensowniejszych kierunków zarządzania systemem, problemami jego utrzymania i konserwacji.

4.1. STAN SYSTEMU

Stan systemu S_t rozpatrywany w sensie funkcjonalnym na koniec każdego dnia t jest opisany uporządkowaną trójką: liczbą kierowców n_k – którzy nie są chorzy, liczbą pojazdów n_p – które są w stanie sprawności oraz liczbą kontenerów ulokowanych w magazynach systemu n_{zk} :

$$S_t = \langle n_k, n_p, n_{zk} \rangle. \quad (2)$$

4.2. STANY ZDATNOŚCI SYSTEMU

We wprowadzeniu do artykułu zaproponowaliśmy próbę przypisania stanu funkcjonalnego systemu transportu dyskretnego do jednego z trzech stanów zdatności: zdatny, niezdatny, krytyczny. Przypisanie to będzie warunkowane miarą (1) opisaną w rozdziale 3.3. Dodatkowo stanie się ona wskazaniem do predykcji zachowania systemu w krótkim – kilkudniowym – horyzoncie czasowym Δt . Zatem możemy powiedzieć, że system jest w stanie zdatnym jeśli prawdopodobieństwo, że realizuje terminowo przewozy – przy współczynniku efektywności (1) wyższym od zadanego poziomu α w czasie $t+\Delta t$ – jest większe lub równe wartości progowej θ (3). System jest w stanie niezdatnym, jeśli prawdopodobieństwo, że nie wypełnia zadań przewozowych na zadanym poziomie skuteczności, w określonym horyzoncie czasowym jest większe lub równe wartości progowej θ lecz współczynnik efektywności (1) jest mniejszy lub równy α . We wszystkich innych przypadkach mówimy o stanie krytycznym (3). Dla dwóch wartości progowych $\alpha, \theta \in (0.5, 1)$ stan systemu S_t w dniu t określamy zatem następująco:

$$\begin{array}{ll}
 \text{zdatny} & \text{gdy } \theta \leq \Pr\left(\frac{N_{pd}(t+\Delta t)}{N_d(t\Delta t)+1} > \alpha \mid S_t = \langle n_k, n_p, n_{zk} \rangle\right) \\
 \text{krytyczny} & \text{gdy } 1 - \theta < \Pr\left(\frac{N_{pd}(t+\Delta t)}{N_d(t\Delta t)+1} > \alpha \mid S_t = \langle n_k, n_p, n_{zk} \rangle\right) < \theta \\
 \text{niezdatny} & \text{gdy } \theta \leq \Pr\left(\frac{N_{pd}(t+\Delta t)}{N_d(t\Delta t)+1} \leq \alpha \mid S_t = \langle n_k, n_p, n_{zk} \rangle\right)
 \end{array} \quad (3)$$

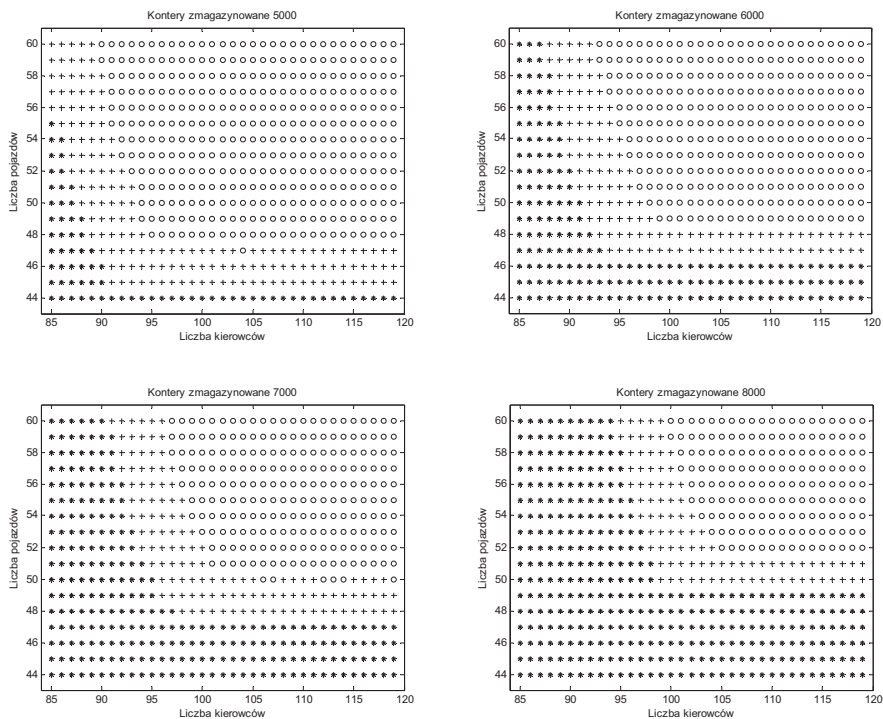
5. ANALIZA PRZYKŁADOWEGO SYSTEMU

Analizie został poddany przykładowy system transportu dyskretnego wzorowany na regionalnym centrum dystrybucji przesyłek Poczty Polskiej we Wrocławiu. W skład systemu wchodzi węzeł centralny zlokalizowany w Stolicy Dolnego Śląska i 22 węzły podrzędne umieszczone w miastach południowo-zachodniej Polski. Dystanse między węzłami są rzeczywistymi odległościami wziętymi z mapy drogowej. Intensywność generacji kontenerów do wszystkich punktów docelowych wynosi 4,16 na godzinę, co daje 4400 kontenerów do przewozu każdego dnia. Prędkość pojazdów jest modelowana rozkładem Gaussa ze średnią wartością 50 km/h i odchyleniem standardowym równym 5 km/h. Średni czas załadunku to 5 min. Rozpatrywane są dwa typy pojazdów – o pojemnościach odpowiednio 10 i 15 kontenerów. Średni czas do uszkodzenia pojazdów (MTF) wynosi 20000. Średni czas naprawy: 5 h – także opisany rozkładem Gaussa. Modelowaniu podlega także dostępność kierowców – poprzez prawdopodobieństwo wystąpienia trzech typów niezdolności do pracy: krótka – 0,003; typowa – 0,001; długa – 0,00025. Testy wykonane są dla wartości progowych $\alpha = 0,95$; $\theta = 0,75$ i okresu $\Delta t = 2$ dni.

Liczba dostępnych kierowców wybieramy ze zbioru $n_k \in (85, 120)$, liczba pojazdów $n_p \in (40, 60)$ i liczba zmagazynowanych kontenerów $n_{zk} \in (5000, 8000)$ (Rys. 1).

5.1. WYNIKI

Wyniki analizy przykładowego systemu transportu dyskretnego (Rys. 1.) mogą być z powodzeniem użyte jako wskaźnik właściwej decyzji menedżera. Jeśli dzień pracy systemu kończy się – jako wypadkowa liczby sprawnych pojazdów, dostępnych kierowców oraz zmagazynowanych kontenerów – w grupie stanów krytycznych – znakowanych ‘+’ (Rys. 1.) – to mamy jednoznaczny sygnał alarmowy dla kadry zarządzającej. Sygnał ten mówi, że w przeciągu kilku najbliższych dni skuteczność funkcjonowania systemu spadnie poniżej założonych progów akceptowalności. Prawidłowa reakcja powinna polegać na zwiększeniu zasobów systemu – liczby pojazdów i/lub kierowców [6].



Rys. 1. Stany zdadności systemu w funkcji liczby kierowców, liczby pojazdów, liczby kontenerów: ‘o’ – system zdadny, ‘*’ – system niezadny, ‘+’ – system w stanie krytycznym

6. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano formalny model systemu transportu dyskretnego obejmujący aspekty niezawodnościowe, funkcjonalne oraz czynnik ludzki.

Zdefiniowano miarę jakości funkcjonowania tegoż systemu i na jej podstawie wyznaczono stany jego zdatności ze szczególnym uwzględnieniem stanów krytycznych. Miara stała się także podstawowym czynnikiem krótkoterminowej predykcji zachowania się systemu i możliwości podjęcia stosownych środków zaradczych by jakość jego działania nie znalazła się poniżej akceptowalnego poziomu. Tym samym zaproponowane podejście pozwala ocenić wpływ lokalnych zmian w systemie na jego globalne zachowanie, oszacować nowy punkt pracy systemu po wzroście lub redukcji jego obciążenia zadaniami przewozowymi i precyzyjnie wykrywać słabe punkty jego bieżącej konfiguracji.

Artykuł powstał w ramach Projektu Badawczego Narodowego Centrum Nauki Nr N N509 496238 realizowanego w latach 2010 – 2013.

Bibliografia

1. Aven T., Jensen U.: *Stochastic Models in Reliability*. Springer, New York 1999.
2. Barlow R., Proschan F.: *Mathematical Theory of Reliability*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia 1996.
3. Bouchon S.: *The Vulnerability of interdependent Critical Infrastructures Systems: Epistemological and Conceptual State-of-the-Art*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission 2006.
4. Burt, C.N., Caccetta, L.: Match Factor for Heterogeneous Truck and Loader Fleets, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 21, 2007, s. 262-270.
5. Fishman G.: *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer-Verlag 1996.
6. Mazurkiewicz J., Walkowiak T.: Analysis of Critical Situation Sets in Discrete Transport Systems. *RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION RelStat'12*. Transport and Telecommunication Institute, Riga, Latvia, October, 17 – 20, 2012, s. 354-361.
7. Michalska K., Mazurkiewicz J.: Functional and Dependability Approach to Transport Services Using Modelling Language. *LNAI 6923*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s. 180-190.
8. Susan S.: *Critical Critical Systems. Formal Aspects of Security*. Lecture Notes in Computer Science Volume 2629, 2003, s. 62-70.
9. Walkowiak, T., Mazurkiewicz, J.: Algorithmic Approach to Vehicle Dispatching in Discrete Transport Systems. Technical approach to dependability. *Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2010*, s. 173-188.
10. Walkowiak, T., Mazurkiewicz, J.: Analysis of Critical Situations in Discrete Transport Systems. *International Conference on Dependability of Computer Systems*, Brunow, Poland, June 30-July 2, 2009. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press 2009, s. 364-371.
11. Walkowiak, T., Mazurkiewicz, J. Functional Availability Analysis of Discrete Transport System Simulated by SSF Tool, *International Journal of Critical Computer-Based Systems*, 1 (1-3), 2010, s. 255-266.
12. Walkowiak, T., Mazurkiewicz, J. Soft Computing Approach to Discrete Transport System Management. *LNAI 6114*. Springer-Verlag 2010, s. 675-682.

DISCRETE TRANSPORTATION SYSTEMS EFFICIENCY ANALYSIS USING CRITICAL STATES DETECTION

Summary: The paper presents the analysis of discrete transportation systems efficiency. The formal model of the transportation system is presented. It takes into consideration functional and reliability aspects. Monte Carlo simulation is used for estimating the system quality metric. The quality of the system is assessed in three levels, as: operational, critical and failed. The proposed solution allows to predict the system quality within the short time horizon. The paper includes numerical results for real mail distribution system.

Keywords: discrete transport system, critical state, Monte Carlo simulation