

REALIZACJA PROCESÓW W TRANSPORCIE KOLEJOWYM Z WYKORZYSTANIEM TEORII KOLEJKOWEJ

Streszczenie

W artykule omówiony został problem wykorzystania teorii kolejek do badania i oceny działania transportu kolejowego. Zaprezentowano obszary modelowania procesów w transporcie kolejowym do badania których wykorzystana została teoria kolejkowa. Omówiono wykorzystanie metody sieci faz procesu w badaniu płynności ruchu na linii kolejowej. W artykule przeprowadzono badania płynności ruchu na dwóch szlakach: Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy oraz Warszawa Włochy – Pruszków dla kierunku zasadniczego – tory dedykowane dla ruchu pasażerskiego podmiejskiego. Badania przeprowadzono dla dwóch wariantów: wariantu gdy urządzenia samoczynnej blokady liniowej na obu szlakach są sprawne oraz gdy na pierwszym szlaku uległy uszkodzeniu. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem aplikacji Java Modelling Tools – JSIMgraph.

WSTĘP

Modelowanie procesów transportowych ma na celu budowę modelu procesu, który pozwoli na badanie zachowania się systemu transportowego w czasie, zarówno w bieżących warunkach eksploatacyjnych, oraz podczas prac projektowych. Z fizyczną realizacją procesów transportowych przemieszczania osób lub ładunków związane są takie elementy systemu jak: sieć drogowa, kolejowa, lotnicza, i inne, tabor pojazdów (samochody, autobusy, pociągi, samoloty), stacje obsługi ruchu towarowego oraz stacje i przystanki osobowe, jak również urządzenia zabezpieczenia ruchu (znaki drogowe, sygnalizacja świetlna) wraz z przepisami bezpieczeństwa i kontroli ruchu oraz tzw. „załoga systemu” [10]. Uwzględniając powyższe pod uwagę, problematyka modelowania procesów transportowych dotyczy zarówno aspektów technicznych, techniczno-technologicznych jak i organizacyjnych. W każdym z wymienionych obszarów występują problemy decyzyjne obejmujące szerokie spectrum czynników, które należy uwzględnić przy wyborze sposobu (technologii) realizacji procesu przemieszczania jednostek ruchu w systemie transportowym.

Niniejsza artykuł dotyczy modelowania procesów transportowych z wykorzystaniem prostych systemów masowej obsługi, a następnie oceny przebiegu procesu w badanym systemie. W konsekwencji opracowana metodologia pozwala na badanie związków między wyposażeniem systemu, wielkością realizowanych zadań oraz sposobem realizacji procesu przemieszczania.

Na podstawie analizy literatury przedmiotu problematykę modelowania procesów transportowych można podzielić na obszary dotyczące [2], [7], [9], [8], [14], [15], [19]:

- analizy i oceny technologii pracy stacji rozrządowej, pracy stacji postojowej oraz badania płynności ruchu pociągów na liniach kolejowych, w tym określania kolejności przejazdu pociągów (wykorzystanie mijanek, stacji itd.) na linii, określania liczby torów na linii w funkcji ruchu pociągów oraz sterowania ruchem z uwzględnieniem prędkości, priorytetów, stanu technicznego infrastruktury i rozkładów jazdy.
- analizy i oceny obsługi ładunków bądź pasażerów w wielu obiektach infrastrukturalnych systemu transportowego, np. obiektach magazynowych, terminalach przeładunkowych różnych gałęziach transportu, portach morskich, portach lotniczych, centrach handlowych, itp.,

- analizy dobowego rozkładu podróży ludzi (zarówno kierowców jak i pasażerów) wynikającego z dobowego rytmu pracy ludzi, podróży do i z pracy lub szkoły (badanie dostosowania wyposażenia infrastruktury do zadań wynikające z rozłożenia potoku ruchu). Zmiany natężenia potoku pasażerów prowadzą do powstawania kolejek oraz związanego z nimi zjawiska kongestii,
- badania zależności wydajności procesów transportowych od parametrów infrastruktury liniowej, i punktowej, a tym samym od inwestycji w modernizację i rozbudowę. Elementy infrastruktury charakteryzują się określoną wydajnością. Przekraczanie tej zdolności w warunkach zmiennego natężenia potoku ruchu prowadzi do powstawania kolejek, np. stacje obsługi pojazdów, centra dystrybucyjne, centra handlowe, itp.
- badania zależności płynności ruchu od prędkości, gęstości ruchu i parametrów drogi,
- analizy i oceny sterowania centralnego przy jednoczesnym sterowaniu przepustowością elementów infrastruktury.

Do badania procesów transportowych wykorzystuje się różne narzędzia, np. metody stochastyczne, programowanie dynamiczne czy teorię masowej obsługi. Szerokie zastosowanie w badaniach i analizie systemów oraz zachodzących w nich procesów ma teoria masowej obsługi. Jak wynika przeglądu literatury do analizy i oceny przebiegu procesu w różnych obszarach transportu, teoria masowej obsługi była stosowana już w latach 50, [4], [20], [27], [28], [31].

1. ZASTOSOWANIE TEORII KOLEJKOWEJ DO BADANIA PROCESÓW W TRANSPORCIE

1.1. Obszary zastosowania teorii kolejek w transporcie

Jedną z podstawowych metod badania procesu transportu jest teoria masowej obsługi zwana też teorią kolejek. Teoria kolejek bada procesy, w których z jednej strony powstaje zapotrzebowanie na wykonanie pewnych prac (usług), a z drugiej strony – konieczność ich zaspokojenia. Wyznaczenie charakterystyk systemów masowej obsługi wymaga znajomości ich rodzaju oraz typów rozkładów zgłoszeń i typów rozkładów czasów. Teoria kolejek pozwala na ocenę możliwości zachowania się systemu transportowego w przyszłości. Co istotne, występuje podobieństwo między siecią systemów masowej obsługi a siecią transportową.

Podejście teorii kolejek stosuje się przy projektowaniu nowych systemów, gdy chcemy ustalić parametry projektowanego systemu tak, aby jak najlepiej zaspokoił popyt przyszłych klientów uwzględ-

niając jednocześnie interesy zarządzającego systemem. Jednakże same straty czasu nie zawsze są jedynym, ani też rozstrzygającym kryterium oceny jakości systemu kolejowego [5], [6], [11], [24].

W zagadnieniach transportowych teoria kolejek wykorzystywana jest w:

- projektowaniu i organizacji elementów punktowych infrastruktury transportowej (magazyny, terminale) [29], [30],
 - organizacji i sterowaniu procesami logistyczno-transportowymi w elementach punktowych infrastruktury: sterowanie przepływem pojazdów, kolejnością wykonywania operacji, określenia liczby środków pracy itd. [12], [13], [17].
- Ponadto metodyka ta jest stosowana w badaniach:
- inżynierii ruchu kolejowego, (np. do planowania: ruchu pociągów na linii jednotorowej, obsługi składów pasażerskich na stacji postojowej, zestawiania składów na stacji rozrządowej [15], [16], [14], [37], [35], [38]),
 - wyznaczania liczby pojazdów niezbędnych do obsługi określonego regionu w warunkach zmiennego zapotrzebowania na transport [22], [23], [26],
 - optymalizacji częstości kursowania pojazdów w zależności od ich typu na określonej trasie z uwzględnieniem kosztu i jakości realizacji usługi, [21], [22],
 - wyznaczania długości składowych cyklu sygnalizacji świetlnej [3], [20],
 - oceny zmiany parametrów infrastruktury transportowej (np. liczby pasów ruchu lub parametrów geometrycznych drogi) na opóźnienia i kongestię powstające w godzinach szczytu oraz wskutek wypadków i zdarzeń drogowych w elementach infrastruktury liniowej transportu [4], [18], [28], itp.

1.2. Wykorzystanie teorii kolejek w transporcie kolejowym

Jednym z ważnych obszarów modelowania procesów transportowych jest transport kolejowy, a zwłaszcza zagadnienia dotyczące analizy i oceny technologii pracy stacji rozrządowej, pracy stacji postojowej oraz badania płynności ruchu pociągów na liniach kolejowych. W pozycjach literaturowych, na ogół, do opisu badań stosują teorię masowej obsługi.

Zastosowanie teorii masowej obsługi w inżynierii ruchu kolejowego, do analizy technologii pracy stacji rozrządowej, ruchu pociągów na linii czy do badania płynności ruchu pociągów na liniach kolejowych można znaleźć w pracach J. Leszczyńskiego [15], [16], [14] oraz w pracach J. Wocha [37], [38], [35], [38], [34], [33], [36]. J. Leszczyński w pracy [15] zdefiniował pojęcie sieci faz procesu i przedstawił możliwości zastosowania tego podejścia do planowania ruchu pociągów na linii jednotorowej, planowania obsługi składów pasażerskich na stacji postojowej czy planowania zestawiania składów na stacji rozrządowej. W przypadku planowania obsługi składów pasażerskich na stacji postojowej czy planowania zestawiania składów na stacji rozrządowej, Autor [15] modelował każdą grupę torów (miejsce obsługi) jako prosty system masowej obsługi, w którym skład pociągu może oczekiwać w poczekalni na obsługę a następnie być obsługiwany na stanowisku obsługi.

W modelu odcinka linii kolejowej przedstawionym w pracy [16] odwzorowane zostały elementy punktowe infrastruktury (stacji kolejowych). Dowolną stację kolejową przedstawiono jako system masowej obsługi składający się z trzech podsystemów: wjazdu na stację, obsługi na stacji i wyjazdu ze stacji. W analizowanych pracach wskazuje się na możliwości zastosowania sieci faz procesu do rozwiązywania problemów inżynierii ruchu kolejowego.

Podobnie J. Woch do modelowania procesów w transporcie kolejowym wykorzystywał również teorię masowej obsługi. W pracy [38] uzupełnił dotychczasowe modele teorii masowej obsługi o symulację komputerową zajętości węzłów torowych. Natomiast w

pracy [35] zaproponował zastosowanie modeli ruchomych buforów oraz największej oczekiwanej płynności ruchu. Używając modelu ruchomego bufora oraz modelu największej oczekiwanej płynności ruchu, Woch [35], przeprowadził analizy porównawcze dla różnych modeli przepustowości. Założono, że strumienie zgłoszeń w procesach transportowych mają charakter rozkładu Poissona aczkolwiek Węgierski [32] i Woch [38] w inżynierii ruchu kolejowego stosowali różne rozkłady.

Modele kolejkowe J. Woch [33], [36] wykorzystywał do formalnego opisu modelu regulacji konstruktora na wykresie ruchu. Według Autora model może być stosowany do przewidywania wielkości regulacji dla ustalonego odstępów szlakowego. Odstęp traktowany jest jako jednokanałowy system masowej obsługi z odpowiednio niskim strumieniem zgłoszeń pociągów. Końcowy odcinek odstępów - między tarczą ostrzegawczą przed semaforem wjazdowym, a semaforem wjazdowym traktowany był jako poczekalnia, stanowiskiem obsługi zaś był sam teren stacji.

2. SIĘĆ FAZ PROCESU W BADANIU PŁYNNOCI RUCHU NA LINII KOLEJOWEJ

Celem badań systemu transportowego analizowanego w artykule jest ustalenie związków między zadaniami systemu, jego wyposażeniem oraz organizacją. Ponieważ stan systemu zmienia się w czasie zatem w budowanym modelu procesu transportowego należy odwzorować te właściwości elementów systemu transportowego, które pozwolą na badanie przebiegu zmian zachodzących w systemie, tj. umożliwią odwzorowanie przebiegu zmian (trajektorii) stanów systemu dla różnych sytuacji decyzyjnych.

Zakładamy, że stan systemu transportowego rozumiany jest jako stan elementów infrastruktury oraz stan pojazdów. Zatem składowymi stanami systemu transportowego są stany pojedynczych elementów infrastruktury oraz stany pojedynczych pojazdów. Jedną z metod dedykowanych analizie procesów transportowych jest zapisanie modelu procesu transportowego w postaci sieci faz procesu (Leszczyński, Ambroziak-Jacyna, Żak). Model procesu transportowego w postaci sieci faz charakteryzuje się następującymi elementami:

- **strukturą sieci faz** przedstawiająca powiązania między zdarzeniami definiowanymi jako chwile zmiany stanu systemu transportowego, w postaci grafu $GFSP = \langle V, L^V \rangle$. Graf $GFSP$ sieci faz procesu stanowi transformację grafu G struktury sieci transportowej polegającą na zamianie luków na wierzchołki grafu $GFSP$. Oznacza to, że zbiór V wierzchołków grafu $GFSP$, jest sumą dwóch zbiorów, zbioru W wierzchołków grafu G oraz zbioru wierzchołków, utworzonych z luków grafu G , oznaczonych przez W' : V - zbiór węzłów sieci faz procesu (węzłów i luków sieci transportowej), L^V - zbiór luków sieci faz procesu (zdarzeń sieci faz),
- charakterystyką elementów struktury sieci faz przedstawiającej ich rzeczywiste właściwości, w tym rozkłady zmiennych losowych: czasu obsługi na poszczególnych stanowiskach dla różnych klas pojazdów, czasu przejazdu pomiędzy kolejnymi stanowiskami obsługi,
- wielkością strumienia zgłoszeń pojazdów na wejściu do sieci faz: rozkłady zmiennej losowej odstępów czasu między kolejnymi zgłoszeniami pojazdów do stacji obsługi pojazdów (sieci faz procesu),
- sterowaniem rozumianym jako sposób przeprowadzenia jednostek ruchu przez sieć faz od wejścia do wyjścia.

Uwzględniając powyższe należy zauważyć, że w analizowanym przypadku tj. doboru wyposażenia dla stacji obsługi oceny parametrów systemu transportowego z zastosowaniem modeli sieci

faz procesów transportowych należy zastosować następujące kryteria:

- minimalizacji długości kolejek,
- maksymalizacji liczby pojazdów obsługiwanych na danym stanowisku obsługi,
- kryterium minimalizacji straty czasu pojazdów wynikającego z występowania kongestii.

3. RUCH POCIĄGÓW NA LINII KOLEJOWEJ JAKO SIĘĆ FAZ PROCESU

Jak wcześniej wspomniano, jednym z zastosowań teorii kolejowej w inżynierii transportu kolejowego jest badanie płynności ruchu pociągów na liniach kolejowych. W artykule przeprowadzono badania płynności ruchu na dwóch szlakach:

- szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odcinek linii 447 Warszawa Zachodnia – Grodzisk Mazowiecki,
- szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odcinek linii 447 Warszawa Zachodnia – Grodzisk Mazowiecki,

dla kierunku zasadniczego – tory dedykowane dla ruchu pasażerskiego podmiejskiego. Schemat analizowanych odcinków przedstawiono na rys. 1.

Charakterystykę poszczególnych szlaków przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z zasadami prowadzenia ruchu kolejowego [25] na szlaku może znajdować się tylko jeden pociąg. Wszystkie analizowane szlaki wyposażone są w liniowe urządzenia sterowania ruchem kolejowym w postaci samoczynnej blokady liniowej. W związku z tym szlak podzielony jest na kilka odstępów. Na każdym odśpięciu można znajdować się jeden pociąg. Dzięki temu na szlaku zamiast jednego pociągu może znajdować się ich kilka. Ze względu na prowadzenie intensywnych prac modernizacyjnych urządzenia samoczynnej blokady liniowej często się psują. W takim przypadku wprowadza się telefoniczne zapowiadanie pociągów i na szlaku ponownie może znajdować się tylko jeden pociąg.

Tab. 1. Charakterystyka analizowanych szlaków

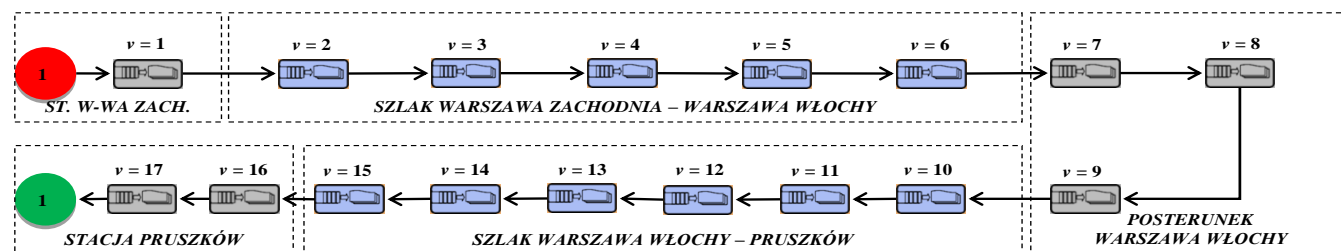
Parametr	Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy	Szlak Warszawa Włochy – Pruszków
Długość szlaku [km]	3,722 km	9,087 km
Średni czas przejazdu pociągu typowego dla szlaku [min]	6 min	11 min* *czas uwzględnia postoje na przystankach: Warszawa Ursus, Warszawa Ursus, Warszawa Niedźwiadek i Piastów
Typ liniowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym	Samoczynna blokada liniowa (podział szlaku na odstępy)	Samoczynna blokada liniowa (podział szlaku na odstępy)
Liczba odstępów	5	6
Średnia długość 1 odśpięciu [m]	744 m	1515 m
Średni czas przejazdu 1 odśpięciu [min]	1,2 min	1,83 min
Liczba torów na stacji początkowej	5	1
Liczba torów na stacji końcowej	1	2

W niniejszym artykule przeprowadzone zostały badania płynności ruchu dla dwóch wariantów:

- WARIANT 0: urządzenia blokady liniowej są sprawne,
 - WARIANT 1: awaria urządzeń blokady na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,
- Elementami modelu dla wariantu 0 są:
- źródło pociągów:
 - $a = 1$ – odwzorowujące pociągi kursujące w relacji Warszawa Zachodnia – Pruszków – o rozkładzie zgłoszeń λ - stacje obsługi – elementy sieci faz procesu:
 - $v = 1$ – wyjazd ze stacji Warszawa Zachodnia,
 - $v = 2$ – 1 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,
 - $v = 3$ – 2 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,
 - $v = 4$ – 3 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,
 - $v = 5$ – 4 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,



Rys. 1. Schemat analizowanych odcinków linii kolejowych



Rys. 2. Model linii kolejowej w postaci sieci faz procesów dla wariantu 0

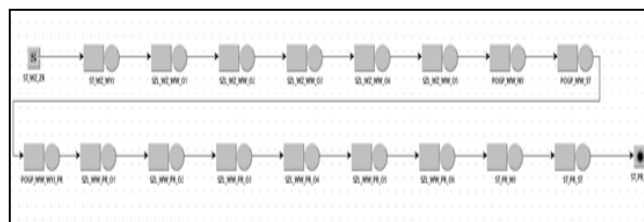
- $v = 6$ – 5 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy,
- $v = 7$ – wjazd na posterunek odgałęźny Warszawa Włochy,
- $v = 8$ – posterunek odgałęźny Warszawa Włochy,
- $v = 9$ – wyjazd z posterunku odgałęźnego Warszawa Włochy w kierunku Pruszków,
- $v = 10$ – 1 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 11$ – 2 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 12$ – 3 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 13$ – 4 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 14$ – 5 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 15$ – 6 odstęp samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Włochy – Pruszków,
- $v = 16$ – wjazd na stację Pruszków,
- $v = 17$ – stacja Pruszków,
- ujęcie pociągów:
 - $b = 1$ – ujęcie Pruszków – odwzorujące wyjście strumieni pociągów z systemu,

Na rys. 2 przedstawiono model linii kolejowej w postaci sieci faz procesów dla wariantu 0.

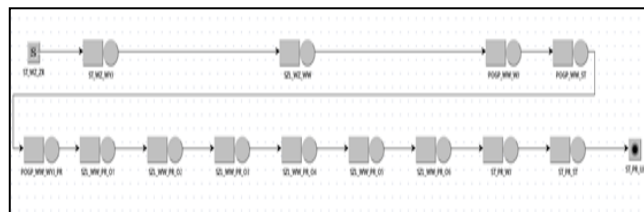
Model dla wariantu 1 przedstawiono na rys. 3. W wariacie tym założono, że na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy uszkodzeniu uległy urządzenia samoczynnej blokady liniowej. W związku z tym podział na odstępy ulega likwidacji – na całym szlaku w jednej chwili może znajdować się tylko jeden pociąg. Na rysunku przedstawione zostanie nowe stanowisko obsługi $v = 18$ – szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy.

4. BADANIA SYMULACYJNE RUCHU POCIĄGÓW NA LINII KOLEJOWEJ Z WYKORZYSTANIEM PAKIETU KOMPUTEROWEGO

Badania symulacyjne płynności ruchu pociągów na analizowanej linii kolejowej zostało przeprowadzone z wykorzystaniem aplikacji Java Modelling Tools – JSIMgraph w dwóch etapach: najpierw wykonano badania dla wariantu 0 (sytuacja istniejąca), a następnie dla wariantu 1 (sytuacja istniejąca po wystąpieniu awarii urządzeń samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono modele linii kolejowych w postaci sieci faz procesów dla wariantów odpowiednio 0 i 1 stosując aplikację Java Modelling Tools.



Rys. 4. Model linii kolejowej w postaci sieci faz procesów dla wariantu 0 w aplikacji Java Modelling Tools

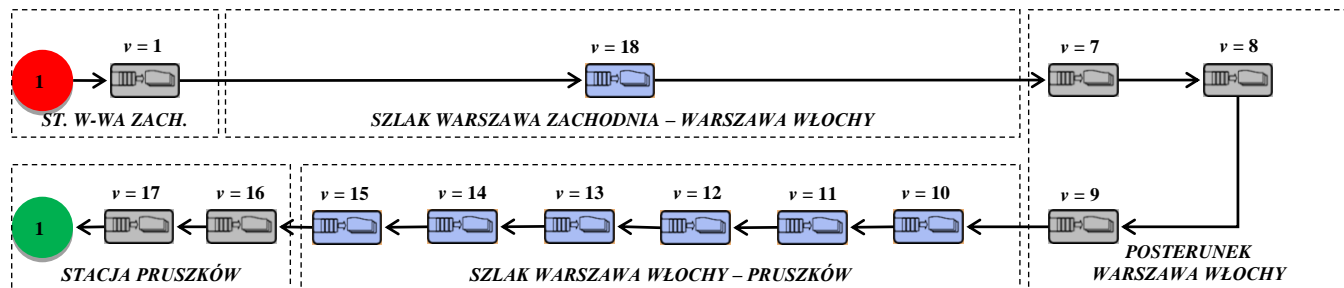


Rys. 5. Model linii kolejowej w postaci sieci faz procesów dla wariantu 1 w aplikacji Java Modelling Tools

Wprowadzony do programu model został odpowiednio sparаметryzowany. Wartości poszczególnych parametrów przedstawiono w tabeli 2. Ze Względu na specyfikę ruchu kolejowego wszystkie elementy modelu zostały opisane rozkładem normalnym.

Tab. 2. Parametry modelu linii kolejowej opracowanego z wykorzystaniem modelu sieci faz procesu

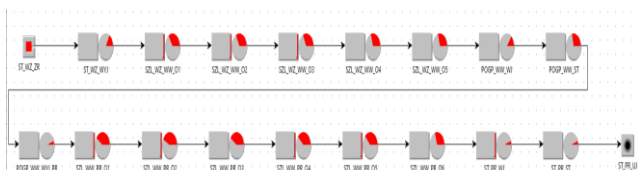
Element modelu	Rozkład zgłoszeń	Pojemność poczekalni	Regulamin kolejki	Liczba stanowisk obsługi	Rozkład czasu obsługi
WARIANT 0					
ST_WZ_ZR – Stacja Warszawa Zachodnia – źródło	norm(180,60)	–	–	–	–
ST_WZ_WYJ – Stacja Warszawa Zachodnia – wyjazd	–	5	FIFO	1	norm(30,10)
SZL_WZ_WW_O1 – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odstęp 1	–	1	FIFO	1	norm(60,30)
SZL_WZ_WW_O2 – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odstęp 2	–	1	FIFO	1	norm(60,30)
SZL_WZ_WW_O3 – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odstęp 3	–	1	FIFO	1	norm(60,30)



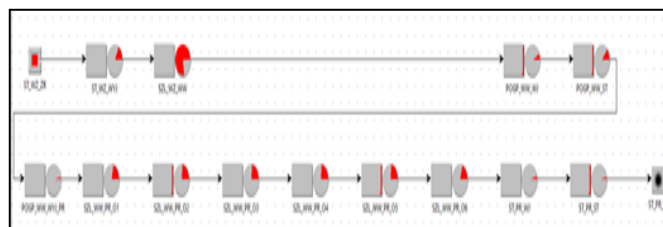
Rys. 3. Model linii kolejowej w postaci sieci faz procesów dla wariantu 1

Element modelu	Rozkład zgłoszeń	Pojemność poczekalni	Regulamin kolejki	Liczba stanowisk obsługi	Rozkład czasu obsługi
SZL_WZ_WW_O4 – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odstęp 4	–	1	FIFO	1	norm(60,30)
SZL_WZ_WW_O5 – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy – odstęp 5	–	1	FIFO	1	norm(60,30)
POGP_WW_WJ – Posterunek Warszawa Włochy – wjazd	–	1	FIFO	1	norm(30,15)
POGP_WW_ST – Posterunek Warszawa Włochy – postój	–	1	FIFO	1	norm(60,30)
POGP_WW_WYJ_PR – Posterunek Warszawa Włochy – wyjazd	–	1	FIFO	1	norm(12,6)
SZL_WW_PR_O1 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 1	–	1	FIFO	1	norm(98,30)
SZL_WW_PR_O2 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 2	–	1	FIFO	1	norm(110,30)
SZL_WW_PR_O3 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 3	–	1	FIFO	1	norm(110,30)
SZL_WW_PR_O4 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 4	–	1	FIFO	1	norm(110,30)
SZL_WW_PR_O5 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 5	–	1	FIFO	1	norm(110,30)
SZL_WW_PR_O6 – Szlak Warszawa Włochy – Pruszków – odstęp 6	–	1	FIFO	1	norm(110,30)
ST_PR_WJ – Stacja Pruszków – wjazd	–	1	FIFO	1	norm(18,6)
ST_PR_WJ – Stacja Pruszków – stacja	–	1	FIFO	2	norm(60,30)
ST_PR_UJ – Stacja Pruszków – ujście	–	–	–	–	–
WARIANT 1					
SZL_WZ_WW – Szlak Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy	–	1	FIFO	1	norm(360,60)

Wyniki przeprowadzonej symulacji przedstawiono na rys. 6 dla wariantu 0 i na rys. 7 dla wariantu 1. Szczegółowe wyniki przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 6. Wyniki symulacji dla wariantu 0



Rys. 7. Wyniki symulacji dla wariantu 1

Tab. 3. Wyniki symulacji

Element modelu	Średnia liczba pociągów		Długość czasu kolejki		Średnia liczba pociągów w systemie	
	Wariant 0	Wariant 1	Wariant 0	Wariant 1	Wariant 0	Wariant 1
ST_WZ_WYJ	0,167	0,167	0,0	0,074	4,834	2,689
SZL_WZ_WW_O1	0,341	0,782	0,0	0,0		
SZL_WZ_WW_O2	0,336		0,0			
SZL_WZ_WW_O3	0,324		0,0			
SZL_WZ_WW_O4	0,311		0,0			
SZL_WZ_WW_O5	0,301		0,0			
POGP_WW_WJ	0,149	0,067	0,0	0,0		
POGP_WW_ST	0,288	0,134	0,0	0,0		
POGP_WW_WYJ_PR	0,057	0,027	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O1	0,411	0,213	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O2	0,427	0,239	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O3	0,404	0,238	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O4	0,389	0,238	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O5	0,373	0,237	0,0	0,0		
SZL_WW_PR_O6	0,307	0,199	0,0	0,0		
ST_PR_WJ	0,060	0,039	0,0	0,0		
ST_PR_WJ	0,204	0,133	0,0	0,0		

PODSUMOWANIE

Teoria kolejek posiada szerokie zastosowanie do badania procesów zachodzących w transporcie. Szczególnym obszarem zastosowania transportu jest badanie rzeczywistych procesów, w których występują przestoje, oczekiwanie, kolejki i straty. Takie procesy występują w ruchu kolejowym w przypadku wystąpienia utrudnień. Organizacja ruchu kolejowego przygotowana przez zarządcę infrastruktury zakłada, że występuje stan idealny – wszystkie procesy realizowane są zgodnie z uprzednio przygotowanym planem. Jednak w życiu mogą wystąpić różne sytuacje, które mogą wywołać zakłócenia – np. awaria urządzeń. Z wykorzystaniem teorii kolejek można przewidzieć skutki wystąpienia takich zdarzeń.

W artykule przeprowadzono badania płynności ruchu na liniach kolejowych w zakresie wystąpienia awarii urządzeń samoczynnej blokady liniowej. W wariacie zerowym przedstawiono sytuację istniejącą – gdy wszystkie urządzenia są sprawne i nie występują utrudnienia w ruchu. Badania wykazały, że ruch na linii jest dostatecznie płynny. Średnia liczba pociągów obsługiwanych na poszczególnych stanowiskach nie przekracza 0,5, nie występują kolejki, a średnia liczba pociągów obsługiwanych w jednym momencie w systemie to blisko 4,85.

W wariacie pierwszym założono, że ulegną uszkodzeniu urządzenia samoczynnej blokady liniowej na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy. Awaria ta spowodowała, że na wyjeździe ze stacji Warszawa Zachodnia pojawiła się kolejka pociągów oczekujących na wjazd na szlak. Zaburza to płynność ruchu kolejowego, gdyż wzrasta zajętość peronów na stacji Warszawa Zachodnia, a skutki powstania tej kolejki na pierwszej stacji przenoszą się na pozostałe. Mogą także wystąpić opóźnienia wtórne. Wysoką wartość osiągnęła średnia liczba pociągów na szlaku Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy, która została wygenerowa-

na poprzez likwidację odstępów samoczynnej blokady liniowej. Zmniejszyła się średnia liczba pociągów obsługiwanych w jednym momencie w systemie do 2,7.

BIBLIOGRAFIA

- Ambroziak T., Jacyna M.: Queueing theory approach to transport processes dynamics. Part I. Dynamics of transport network connections, Archives of Transport, vol. 14, iss 4, Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa 2002
- Ambroziak T., Jacyna M.: Wybrane aspekty modelowania dynamiki procesów transportowych, Prace Naukowe PW, TRANSPORT, z. 53, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- Cheng T. E. C., Allam S. (1992). A review of stochastic modelling of delay and capacity at unsignalized interjections. European Journal of Operations Research, 60.
- Edie L. C., Foote R. S. (1958). Traffic flow in tunnels. Proceedings of the Highway Research Board, 37.
- Filipowicz B Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych. Analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1996
- Gniedenko B.W., Kowalenko I. N.: Wstęp do teorii obsługi masowej, PWN Warszawa 1971
- Han, S. : Dynamic traffic modelling and dynamic stochastic user equilibrium assignment for general road networks, Transportation Research 37B.
- Jacyna I., Żak J.: Selected aspects of the optimalization the structure of logistic system. Proceedings of 21st International Conference on System Engineering 16-18 august 2011 Las Vegas, Nevada USA. IEEE Komputer Society Order Number P4495, BMS Part Number: CFP11369-PRT
- Jacyna M., Żak J.: Zastosowanie teorii kolejek do analizy i oceny procesu transportowego w centrum logistycznym, Logistyka 4/2012, str. 275-284
- Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- Klimow G.P.: Procesy obsługi masowej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1979
- Kłodawski M., Jacyna M.: Selected aspects of research on order picking productivity in aspect of congestion problems, ICIL 2012, International Conference on Industrial Logistics 2012, Zadar, Croatia, 15th June 2012, Conference Proceedings, 2012
- Kłodawski M., Żak J.: Order picking area layout and its impact on efficiency of order picking process, Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 1, No. 1, March 2013, 41-46, Engineering and Technology Publishing, 2013
- Leszczyński J.: Modelowanie symulacyjne w transporcie kolejowym. WKiŁ, Warszawa 1973.
- Leszczyński J.: Modelowanie systemów i procesów transportowych, OWPW, Warszawa 1994
- Leszczyński J.: Optymalne decyzje w procesach transportowych, WKiŁ, Warszawa 1981.
- Lewczuk K., Żak J., Supportive Role of Dynamic Order Picking Area in Distribution Warehouse, Journal of Traffic and Logistics Engineering. Vol. 1, No. 1, March 2013.
- Lighthill M. J.,Whitham G B. (1955). On kinematic waves, II, a theory of traffic flow on long straight crowded roads. Proceedings of the Royal Society, London, Series A229.
- Michłowicz E.: Badania symulacyjne zintegrowanego systemu transportowo-produkcyjnego walcowni zimnej blach, Hutnik, Wiadomości Hutnicze; ISSN 1230-3534, nr 9 Wydawnictwo SIGMA-NOT, Katowice 1999
- Miller A. J. (1963). Settings for fixed-cycle traffic signals. Operational Research Quarterly,14
- Newell G. F. (1965). Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light. SIAM Review, 2
- Newell G. F. (1993). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Parts I-III Transportation Research, 27B.
- Newell, G.F. (1971, 1982). Applications of Queueing Theory, Chapman and Hall, London.
- Obretenow A.,Dmitrow B.: Teoria masowej obsługi, PWN, Warszawa 1989
- PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1. Warszawa 2015.
- Pyza D., Modelowanie systemów przewozowych w zastosowaniu do projektowania obsługi transportowej podmiotów gospodarczych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z.85, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- Vickrey W.: Congestion theory and transport investment. American Economic Review, 59. 1969
- Wardrop J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers II. 1.
- Wasiak M.: Modelowanie przepływu ładunków w zastosowaniu do wyznaczania potencjału systemów logistycznych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z.79, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
- Wasiak M.: Odwzorowanie obiektu logistycznego jako systemu masowej obsługi. Logistyka 6/2006.
- Webster F. V. (1958). Traffic signal settings, Road Research Laboratory Technical Paper, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Węgiński J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. WKiŁ, Warszawa 1971
- Woch J. Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej: (System Oceny Układów Torowych - SOUT - opis podstawowego oprogramowania). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice, 2001.
- Woch J. Podstawy inżynierii ruchu kolejowego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1983.
- Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Wydawnictwo Szumacher, Kielce, 1998.
- Woch J.: Teoria potoków ruchu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice, 2001.
- Woch, J.: Complex railway junctions capacities and railway network effectiveness. Archives of Transport,13-3, 2001.
- Woch, J.: Ogólne ujęcie zagadnień przepustowości jako problemu wymiarowania układów kolejowych (w): Informatyka w planowaniu technicznym przewozów kolejowych (praca zbiorowa pod redakcją A. Truskolaskiego i J. Węgińskiego). WKiŁ Warszawa 1977.
- Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz. Warszawa, 2013 r.

IMPLEMENTATION OF THE PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT USING QUEUEING THEORY

Abstract

In the article we discussed a problem of using the queueing theory for the examination and evaluation of the railway transport problems. We presented the areas of railway transport processes modelling for the examination of which a queue theory was used. We discussed using phases of the network method in the examination of fluidity of movement on the railway line. In the article we carried out examinations of fluidity of movement on two open lines: Warszawa Zachodnia – Warszawa Włochy and Warszawa Włochy – Pruszków for fundamental direction - tracks dedicated for suburban passenger traffic. The research was conducted for two variants: variant when control command and signalling line equipment on both open lines are effective and when on the first open line has been damaged. The research was conducted using Java Modelling Tools – JSIMgraph.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Marianna Jacyna** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.

dr hab. **Jolanta Żak** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.

mgr inż. **Piotr Gołębiowski** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.