

Jerzy MIKULSKI

Marek STOMSKI

#### SYMULACJA RUCHU W SIECI SZYBKICH TRAMWAJÓW

Streszczenie. Artykuł dotyczy zastosowania symulacji cyfrowej w projektowaniu i badaniu sieci szybkich (pospiesznych) tramwajów.

W pracy omówiono specyfikę zagadnień sterowania ruchem szybkich tramwajów w porównaniu ze sterowaniem ruchem pociągów.

Opisano model matematyczny, na podstawie którego stworzony został symulator. Omówione zostały szczegółowo atrybuty poszczególnych obiektów modelu.

Artykuł kończy opis prostego eksperymentu symulacyjnego obrazującego możliwości symulatora.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В СЕТИ СКОРЫХ ТРАМВАЕВ

Резюме. Статья касается употребления цифрового моделирования в проектировании и исследовании сети скорых трамваев.

В работе обсуждено специфику вопросов связанных с управлением движения скорых трамваев в сравнении с управлением движения поездов.

Представлено математическую модель на базе сделанной имитационной модели. Подробно обсуждено свойства отдельных объектов модели.

В статье находится описание простого моделированного эксперимента, представляющего возможности имитационной модели.

#### TRAFFIC SIMULATION IN A NETWORK OF FAST TRAM-CARS

Summary. The paper presents the application of digital simulation in designing and examining the fast tram cars. Basic terms and definitions related to a fast tram-car are given.

A simulation program created to study separate fast-tram

lines is described. Special attention is paid to a description of particular objects in the model and relevant parameters.

Finally, a simple simulation experiment is described to illustrate the capabilities of the simulator.

Najbardziej efektywnym środkiem komunikacji miejskiej jest metro. Jego zdolność przewozowa, jednostkowe zużycie energii oraz stopień uciążliwości dla środowiska naturalnego stawiają metro na pierwszej pozycji wśród środków szybkiej komunikacji miejskiej. Ma ono jednak pewne poważne ograniczenia [3]. Jego efektywne wykorzystanie wymaga znacznych potoków pasażerskich i odpowiedniej długości linii. Sam zaś koszt budowy metra jak i czas jej trwania jest znaczny [8].

Wydaje się, że wad tych pozbawiony jest szybki (pospieszny) tramwaj. Szybki tramwaj jest to system linii tramwajowych, których część (najczęściej obejmująca centrum) sprowadzona jest do płytkich tuneli. Pozostałe linie wytyczone są na wydzielonych torowiskach. Sieć projektowana jest jako bezkolizyjna. Tam, gdzie nie da się uniknąć skrzyżowań jednopoziomowych z ulicami lub drogami, stosuje się sygnalizację świetlną dającą priorytet tramwajowi. Odległości międzyprzystankowe wynoszą zazwyczaj 600-1000 m, zaś średnie prędkości komunikacyjne dochodzą do 25-30 km/h [3].

W odróżnieniu od metra prowadzenie tramwaju odbywa się zawsze w sposób ręczny. Wyklucza to możliwość automatycznego sterowania ruchem tramwajów. Sama jednak sygnalizacja świetlna lub np. system odcinków blokowych mogą być podobne do tych, jakie znajdują zastosowanie w systemach sterowania ruchem pociągów czy też metra. Prędkości rozwijane przez tramwaj i jego stosunkowo mała "bezwładność" nie uzasadniają tego typu rozwiązań. Wymuszają je jednak: kłopoty związane z oceną odległości w tunelach, konieczność zwiększania częstotliwości i regularności kursowania wagonów, często ograniczona widoczność (ze względu na specyfikę ruchu wielkomiejskiego i w tunelach).

Stosowane na świecie rozwiązania systemów sterowania ruchem w sieciach szybkich tramwajów przyjmują często jako podstawę trzystawną sygnalizację świetlną wraz z odcinkami blokowymi długości kilkudziesięciu metrów. Dopuszczalna bywa również tzw.

jazda na widoczność. Poszczególne rozwiązania są jednak bardzo zróżnicowane i zależne od specyficznych, lokalnych uwarunkowań [8].

Podstawowym problemem przy projektowaniu lub modernizacji istniejących już systemów komunikacji miejskiej jest zapewnienie ich odpowiedniej przepustowości, często przy oparciu się na istniejącym już taborze. W przypadku szybkiego tramwaju polega to na dobraniu odpowiednich parametrów sieci. Dotyczy to np. usytuowania newralgicznych elementów sieci, takich jak: przystanki i rozjazdy, jak i dozwolonych prędkości jazdy. Istotne jest także ustalenie takiej częstotliwości kursowania pojazdów, aby zapewnić wystarczającą płynność ich ruchu. Jeśli zmiany wymienionych parametrów nie dają zadowalających efektów, można zmienić parametry samych pojazdów. Dotyczyć to może przyspieszeń, opóźnień, prędkości maksymalnej rozwijanej przez tabor, jego pojemności itp.

Osiągnięcie zadowalających wyników projektowania rozbudowanych sieci komunikacyjnych opartych jedynie na intuicji projektanta jest niemożliwe. Zastosowanie metod analitycznych przy projektowaniu tych sieci lub symulowaniu w nich ruchu wydaje się problematyczne. Teoria masowej obsługi daje zadowalające efekty "przy pewnych specjalnych założeniach" [13] i może okazać się pomocna przy "opracowywaniu programu eksperymentów symulacyjnych" lub "oceny wiarygodności zaprojektowanego modelu symulacyjnego". Przydatność symulacji cyfrowej w porównaniu z innymi metodami badawczymi jest znaczna [11],[13]. Udział modelowania cyfrowego w rozwiązywaniu konkretnych problemów badawczych, według [11], jest największy i wynosi 29% ; metody sieciowe zajmują trzecią pozycję; zaś udział procentowy teorii masowej obsługi w tym zestawieniu wynosi 3% .

Znaczna ilość danych wejściowych oraz duża ilość danych wyjściowych, jak i komplikacje samych obliczeń uzasadniają zastosowanie symulacji cyfrowej przy badaniach rozbudowanych sieci transportowych.

## OPIS MODELU

Pojęcie "model" nie jest jednoznaczne i jego definicje w literaturze różnią się znacznie od siebie. Można przyjąć, że model matematyczny jest to "zbiór reguł i zależności, na podstawie których potrafimy przewidzieć zachowanie się układu" [12]. Przez pojęcie układ lub system rozumie się pewną strukturę tworzącą logiczną całość [5]. Przed modelem matematycznym stawia się dwa podstawowe wymagania [4]:

- 1) powinien być zgodny z odwzorowywanym systemem,
- 2) nie powinien być zbyt skomplikowany.

Drugie wymaganie pociąga za sobą uogólnienia sprzeczne z założeniem pierwszym. Dobry model powinien być maksymalnie prosty i równocześnie nie zniekształcać "poglądu na rzeczywistość". Wymaga to od projektanta poszukiwania kompromisowych rozwiązań.

W stworzonym modelu sieci szybkich tramwajów poczyniono następujące wstępne założenia upraszczające:

1. Ruch po każdym z torów odbywa się w jednym kierunku.

Jest to uzasadnione tym, iż praktycznie wszystkie eksploatowane obecnie systemy szybkich tramwajów spełniają ten warunek.

2. Urządzenia sterowania: blokada trzystawna jednokierunkowa z odcinkami kontrolowanymi.

Rozwiązanie takie jest stosowane najczęściej [8], [9]. Stosowanie innych rozwiązań uzasadnione jest niezmiernie rzadko.

3. Brak skrzyżowań jednopoziomowych.

Jest to jedno z wymagań stawianych przed szybkim tramwajem.

4. Dowolna konfiguracja sieci (po uwzględnieniu wymienionych ograniczeń).

5. Możliwość deklarowania: parametrów taboru, długości odcinków kontrolowanych, tras relacyjnych, rozkładów jazdy, dozwolonych prędkości itp.

6. Pojazdy przemieszczają się w sieci ruchem jednostajnym lub jednostajnie zmiennym (założone przyspieszenie i opóźnienie hamowania są stałe w całym przedziale prędkości).

Jest to istotne uproszczenie, nie wpływa ono jednak znacząco na odwzorowanie rzeczywistości [1], [2], [14].

7. Parametry kinematyczno-ruchowe wszystkich pojazdów są identyczne (w rzeczywistych sieciach szybkiej komunikacji miejskiej cały tabor jest tego samego typu i różnice w parametrach poszczególnych pojazdów są pomijalne [9]).

8. Model nie uwzględnia wpływu ewentualnych pochyłeń profilu podłużnego trasy i oporów w łuku na ruch pojazdów.

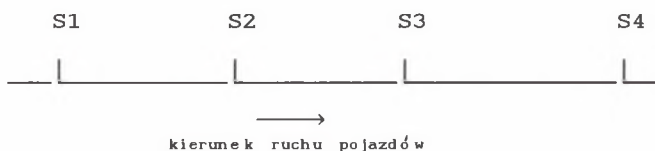
9. Upiływ czasu ma charakter dyskretny (rejestrowane są jedynie czasy wjazdu i wyjazdu pojazdów na oraz z poszczególnych odcinków kontrolowanych z pominięciem szczegółowej rejestracji zachowywania się pojazdów na pojedynczych odcinkach).

10. Odstęp blokowy może być mniejszy od drogi hamowania. W szczególnym przypadku może być równy połowie drogi hamowania.

Ostatnie założenie wymaga szerszego omówienia. Maksymalne możliwe skrócenie odstępu blokowego przy danej prędkości maksymalnej, obok innych zabiegów, znacznie zwiększa przepustowość linii [2]. Minimalna długość odstępu zależy jednak od drogi hamowania z prędkości maksymalnej do prędkości równej "zero". Na odcinkach linii kolejowych PKP wyposażonych w blokadę samoczynną trzystawną długość odstępu blokowego jest więc nie mniejsza od drogi hamowania. Odstępy te mogłyby zostać zmniejszone do połowy drogi hamowania (przy zachowaniu trzystawności blokady) przy założeniu, że tzw. droga widoczności byłaby większa od połowy drogi hamowania. Aby to uzasadnić, można rozpatrzyć trzy odstępy blokady (rys.1).

Jeśli na sygnalizatorze S4 wyświetlony jest sygnał "STÓJ", to wtedy na S3 pojawi się światło pomarańczowe, a na S2 i S1 światło zielone (jeśli odcinki te są "wolne"). Założono, że długość odstępu równa się połowie drogi hamowania. Dla uproszczenia pominięto wpływ na poniższe

rozważania takich wielkości, jak: długość drogi ochronnej za semaforem, czas reakcji maszynisty na zmianę sygnału na



Rys. 1. Fragment blokady liniowej

Fig. 1. A fragment of line interlocking system

sygnalizatorze, czas zadziałania hamulców oraz długość samego pojazdu.

Dla typowych warunków kolejowych długość drogi hamowania jest znacznie większa od drogi widoczności [10]. Tak więc maszynista mija sygnalizator S1, następnie sygnalizator S2 z prędkością maksymalną dla danej linii. Jeśli droga widoczności jest mniejsza od długości odstępu, maszynista dostrzeże sygnał pomarańczowy na sygnalizatorze S3 dopiero po pewnym czasie od minięcia sygnalizatora S2. Nawet jeśli rozpocznie natychmiast hamowanie, nie zatrzyma pociągu przed sygnalizatorem S4 (przy założonej wyżej długości odstępu równej połowie drogi hamowania). Aby zapewnić bezpieczeństwo ruchu, należałoby wydłużyć odstęp między sygnalizatorami do długości równej drodze hamowania lub zwiększyć stawność blokady.

Podobną analizę, jak powyżej, można przeprowadzić dla długości odcinka kontrolowanego równego połowie drogi hamowania, lecz równocześnie mniejszego od drogi widoczności (inaczej mówiąc, dla drogi widoczności większej od połowy drogi hamowania). Sytuacja taka jest typowa np. dla wagonów metra lub tramwajów. Kierujący pojazdem mijając sygnalizator S2 z prędkością maksymalną widzi światło pomarańczowe na S3. Może więc zredukować prędkość. Następnie ze zmniejszoną już prędkością mija S3 i widzi sygnał "STÓJ" na S4. Zmniejszając dalej prędkość zatrzyma się przed sygnalizatorem S4.

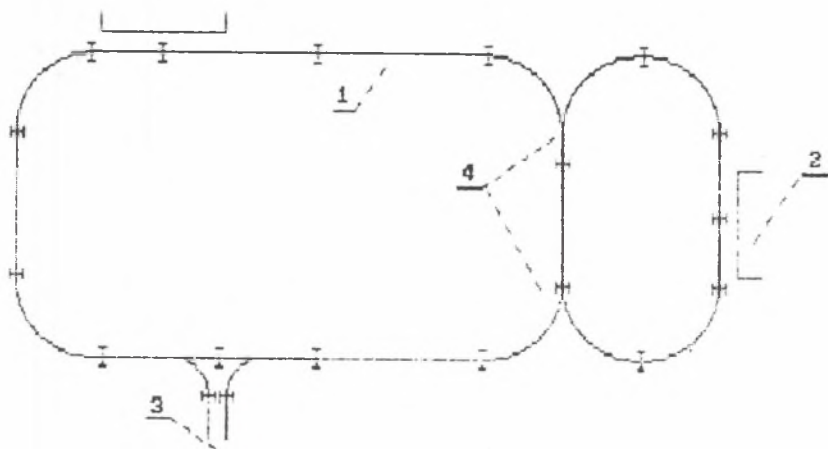
W celu zapewnienia bezpieczeństwa należy wyznaczyć prędkość, z jaką pojazd może minąć sygnalizator z zapalonym światłem pomarańczowym. Dla zadanej prędkości maksymalnej na danej linii i znanym opóźnieniu hamowania prędkość ta wynosi:

$$v = \sqrt{2a_o(s/2)} ,$$

gdzie  $a_o$  - opóźnienie hamowania,  
 $s$  - droga hamowania z prędkości dopuszczalnej (dla światła zielonego) do prędkości równej "zero",  
 która wynosi:

$$s = v_d^2 / 2a_o ;$$

gdzie  $v_o$  - dozwolona prędkość na danym odcinku linii.



Rys. 2. Graficzny obraz sieci szybkich tramwajów

Fig. 2. A graphic presentation of fast tram-car network

Na rys. 2 pokazany jest graficzny obraz sieci. Można w nim wyróżnić następujące elementy charakterystyczne:

1. Odcinek kontrolowany "zwykły",
2. Przystanek,

3. Wejście i wyjście z sieci,

4. Rozjazdy.

Każdy z wymienionych elementów należy do zbioru SIEĆ:

$$\text{SIEĆ} = \{t_i \mid i=0, 1, \dots, lt_i\}, :$$

gdzie:

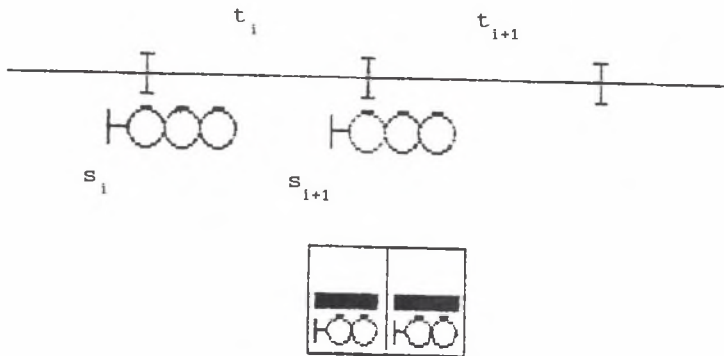
$lt_i$  - liczba odcinków kontrolowanych podlegających obserwacji.

W sieci poruszają się pojazdy i "płyną" przez nią potoki pasażerów.

Projektując za pomocą symulatora sieć komunikacyjną korzysta się z "modułów kostkowych" obrazujących poszczególne wymienione wyżej elementy sieci. Moduły te można traktować jako powtarzające kostkowe planu świetlnego, analogicznie do [7].

Każdy z elementów sieci opisuje zespół atrybutów. Określają one przestrzenne i czasowe własności poszczególnych obiektów.

Odcinek kontrolowany "zwykły" (dalej oznaczany jako  $t$ ) przedstawiony jest na rys. 3. Z każdym odcinkiem  $t_i$  związany jest odpowiadający mu sygnalizator  $s_i$ .



Rys. 3. Odcinek kontrolowany "zwykły"

Fig. 3. A "standard" controlled section



Zastosowana blokada jest trzystawna, a minimalny odstęp między sygnalizatorami równy jest połowie drogi hamowania. Wskazania sygnalizatora  $s_i$ , zależne są od stanu odcinka kontrolowanego  $t_i$  (zajęty lub wolny) oraz od wskazań sygnalizatora  $s_{i+1}$ , a więc od stanu odcinka kontrolowanego  $t_{i+1}$ . Jeśli każdemu odcinkowi  $t_i$  przyporządkowany zostanie atrybut  $Z0(t_i)$  określający jego zajętość, to możliwe stanie się na jego podstawie określenie stanu dowolnego sygnalizatora. Jeśli wartości atrybutu  $Z0(t_i)$  określone zostaną w następujący sposób:

- $Z0(t_i)=0 \Leftrightarrow$  odcinek  $t_i$  jest "wolny",
- $Z0(t_i)=1 \Leftrightarrow$  odcinek  $t_i$  jest "zajęty",

wtedy:

- dla światła zielonego na sygnalizatorze  $s_i$  -
  - $Z0(t_i)=0 \wedge Z0(t_{i+1})=0$ ,
- dla światła pomarańczowego na sygnalizatorze  $s_i$  -
  - $Z0(t_i)=0 \wedge Z0(t_{i+1})=1$ ,
- dla światła czerwonego na sygnalizatorze  $s_i$  -
  - $Z0(t_i)=1$ .

Opierając się na powyższym zestawieniu, można jednoznacznie określić stan, w jakim znajduje się w danej chwili blokada, kierując się jedynie informacją o zajęciu jej poszczególnych odcinków. Niepotrzebne staje się wprowadzenie dodatkowego atrybutu odcinka określającego sygnał na sygnalizatorze, który go osłania.

Przystanek posiada peron o długości umożliwiającej zatrzymanie się przy nim równocześnie dwóch tramwajów. Odcinek kontrolowany przyperonowy rozbity jest w związku z tym na dwie części.

Wyjście z sieci jest odcinkiem kontrolowanym, na którym pojawiają się pojazdy, które zgodnie ze swoim rozkładem jazdy opuszczają obserwowany podczas symulacji obszar sieci.

Wejście do sieci i wyjście z sieci można traktować jak tory łączące sieć z zajezdnią. W szczególnym przypadku zgłoszenie na wejściu może odbywać się zaraz po opuszczeniu go przez

poprzedni pojazd.

Przy założeniu, że ruch pojazdów na danym odcinku linii jest jednokierunkowy, rozjazdy można podzielić na dwie grupy:

- rozjazdy pozwalające na zmianę kierunku ruchu, umożliwiające wybór jednego z dwóch wariantów dalszej jazdy w sieci (na wprost lub na odgałęzienie) - oznaczane dalej jako rozjazdy typu "R",
- rozjazdy nie dające takiej możliwości, stanowiące jedynie "bierne" połączenie dwóch torów, stwarzające jednak możliwość kolizji dwóch pojazdów nadjeżdżających z różnych kierunków - oznaczane dalej jako rozjazdy typu "S".

Pojazdy poruszające się w sieci należą do zbioru POJAZDY:

$$POJAZDY = \{ \text{pojazd}_i \mid i = 0, 1, \dots, l_{\text{poj}} \},$$

gdzie:

$l_{\text{poj}}$  - liczba pojazdów podlegających obserwacji.

Z każdym pojazdem poruszającym się w sieci związanych jest kilka wielkości opisujących jego właściwości lub stan, w jakim się on znajduje. Część z nich ma charakter globalny, wspólny dla wszystkich pojazdów. Są to takie atrybuty, jak:

- prędkość maksymalna,
- wartości graniczne przyspieszenia i opóźnienia hamowania,
- długość całkowita,
- pojemność (maksymalna liczba pasażerów w pojeździe),
- ilość wejść i wyjść pojazdu.

Wymienione wyżej parametry nie zmieniają się w czasie. Dwa pierwsze mają wpływ na minimalną długość odcinków izolowanych. Trzeci na planowaną długość peronów. Ostatni na czas postojów na przystankach.

Istnieją też atrybuty przyporządkowane ściśle poszczególnym pojazdom. Po pierwsze, każdy tramwaj ma przyporządkowany mu numer. Określona jest również trasa, po której będzie się przemieszczał tramwaj w sieci, co wymaga zdefiniowania poszczególnych tras. Sprowadza się to do wyznaczenia kierunku dalszej jazdy na poszczególnych rozjazdach. Następnie określić należy szczegółowo, które pojazdy będą poruszały się na danej trasie.

Następnym elementem charakteryzującym stan pojazdu w danej chwili jest liczba znajdujących się w nim pasażerów. Pasażerów można "podzielić" na grupy wysiadające na poszczególnych przystankach. Suma pasażerów wsiadających i wysiadających ma wpływ na czas postoju na przystanku.

Dane związane ściśle z danym pojazdem można rozszerzyć o takie informacje jak, prędkość i czas pobytu na danym odciepie, czas wjazdu na ten odczep lub czas przejazdu przez pewien przekrój trasy.

#### ZESTAWIENIE ATRYBUTÓW MODELOWANYCH OBIEKTÓW

Opierając się na [6] i [7] można dokonać zestawienia atrybutów modelowanych obiektów. Ze względu na założone w modelu uproszczenia i specyfikę rozpatrywanego zagadnienia, atrybuty te muszą ulec modyfikacjom. Zbiory atrybutów podzielić można na:

- globalne - stałe w trakcie procesu symulacji,
- lokalne - opisujące indywidualne cechy poszczególnych obiektów.

Atrybuty globalne (stałe) zgrupowane są w zbiorach: ATgs i ATtr opisanych w następujący sposób:

■ ATgs={vmax, vogr, ap, ah, pjm, ld},

gdzie:

- $V_o$  - dozwolona prędkość maksymalna w sieci (dla światła zielonego),
- $V_{op}$  - prędkość dozwolona przy ograniczeniu prędkości (dla światła pomarańczowego),
- $a_p$  - przyspieszenie pojazdów,
- $a_o$  - opóźnienie hamowania pojazdów,
- pjm - pojemność pojazdów (maksymalna liczba pasażerów w pojeździe),
- ld - liczba drzwi w pojazdach (czynnik wpływający na czas postoju na przystankach).

Atrybuty  $a_p$ ,  $a_o$ ,  $pjm$ ,  $ld$  mogą być również atrybutami lokalnymi pojazdów.

■  $ATtr = \{TX(nrtr_i, nrr_j), TR(nrtr_i, nrr_j)\}$ ,

gdzie:

$nrtr_i$  - numer kolejny trasy,

$nrr_j$  - numer kolejny rozjazdu typu "R";  $nrr_j \in ATr$ , gdzie  $ATr$  jest zbiorem opisanym w dalszej części artykułu,

$TX(nrtr_i, nrr_j)$  - funkcja określająca, czy rozjazd  $nrr_j$  jest elementem składowym trasy o numerze  $nrtr_i$ , która przyjmuje następujące wartości:

$TX(nrtr_i, nrr_j) = 0 \Leftrightarrow$  rozjazd  $nrr_j$  nie jest elementem składowym trasy  $nrtr_i$ ,

$TX(nrtr_i, nrr_j) = 1 \Leftrightarrow$  rozjazd  $nrr_j$  jest elementem składowym trasy  $nrtr_i$ .

$TR(nrtr_i, nrr_j)$  - funkcja określająca położenie zwrotnicy  $nrr_i$  przy realizowaniu przejazdu po trasie o numerze  $nrtr_j$ , która przybiera następujące wartości:

$TR(nrtr_i, nrr_j) = 0 \Leftrightarrow$  jazda "na wprost",

$TR(nrtr_i, nrr_j) = 1 \Leftrightarrow$  jazda "na odgałężenie".

Atrybuty związane z obiektem pojazd (który jest elementem zbioru POJAZDY) zawarte są w zbiorze POJ opisanym następująco:

■  $POJ = \{nrpoj, tz, W(t), RD(nrpoj_i), LP(t)\}$ ,

gdzie:

$nrpoj$  - numer pojazdu,

$tz$  - czas do najbliższego zdarzenia (wyjazdu z odcinka kontrolowanego),

$W(t)$  - funkcja czasu symulacji określająca prędkość wyjazdu pojazdu z odcinka kontrolowanego,

$RD(nrpoj_i)$  - funkcja przyporządkowująca poszczególnym pojazdom numery tras, po jakich poruszać się one będą w sieci, taka że  $RD(nrpoj_i) = nrtr_j$ ,

$LP(t)$  - funkcja określająca liczbę pasażerów w pojeździe.

Zbiory atrybutów poszczególnych typów odcinków kontrolowanych (będących elementami zbioru SIEĆ) tworzone są na podstawie zbioru bazowego  $ATt$  opisanego w następujący sposób:  
 $ATt = \{nrt, nrp, nrn, dl, Z0(t_i), INP(t_i)\},$

gdzie:

- $nrt$  - numer odcinka kontrolowanego,
- $nrp$  - numer odcinka poprzedniego,
- $nrn$  - numer odcinka następnego,
- $dl$  - długość odcinka  $t_i$ ,
- $Z0(t_i)$  - funkcja określająca zajętość odcinka kontrolowanego  $t_i$ , która przyjmuje następujące wartości:  
 $Z0(t_i) = 0 \Leftrightarrow$  odcinek  $t_i$  jest "wolny",  
 $Z0(t_i) = 1 \Leftrightarrow$  odcinek  $t_i$  jest "zajęty",
- $INP(t_i)$  - funkcja określająca numer pojazdu znajdującego się w danej chwili na odcinku  $t_i$ , która przyjmuje następujące wartości:  

$$INP(t_i) = \begin{cases} 0 & \text{dla } Z0(t_i) = 0, \\ nrpoj_j & \text{dla } Z0(t_i) = 1, \text{ gdzie } nrpoj_j \in POJ. \end{cases}$$

Atrybuty poszczególnych typów odcinków kontrolowanych opisane są następująco:

■ odcinek kontrolowany "zwykły":

-  $ATo = ATt,$

■ przystanek:

-  $ATp = ATt \cup \{WP(t_i)\},$

gdzie,

$WP(t_i)$  - funkcja określająca wysokość peronów (jeden z czynników wpływających na czas postoju na przystankach), która przyjmuje następujące wartości:

$WP(t_i) = 0 \Leftrightarrow$  perony niskie,

$WP(t_i) = 1 \Leftrightarrow$  perony wysokie,

- wejście do sieci:
  - $ATe=ATt$ , przy  $nrp=0$  ("0" - pomocniczy numer odcinka nie istniejącego w rzeczywistej sieci),
- wyjście z sieci;
  - $ATy=ATt$ , przy  $nrn=0$  ("0" - pomocniczy numer odcinka nie istniejącego w rzeczywistej sieci),
- rozjazd typu "R":
  - $ATr=ATt \cup \{nrn'\}$ ,gdzie:
  - $nrn'$  - numer odcinka następnego przy jeździe "na odgałęzienie";
- rozjazd typu "S":
  - $ATs=ATt \cup \{nrp'\}$ ,gdzie:
  - $nrp'$  - numer odcinka poprzedniego przy jeździe "z odgałęzienia".

Opisane wyżej atrybuty poszczególnych obiektów wystarczają do jednoznacznego opisu stanu modelowanej sieci. Pozwala to na dynamiczne wykorzystanie modelu i przeprowadzenie za jego pomocą badań symulacyjnych ruchu pojazdów w sieci.

#### PRZEJAZD POJAZDU PRZEZ POJEDYNCZY ODCINEK KONTROLOWANY

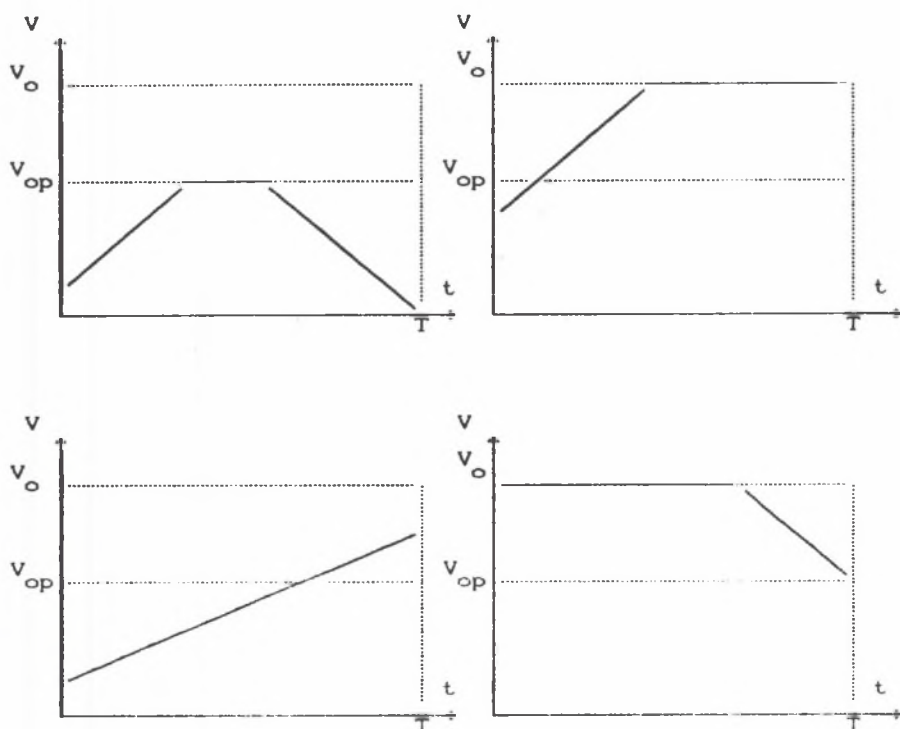
Kilkadziesiąt podstawowych wariantów przejazdu pojazdu przez pojedynczy odcinek kontrolowany można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- a) prędkość wjazdu na odcinek kontrolowany jest mniejsza od planowanej prędkości wyjazdu z tego odcinka,
- b) prędkość wjazdu na odcinek kontrolowany jest większa od planowanej prędkości wyjazdu z odcinka,
- c) prędkości wjazdu na odcinek i wyjazdu z odcinka są sobie równe.

Planowana prędkość wyjazdu ustalona jest przez wskazanie sygnalizatora znajdującego się na końcu odstępów i może przybierać trzy wartości:

- "zero" - dla sygnału "stój",
- prędkość dopuszczalna dla światła pomarańczowego,
- prędkość dopuszczalna dla światła zielonego.

Prędkość wjazdu na odcinek może natomiast przybierać dowolne wartości w przedziale od zera do dozwolonej prędkości maksymalnej.

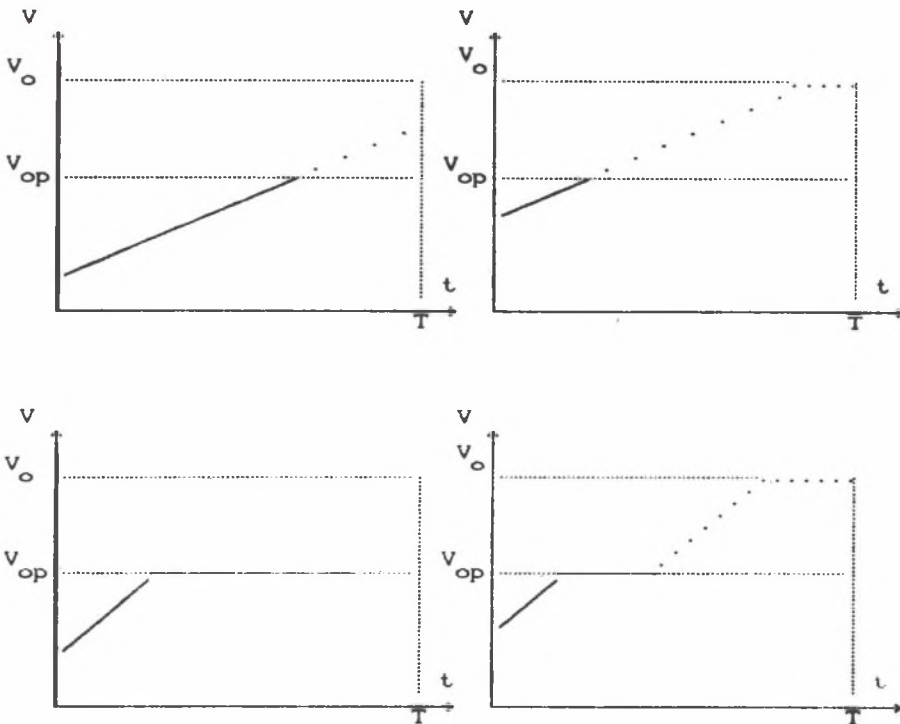


Rys. 4. Wykresy  $v=f(t)$  - warianty podstawowe

Fig. 4. Diagrams  $v=f(t)$  - basic versions

Dodatkową komplikację stanowi fakt, że w trakcie pobytu pojazdu na odcinku kontrolowanym sygnał na sygnalizatorze osłaniającym następny odcinek kontrolowany może ulec zmianie. Biorąc pod uwagę założenie, że ruch pojazdów może odbywać się tylko w jednym kierunku po każdym z torów, można przyjąć, że sygnał na sygnalizatorze przed pojazdem może zmienić się jedynie:

- z czerwonego na pomarańczowy,
- z pomarańczowego na zielony.



Rys. 5. Wykresy  $v=f(t)$  - przy zmianie sygnału z pomarańczowego na zielony

Fig. 5. Diagrams  $v=f(t)$  - at an orange-to-green change



Na rys. 4 pokazano kilka podstawowych wariantów przejazdu pojazdu przez odcinek kontrolowany. Na rys. 5 przedstawiono możliwe warianty przejazdu przy zmianie światła z pomarańczowego na zielone na sygnalizatorze osłaniającym następny odcinek i prędkości wjazdu pojazdu na rozpatrywany odcinek mniejszej od dozwolonej prędkości dla światła pomarańczowego. Wykresy przedstawiają prędkość pojazdów w funkcji czasu. Przez  $T$  oznaczany jest całkowity czas jazdy przez odcinek,  $V_o$  określa maksymalną prędkość dozwoloną (dla światła zielonego),  $V_{op}$  - prędkość dozwoloną przy ograniczeniu dozwolonej prędkości (dla światła pomarańczowego).

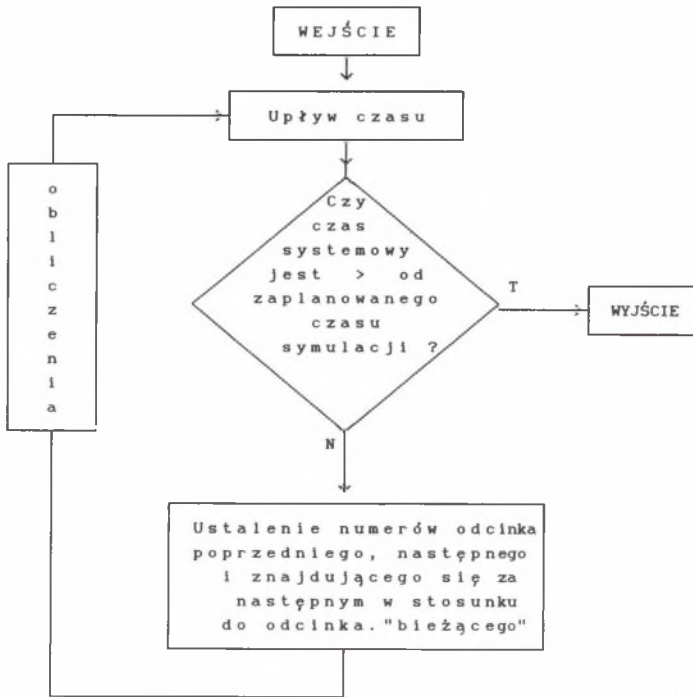
#### SYMULACJA UPŁYWU CZASU

W stworzonym modelu upływ czasu ma charakter dyskretny. Rejestrowany jest jedynie moment wjazdu lub wyjazdu z danego odcinka izolowanego. Istnieją dwie zasadnicze metody modelowania czasu w tego rodzaju układach [4]:

- a) metoda stałego kroku - gdzie czas jest "inkrementowany o stały odcinek  $dt$ ",
- b) metoda kolejnych zdarzeń - gdzie przyrost czasu jest nieregularny i zależy jedynie od stanu systemu.

Aby rozwiązać postawiony problem, wybrano metodę drugą. Czas systemowy mierzy się "od zdarzenia do zdarzenia", to znaczy pomiędzy momentami wyjazdu (wjazdu) dowolnych pojazdów na wolny odcinek kontrolowany.

Na rys.6 przedstawiono uproszczony algorytm przebiegu symulacji. Prostokąt oznaczony nazwą OBLICZENIA jest blokiem obliczeniowym, gdzie określane są: czas jazdy pojazdu przez pojedynczy odcinek kontrolowany oraz prędkość wjazdu z tego odcinka.

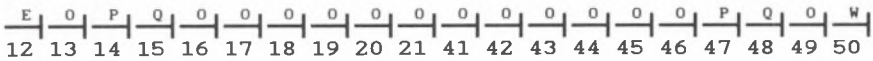


Rys. 6. Uproszczony algorytm symulacji

Fig. 6. Simplified algorithm of simulation

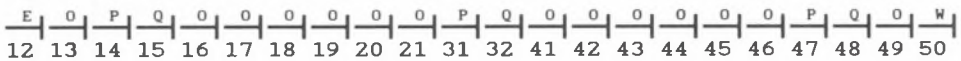
## PRZYKŁADOWA SYMULACJA

Przykładowa prosta symulacja obrazująca możliwości symulatora została przeprowadzona dla odcinków linii przedstawionych na rys. 7 i 8. Odcinek linii z rysunku 8 różni się od odcinka z rysunku 7 "dodaniem" dodatkowego przystanku (odcinki P 31 i Q 32). Odcinki izolowane "E", "W" oznaczają wejście i wyjście z sieci. Odcinki "O" są odcinkami "zwykłymi", "P" i "Q" oznaczają przystanki (z miejscem na zatrzymanie się przy nich równocześnie dwóch pojazdów).



Rys. 7. Schemat odcinka linii tramajowej (wariant pierwszy)

Fig. 7. A scheme of tram line section (first version)



Rys. 8. Schemat odcinka linii tramajowej (wariant drugi)

Fig. 8. A scheme of tram line section (second version)

Czas jazdy pojazdów przez odcinek (przepustowość odcinka linii) można badać w funkcji:

- prędkości i przyspieszeń rozwijanych przez tabor,
- długości odcinków kontrolowanych,
- częstotliwości zgłoszeń na wejściu,
- ilości i rozmieszczenia przystanków.

W przykładowej symulacji zmieniano dwa ostatnie parametry. Długość odcinków kontrolowanych jest stała i wynosi 120 m (długość odcinka przyperonowego wynosi 40m). Na rys.9 podane są tzw. dane stałe.

Symulację przeprowadzono dla obu odcinków z częstotliwością zgłoszeń na wejściu:

- 1) 30 s,
- 2) maksymalną możliwą - to znaczy zajęcie odcinka przez pojazd na wejściu następuje zaraz po jego zwolnieniu przez poprzedni pojazd.

Z wymienionymi założeniami przeprowadzono cztery symulacje.

Symulacja nr 1 - dla odcinka linii z rys. 7 z częstotliwością zgłoszeń na wejściu równą 30 sekund.

Symulacja nr 2 - dla odcinka linii z rys. 7 z maksymalną możliwą częstotliwością zgłoszeń.

v ogr.	=	18	[m/s ]
v max	=	26	[m/s ]
v rozj.	=	18	[m/s ]
przysp.	=	1.30	[m/s <sup>2</sup> ]
opózn. hamow.	=	1.40	[m/s <sup>2</sup> ]
czas reakcji	=	2	[s]
dł. odc. "O" i "P"	=	120	[m]
dł. odc. "R"	=	120	[m]
dł. odc. "U"	=	120	[m]
dł. odc. "Q"	=	40	[m]
dł. odc. "T"	=	230	[m]
dł. odc. "S"	=	120	[m]
dł. poj.	=	25	[m]
pojemność poj.	=	110	[pas.]
liczba wejść	=	3	
rodzaj peronów	=	W	

Rys. 9. Plik z danymi wejściowymi stałymi

Fig. 9. Text file with constant input data

Symulacja nr 3 - dla odcinka linii z rys. 8 z częstotliwością zgłoszeń na wejściu równą 30 sekund.

Symulacja nr 4 - dla odcinka linii z rys. 8 z maksymalną możliwą częstotliwością zgłoszeń.

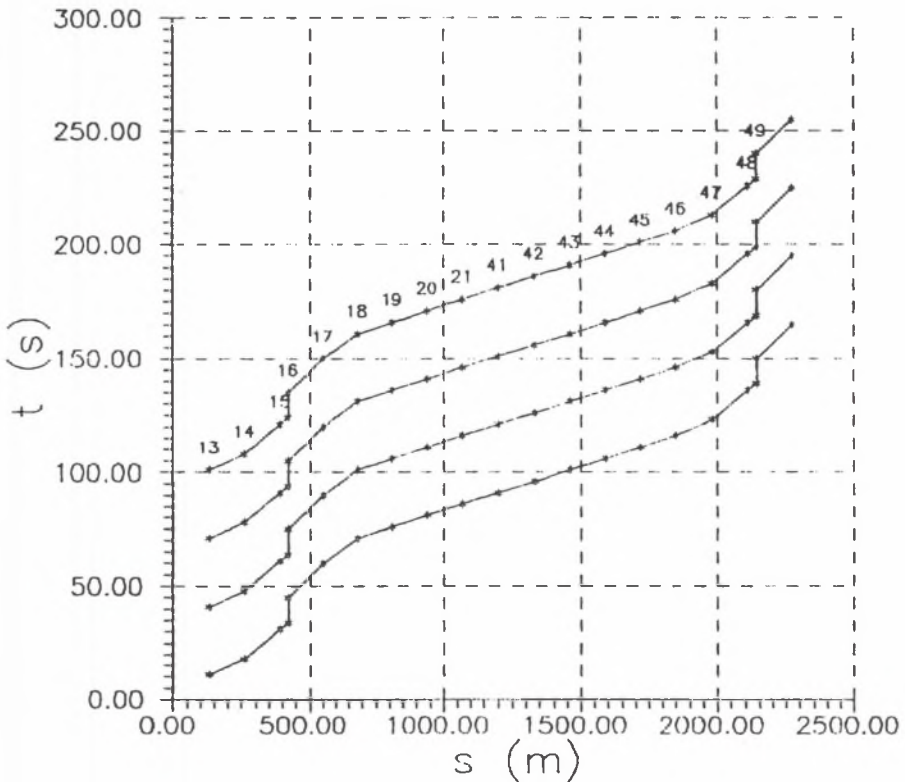
Opierając się na otrzymanych danych skonstruowano wykresy. Wykresy z rys. 10 - 13 przedstawiają czas wyjazdu pojazdów z odcinków kontrolowanych w funkcji drogi, kolejno dla każdej z przeprowadzonych symulacji. Są one wykresami uproszczonymi ze względu na dyskretny charakter symulacji upływu czasu. W trakcie symulacji rejestrowany jest jedynie czas wjazdu i wyjazdu. Korzystając z wykresów i danych zawartych w plikach można dokonać szeregu porównań otrzymanych wyników. Prędkość komunikacyjna dla poszczególnych przypadków wynosi (średnia z czasów jazdy pięciu pojazdów, przez odcinki 12 - 43):

- symulacja nr 1 - ok. 17 m/s,
- symulacja nr 3 - ok. 12 m/s,
- symulacja nr 2 - ok. 15 m/s,
- symulacja nr 4 - ok. 10 m/s.

Dla prędkości maksymalnej równej 26 m/s otrzymano następujące wartości współczynnika  $\epsilon$  równego ilorazowi prędkości komunikacyjnej i prędkości maksymalnej:

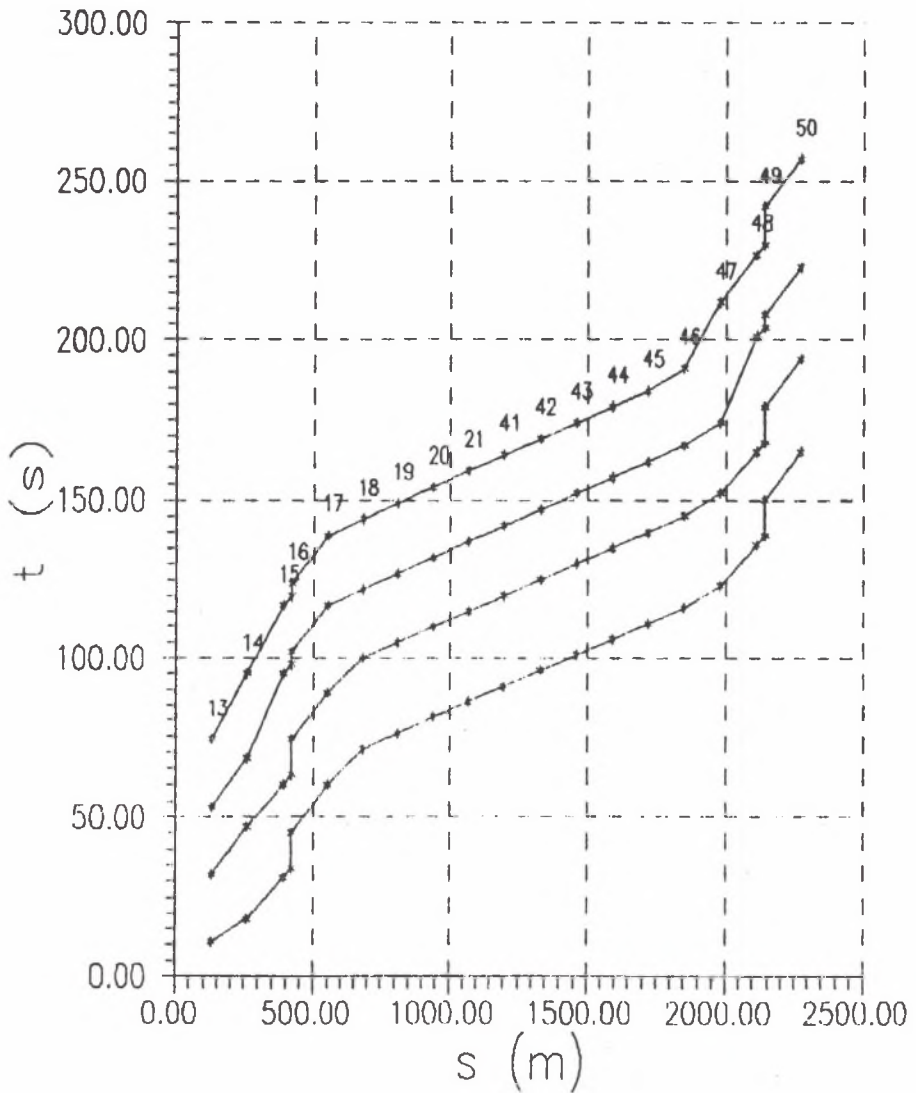
- symulacja nr 1 - 0,65,
- symulacja nr 3 - 0,46,
- symulacja nr 2 - 0,58,
- symulacja nr 4 - 0,39 .

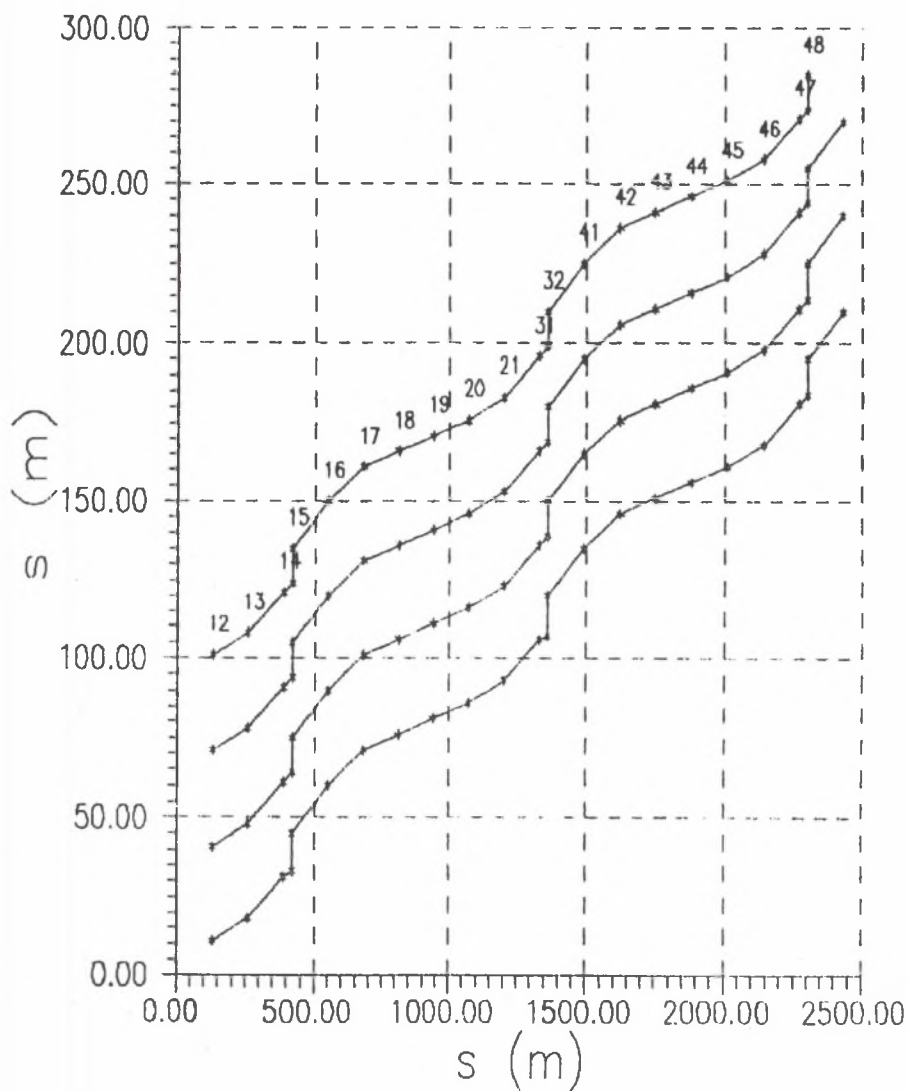
Jak widać, zwiększanie częstotliwości kursowania pojazdów jak i zwiększenie liczby przystanków wpływa na obniżenie wartości współczynnika  $\epsilon$ .

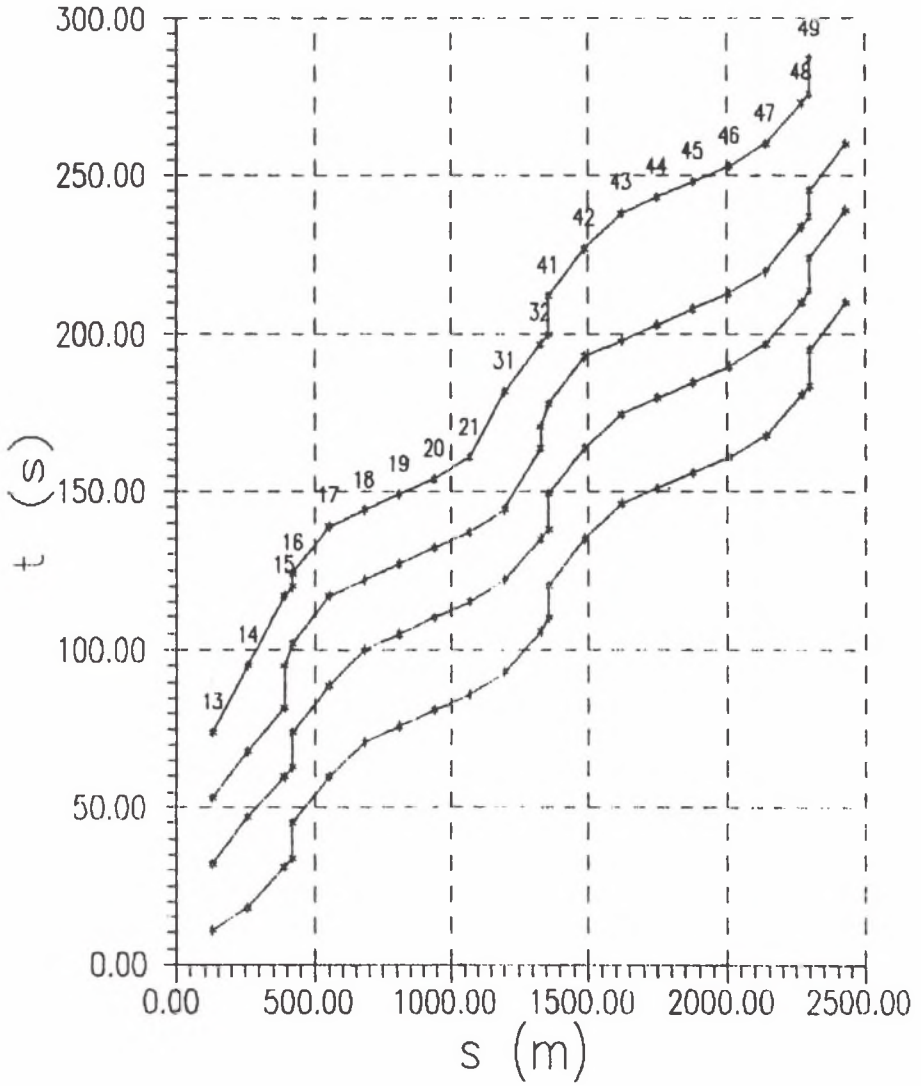


Rys. 10. Wykres  $t=f(s)$  - symulacja nr 1

Fig. 10. Diagram  $t=f(s)$  - simulation 1

Rys. 11. Wykres  $t=f(s)$  - symulacja nr 2Fig. 11. Diagram  $t=f(s)$  - simulation 2

Rys. 12. Wykres  $t=f(s)$  - symulacja nr 3Fig. 12. Diagram  $t=f(s)$  - simulation 3

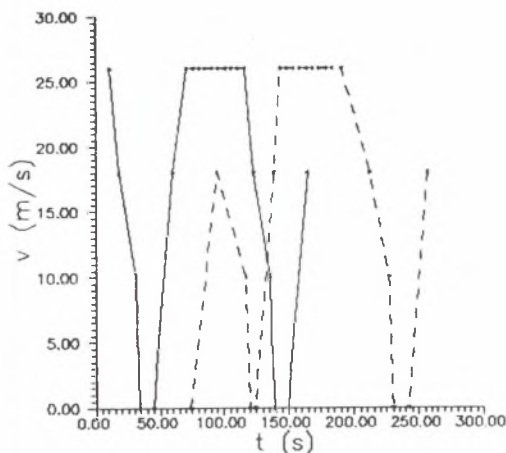


Rys. 13. Wykres  $t=f(s)$  - symulacja nr 4

Fig. 13. Diagram  $t=f(s)$  - simulation 4

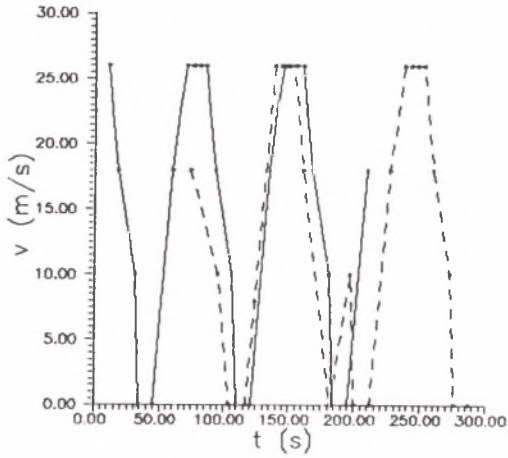


Na rys. 14 i 15 zobrazowany jest wpływ zwiększania częstotliwości kursowania pojazdów i gęstości rozmieszczania przystanków na płynność ruchu pojazdów. Są to wykresy prędkości w funkcji czasu. Rysunek 14 odpowiada symulacji nr 2, natomiast rysunek 15 symulacji nr 4. Linia ciągła oznacza pierwszy pojazd na linii (idealne warunki przejazdu), linia przerywana obrazuje ruch pojazdu nr 4. Widać wyraźną różnicę w płynności ruchu obu pojazdów. Wykres ten, podobnie jak poprzednie, jest uproszczony. Prędkość jest rejestrowana jedynie w momencie opuszczania przez pojazd odcinka kontrolowanego lub w momencie wjazdu pojazdu na odcinek kontrolowany. Brak jest rejestracji zachowania się pojazdów "wewnątrz" odcinka.

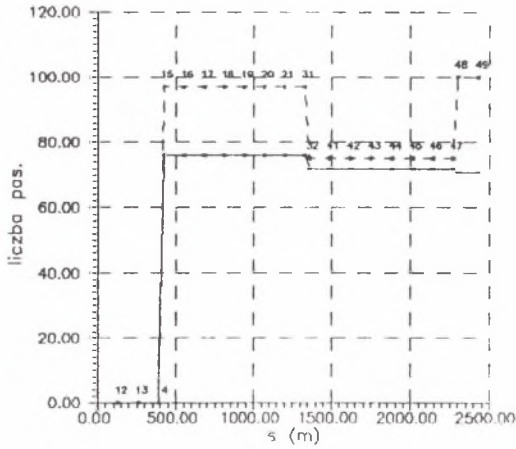


Rys. 14. Wykres  $v=f(t)$  - symulacja nr 2

Fig. 14. Diagram  $v=f(t)$  - simulation 2



Rys. 15. Wykres  $v=f(t)$  - symulacja nr 4  
 Fig. 15. Diagram  $v=f(t)$  - simulation 4



Rys. 16. Wykres  $l_p=f(s)$  - symulacja nr 3  
 Fig. 16. Diagram  $l_p=f(s)$  - simulation 3

Symulator umożliwia uzyskanie także innych informacji i dowolne ich zestawianie na wykresach. Przykładem może być rys. 16, gdzie pokazany jest wykres liczby pasażerów  $l_p$  w pojeździe w funkcji drogi przebytej przez pojazd. Wykres odpowiada symulacji nr 3 i pojazdom: nr 2 (linia ciągła) oraz nr 3 (linia przerywana).

Za wadę symulatora można uznać to, iż rejestrowanie czasów i prędkości jazdy pojazdów odbywa się jedynie przy wyjeździe i wjeździe na odcinki izolowane. Odpowiada to założonemu na wstępie dyskretnemu charakterowi upływu czasu i nie stanowi utrudnienia przy obserwacjach "globalnych" sieci.

Podsumowując można stwierdzić, że przydatność metod symulacyjnych w badaniach i projektowaniu sieci komunikacyjnych jest znacząca. Symulacja cyfrowa wykazuje wiele zalet w porównaniu z innymi metodami badań sieci komunikacyjnych. Na szczególną uwagę zasługuje szybkość obliczeń i coraz większa prostota obsługi symulatorów w związku z ciągłym rozwojem techniki komputerowej.

#### LITERATURA

- [1] Apuniewicz S., Dąbrowa-Bajon M., Sobolewski J.: Automatykacja sterowania ruchem kolejowym, t.2, Urządzenia i systemy, Wyd. Pol. Warsz., Warszawa 1985.
- [2] Dąbrowa-Bajon M.: Automatykacja sterowania ruchem na liniach kolejowych, Wyd. Pol. Warsz., Warszawa 1972.
- [3] Dziadek S.: Systemy transportowe ośrodków zurbanizowanych, PWN, Warszawa 1991.
- [4] Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów, PWN, Warszawa 1987.
- [5] Kondratowicz L.: Modelowanie symulacyjne systemów, WNT, Warszawa 1978.
- [6] Mikulski J., Zych K.: Opis formalny obiektów sterowania ruchem kolejowym, (w niniejszym zeszycie).
- [7] Mikulski J., Zych K.: Projektowanie uniwersalnego planu świetlnego stacji, (w niniejszym zeszycie).

- [8] Ostaszewicz J., Rataj M., Szybka komunikacja miejska, WKiŁ, Warszawa 1979.
- [9] Podoski J., Tramwaj szybki. Projektowanie i eksploatacja, WKiŁ, Warszawa 1983.
- [10] Potthoff G., Teoria potoków ruchu kolejowego. Ruch pociągów na szlakach i stacjach, WKiŁ, Warszawa 1973.
- [11] Rajski J., Tyszer J., Modelowanie i symulacja cyfrowa, Wyd. Pol. Pozn., Poznań 1986.
- [12] Skowronek M., Modelowanie cyfrowe układów dynamicznych, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1992.
- [13] Tyszer J., Symulacja cyfrowa, WNT, Warszawa 1990.
- [14] Wyrzykowski W., Ruch kolejowy. Ruch pociągów, t.1, WKiŁ, Warszawa 1966.

Recenzent: Doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do Redakcji 21.10.1993 r.

### **Abstract**

The paper presents the application of digital simulation in designing and examining the fast tram cars. Basic terms and definitions related to a fast tram-car are given. The problems concerning the traffic control of fast tram-cars are discussed. Comparisons are made with similar problems related to railway traffic control.

A simulation program created to study separate fast-tram lines is described. The mathematical model, on which the simulation program is based, is also given. Special attention is paid to a description of particular objects in the model and relevant parameters.

Necessary assumptions that simplify the modelling of the network are widely discussed. Finally, a simple simulation experiment is described to illustrate the capabilities of the simulator. Its results with a brief discussion are included.