ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: TRANSPORT z. 42 Nr kol. 1524

Janusz WOCH

UPROSZCZONE MODELE PRZEPUSTOWOŚCI SIECI KOLEJOWEJ

Streszczenie. Nowe teoriokolejkowe modele potoku ruchu oparte są na idei modeli zlepionych kolejek. Parametrami tych modeli są gęstość płynnego potoku i prędkość płynnego potoku. Wprowadzona została nowa idea efektywności ruchu: oczekiwana płynność potoku, która jest rozumiana jako oczekiwana liczba płynnie przejeżdżających pociągów. Porównano uzyskane numeryczne rezultaty zastosowania modelu. Przedstawiono również nową formę analizy przepustowości węzłów torowych dla analizy efektywności sieci kolejowej.

CAPACITY MODELS OF RAILWAY TRACKS

Summary. This report is a piece of a summary reporting author's works on computer methods of effectiveness analyses and railway networks optimization , which had been done in period 1970 to 1999. These methods had been called SOUT's methods and were introduced in 1996 to application at Polish Railways, after 20 years of testing application on Silesian Department of Polish Railways network in Katowice, and after 10 years of application Polish Railways network.

1. WPROWADZENIE

Niniejsza publikacja stanowi fragment podsumowania prac autora nad informatycznymi metodami analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowych (Woch, 1999), powstałymi w latach 70., 80. i 90., nazywanymi metodami soutowskimi, wprowadzonymi w roku 1996 do stosowania w Polskich Kolejach Państwowych, po 20 latach próbnego stosowania na sieci byłej Śląskiej Dyrekcji Kolei Państwowych w Katowicach, a od lat 80. – na całej sieci PKP.

Biorąc pod uwagę dzisiejszą sytuację gospodarczą Polski oraz katastrofę ekonomiczną PKP można stwierdzić, że jest to swoisty paradoks rozwoju metod soutowskich. Ponieważ dopiero w 1996 PKP, na podstawie pracy Wocha (1993), wprowadziły nową instrukcję o soutowskich metodach oceny efektywności wykorzystania sieci kolejowych, zastępującą poprzednią instrukcję (R-58) o metodach oceny przepustowości z roku 1952 (z mottem Stalina), na zakończenie okresu gęstej sieci kolejowej PKP, po okresie permanentnych braków przepustowości. Dzisiaj, jak wiadomo, PKP ma odmienne problemy – nadmiaru przepustowości sieci kolejowej, co jest wywołane dwoma przyczynami: gwałtownym

wzrostem motoryzacji, powodującym gwałtowny spadek przewozów pasażerskich w aglomeracjach oraz załamaniem gospodarczym w Polsce w zakresie wydobycia węgla i produkcji stali, dziedzin nakręcających koniunkturę przewozów towarowych PKP.

W drugiej połowie lat 90. powstały nowe modele matematyczne przepustowości drogi samochodowej opracowane przez autora (Woch, 1998a, 1988b, 1999a, 1999b), oparte na idei zlepionych kolejek, dające możliwość nowych podstaw teoretycznych metod soutowskich, służących do optymalizacji sieci kolejowych, stosowanych w polskim kolejnictwie od lat 70. W dalszym ciągu przedstawione zostały udoskonalone podstawy teoretyczne metod soutowskich, wywołane powstaniem nowych narzędzi modelowania matematycznego, co doprowadziło do powstania nowych metod analitycznych oceny przepustowości linii kolejowych.

2. SYMULACJA KOMPUTEROWA WĘZŁÓW TOROWYCH

W soutowskich modelach symulacyjnych węzłów torowych (p. np. Woch 1999c), gdzie możliwe były obserwacje kolizji ruchowych w długich okresach czasu, trwających na komputerach ułamek sekundy, możliwe były następujące obliczenia statystyk. Średnia częstotliwość regulacji wyraża statystyczną ocenę (estymator) prawdopodobieństwa regulacji, a więc jest wyrażona poprzez iloraz liczby regulowanych do liczby wszystkich tras:

$$\overline{p}(q) = \frac{\textit{liczba regulowanych tras dla danego } q}{\textit{liczba wszystkich tras dla danego } q}, \tag{1}$$

gdzie q oznacza intensywność rozważanego odstępu węzłowego.

Średni czas czekania wyraża statystyczną ocenę (estymator) oczekiwanego czasu czekania, a więc jest wyrażony poprzez iloraz sumarycznego czasu czekania do liczby wszystkich tras:

$$\overline{w}(q) = \frac{\textit{sumaryczny czas czekania dla danego } q}{\textit{liczba wszyskich tras dla danego } q}. \tag{2}$$

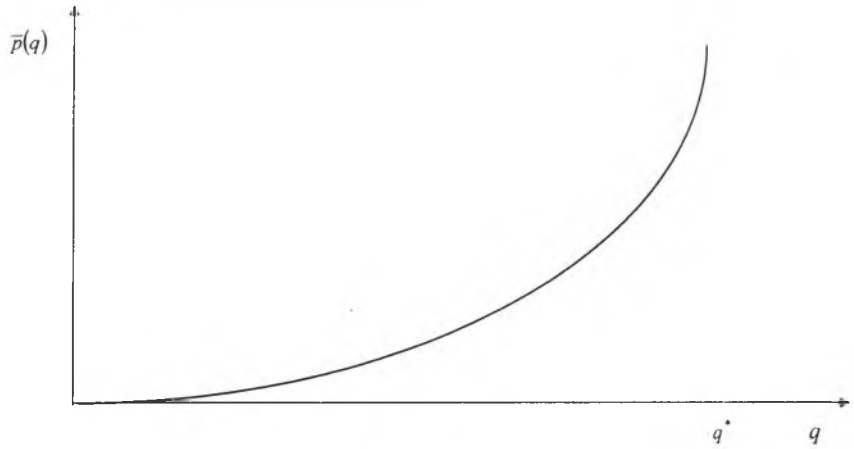
Średnia płynność ruchu wyraża statystyczną ocenę (estymator) oczekiwanej płynności ruchu, a więc jest wyrażona przez średnią liczbę płynnych przejazdów pociągów przez analizowany odstęp węzłowy w zadanej jednostce czasu, to znaczy jest równa różnicy między założoną intensywnością q a średnią liczbą regulowanych tras $q \cdot \overline{p}(q)$:

$$\overline{F}(q) = \textit{średnia liczba wszystkich tras - średnia liczba regulowanych tras} = q - q \cdot \overline{p}(q). \tag{3}$$

Optymalną intensywnością nazywamy intensywność q_0, dla której średnia płynność (3) jest największa. Jest to statystyczna definicja optymalnej intensywności.

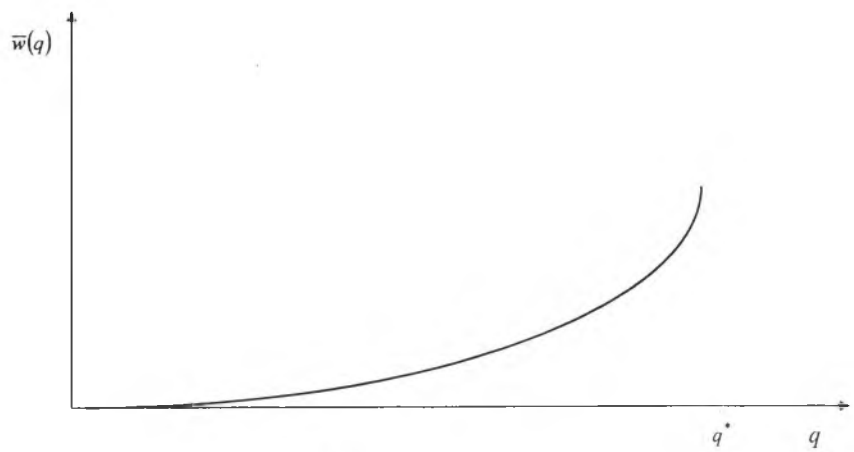
Odstępy węzłowe sieci kolejowej są miejscem, gdzie mogą powstawać straty czasu podróży, to znaczy czasy czekania podczas tworzenia wykresu ruchu, które później są przez konstruktora wykresu ruchu przenoszone w inne miejsca sieci, a które pojawiają się w ruchu rzeczywistym, gdy ruch nie będzie przebiegał według wykresu ruchu.

Dla ustalonego odstępu węzłowego sieci kolejowej można, na podstawie symulacji komputerowej tego procesu, otrzymać następujące zależności średniej częstotliwości regulacji $\overline{p}(q)$ od intensywności q przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Zależność średniej częstotliwości regulacji $\overline{p}(q)$ od intensywności q
Fig. 1. The average frequency of regulations $\overline{p}(q)$ of intensity q

Na rys.1 przedstawiony został wykres tej zależności w przedziale intensywności $(0, q^*)$, gdzie q^* jest przepustowością badanego odstępu węzłowego. Widzimy charakterystyczny kształt „dużej wypukłości" tej krzywej. Jest to kształt podobny do zależności średniego czasu czekania $\overline{w}(q)$ od intensywności q dla analizowanego odstępu węzłowego przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Zależność średniego czasu czekania $\overline{w}(q)$ od intensywności q
Fig. 2. The average of waiting time function $\overline{w}(q)$ of intensity q

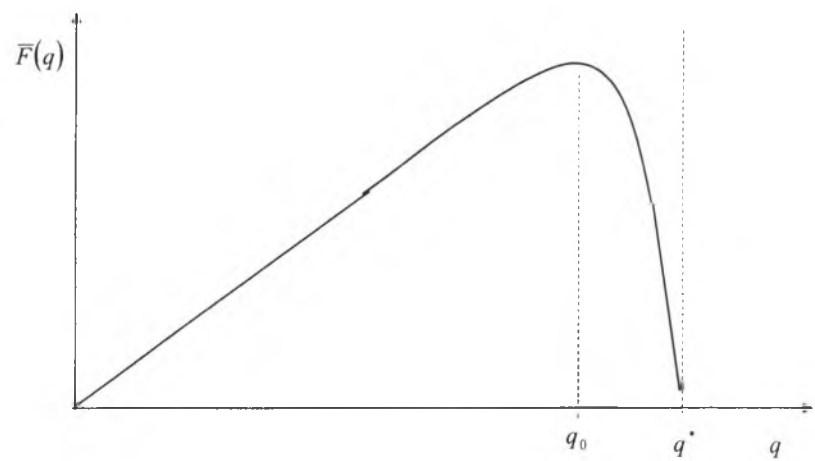
Kształt wykresu na rys. 2 jest typowym kształtem, jaki otrzymujemy dla średnich czasów czekania innych fragmentów sieci transportowej. Charakterystyczna „duża wypukłość" tych

wykresów wynika z małej wariancji odstępów czasu między kolejnymi pojazdami, będącymi konsekwencją konieczności utrzymywania bezpiecznych odstępów między pojazdami w sieciach transportowych, dla ustalonych połączeń sieci, co zostało wyjaśnione przez Wocha (1998a) na gruncie rozważań teoretycznych. Wykres średniego czasu czekania $\overline{w}(q)$ jest podobny do wykresu oczekiwanego czasu czekania $E(W_q)$. Im większy jest minimalny odstęp w strumieniu przybyć pociągów Δ, tym mniejsza jest wariancja tych odstępów oraz tym „bardziej wypukły" kształt wykresu.

Miarą efektywności odstępu węzłowego, jak i dowolnego odstępu szlakowego, jest średnia liczba płynnych tras pociągów w jednostce czasu, która jest różnicą liczby wszystkich tras w jednostce czasu oraz liczby regulowanych tras w jednostce czasu:

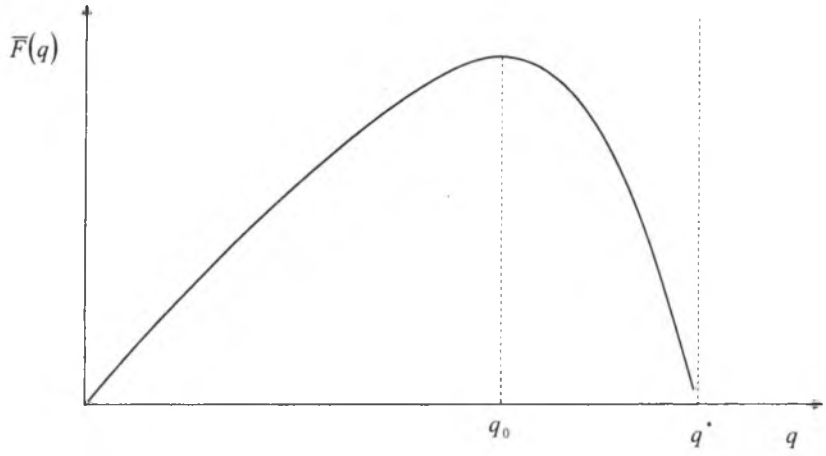
$$\overline{F}(q) = q - q \cdot \overline{p}(q) = (1 - \overline{p}(q))q, \tag{4}$$

gdzie wyrażenie w nawiasie po prawej stronie nazywamy oceną (estymatorem) prawdopodobieństwa płynności ruchu. Intensywność q_0, dla której średnia płynność (4) jest największa, nazywamy *optymalną intensywnością*. Jest to równoważna probabilistyczna definicja optymalnej intensywności do (3), nawiązująca do oryginalnej definicji Wocha (1974) opartej na pojęciu prawdopodobieństwa płynności ruchu: $(1 - \overline{p}(q))$. Statystyczne definicje optymalnej intensywności (3) i (4) są statystycznymi odpowiednikami pojęcia teoretycznego zdefiniowanego przez Wocha (1998a). Ponieważ średnia częstotliwość regulacji $\overline{p}(q)$ jest zazwyczaj „bardzo wypukłą" funkcją intensywności q dla wielu odstępów szlakowych, to średnia płynność jest „bardzo wklęsłą" funkcją intensywności, jak na rys. 3.



Rys. 3. Zależność średniej płynności ruchu $\overline{F}(q)$ od intensywności q
Fig. 3. The average of traffic freedom $\overline{F}(q)$ of intensity q

Rys. 3 przedstawia typowy kształt średniej płynności ruchu dla torów szlakowych nie zawierających odstępów węzłowych. Dla odstępów węzłowych płynność ruchu jest „mniej wklęsłą" funkcją intensywności tak, jak na rys. 4.



Rys. 4. Średnia płynność ruchu dla odstępów węzłowych
Fig. 4. The average of traffic freedom for junction blocks

Należy również uświadomić sobie, że przepustowość q^*, jak i optymalna intensywność z rys. 4 dla odstępów węzłowych są zależne od wielkości i struktury ruchu w węźle, co jest zasadniczym problemem zagadnień przepustowości sieci kolejowych i przyczyną iteracyjnego sposobu oceny przepustowości sieci kolejowych, nie pozwalających na optymalizację sieci kolejowej za pomocą jednego kroku optymalizacyjnego (Woch, 1998a, 1999c).

Dla odstępu węzłowego można zatem zdefiniować wiele różnych *warunkowych przepustowości*, zależnych od wielkości ruchu kolizyjnego w węźle. Na przykład, tak jak na rys. 5, można zdefiniować trzy przepustowości warunkowe w odstępie węzłowym: q_3^* - bez ruchu kolizyjnego, q_2^* - z małym ruchem kolizyjnym oraz q_1^* - z normalnym ruchem kolizyjnym, znacznie różniące się od siebie, a więc $q_1^* < q_2^* < q_3^*$, o różnych wykresach średniego czasu czekania:

Rys. 5. Trzy pojęcia przepustowości warunkowej w odstępie węzłowym
Fig. 5. Three terms of conditional capacity in junction block

Wszystkie funkcje opisujące efektywność wykorzystania torów kolejowych, jak i innych dróg transportowych, są nieliniowymi funkcjami intensywności. Jest to druga przyczyna złożoności zagadnień optymalizacji sieci kolejowych. Natomiast dla przedziałów małych intensywności do $0.5q^*$, a czasem do $0.7q^*$, można przyjąć liniowy wzrost efektywności, jako funkcji intensywności, jednak z uwagi na węzłowe ograniczenia przepustowości przedstawione na rys. 5 bardzo trudnym zadaniem jest ocena odpowiednich przepustowości warunkowych. To jest w gruncie rzeczy podstawowy problem optymalizacji sieci kolejowej. Można założyć dla praktycznych celów, że optymalna intensywność q_0 wyznacza przedział liniowego wzrostu charakterystyk efektywności ruchu. Daje to znakomite możliwości wzbogacenia narzędzi optymalizacji sieci kolejowej. (p. np. Woch 1998a, 1999b).

Gdy stosujemy metody symulacji komputerowej w zagadnieniach przepustowości sieci kolejowej, pojawia się pokusa zbudowania modelu symulacyjnego całej sieci symulowanej jednocześnie. To nie jest właściwe podejście do zagadnienia, gdy celem jest analiza przepustowości, ponieważ wymaga ona bardzo szczegółowego badania procesów kolejkowych podczas tworzenia wykresu ruchu w bardzo długim okresie czasu, co daje wielką złożoność zagadnień przepustowości sieci kolejowej, którą powinniśmy dekomponować na jak najmniejsze fragmenty, wprowadzając jednocześnie ograniczenia sąsiednich modeli, wpływające na przepustowość analizowanych układów torowych. Jak wykazują doświadczenia takich badań sieci kolejowej PKP w latach 70. i 80., analiza przepustowości pojedynczych węzłów torowych jest bardzo złożonym zagadnieniem dla analityków i projektantów sieci kolejowej. Dlatego sieć kolejowa modelowana na szczegółowym poziomie analizy przepustowości pojedynczego węzła torowego była później agregowana dla rozważań optymalnej organizacji ruchu, a następnie dezagregowana do optymalizacji układu torowego (Woch, 1999c). W pracach mających na celu optymalizację sieci kolejowej PKP operowano czterema poziomami agregacji opisu przepustowości sieci kolejowej, co było konsekwencją dużej złożoności ówczesnej sieci kolejowej PKP (Woch, 1999c).

3. PORÓWNANIE NUMERYCZNYCH WYNIKÓW MODELU MAKSYMALNEJ PŁYNNOŚCI POTOKU RUCHU KOLEJOWEGO

Obliczenia za pomocą modelu maksymalnej płynności przeprowadzono dla sprawdzenia typowych charakterystyk sieci kolejowej PKP, a więc średniej prędkości płynnego potoku $v_f = 90\ km/h$, współczynnika zmienności czasu obsługi $\mu\Delta = 0.5$ oraz stałej długości fragmentu drogi uważanego za urządzenie obsługi - minimalny dystans $1/k_f = 2.5\ km$.

Dystans $1/k_f$ wyraża najmniejszą odległość pomiędzy dwoma pociągami w tym samym kierunku poruszającymi się płynnie z prędkością v_f. Należy ten dystans określać jako pewien graniczny, najmniejszy dystans w długim okresie działania. A więc dla prędkości płynnego potoku $v_f = 90\,km/h$ przyjmujemy dystans $2.5\ km$ jako średnio najmniejszy dystans między kolejnymi pociągami, które mogą płynnie przemieszczać się z prędkością $90\,km/h$. A więc jest to pewna średnia odległość pociągów w ruchu „na zielone światło". Ten sam efekt otrzymamy, gdy założymy, że ruch pociągowy wymaga dla prędkości swobodnej $90\,km/h$ maksymalnego dystansu $5\ km$, przyjmowanego z prawdopodobieństwem $p = 1/2$, co daje oczekiwany dystans $2.5\ km$, według modelu maksymalnej płynności (p. np. Woch, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b).

Współczynnik zmienności czasu przejazdu odcinka toru $1/k_f$ - $\mu\Delta$ - zależy od zróżnicowania prędkości pociągów, co generalnie jest większą różnorodnością niż w potokach ruchu samochodowego, jak przedstawia to Woch (1998a). Z tego względu $\mu\Delta$ dla szlaków kolejowych powinno się przyjmować średnią z możliwych wartości:

$$0 \le \mu\Delta \le 1. \tag{5}$$

Wartość $\mu\Delta = 1$ w modelu maksymalnej płynności odpowiada założeniu wykładniczego rozkładu prawdopodobieństwa czasu przejazdu po fragmencie toru $1/k_f$. Natomiast wartość $\mu\Delta = 0$ odpowiada stałym czasom przejazdu. Wiadomo, że współczynnik zmienności $\mu\Delta$ wyraża proporcje stałej części czasu obsługi Δ do oczekiwanego czasu obsługi $1/\mu$, co pozwala na łatwe wyrażanie zmienności czasu podróży dystansu $1/k_f$.

Ponieważ w PKP w ostatnim okresie zwiększyło się zróżnicowanie prędkości pociągów oraz masy i długości pociągów, dla szlaków kolejowych PKP można przyjąć średnie wartości współczynnika zmienności, a więc

$$\mu\Delta = 0.5. \tag{6}$$

Zróżnicowanie prędkości pociągów na sieci PKP odbywa się jednocześnie ze znacznym spadkiem intensywności ruchu pociągów oraz zwiększenia różnorodności pociągów na większości linii kolejowych, co również jest konsekwencją zmniejszenia ruchu pasażerskiego i towarowego.

Linie kolejowe z jednorodnym ruchem pasażerskim, na przykład obsługującym aglomeracje gdańską i warszawską, mają jednorodny ruch na torach szlakowych, gdzie współczynnik zmienności czasu przejazdu toru szlakowego

$$\mu\Delta = 0.9. \tag{7}$$

Jest to w porównaniu do ruchu samochodowego jeszcze mniejsza wariancja czasu przejazdu pociągów odstępów szlakowych (p. np. Woch 1998a,1999b). W takiej sytuacji zdecydowano się przyjąć w dalszej analizie numerycznej mniejsze wartości tych współczynników, to znaczy $\mu\Delta = 0.5$.

Optymalna gęstość w modelu maksymalnej płynności potoku jest określona wzorem (p. np. Woch, 1999b):

$$k_0 = k_f\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (1-\mu\Delta)^{-3}}}\right) = 0.67k_f = 0.26\,poc/km. \tag{8}$$

Optymalna intensywność w modelu maksymalnej płynności jest określona wzorem (p.np. Woch, 1999b):

$$q_0 = \frac{\mu}{1 + (1-\mu\Delta)^3 + 2\sqrt{(1-\mu\Delta)^6 + (1-\mu\Delta)^3}} = 0.53\mu = 0.53k_f v_f. \tag{9}$$

Zgodnie ze wzorem modelu maksymalnej płynności (p. np. Woch, 1999b) otrzymujemy optymalną intensywność

$$q_0 = 0.53 \cdot 36 = 19\,poc/h. \tag{10}$$

Zgodnie ze wzorem modelu maksymalnej płynności (p. np. Woch, 1999b) otrzymujemy optymalną prędkość

$$v_0 = \frac{v_f}{1 + (1-\mu\Delta)^3\left(\sqrt{1 + (1-\mu\Delta)^{-3}} - 1\right)} = 0.8v_f = 72\,km/h. \tag{11}$$

W tab.1 przedstawiono siedem charakterystyk dla czterech różnych prędkości potoku płynnego pociągów.

Tabela 1

Charakterystyki modelu maksymalnej płynności potoku dla różnych prędkości płynnego potoku pociągów

Prędkość płynnego potoku v_f	Oczekiwany minimalny bufor $1/k_f$	Gęstość potoku płynnego k_f	Intensywność obsługi μ	Optymalna gęstość k_0	Optymalna prędkość v_0	Optymalna intensywność q_0
90	2.5	0.4	36	0.26	72	19
120	3.3	0.3	32	0.20	96	17
150	5.0	0.2	30	0.13	120	16
200	10.0	0.1	20	0.07	160	11

Optymalna prędkość potoku płynnego pociągów w modelu maksymalnej płynności jest najmniejszą prędkością potoku płynnego $v_f = 90$, ponieważ daje maksymalną optymalną intensywność $q_0 = 19$. Na podstawie powyższej ogólnej analizy można jedynie wyrobić sobie pogląd na zagadnienia przepustowości sieci kolejowej. Do bardziej konkretnych wniosków można dojść na podstawie symulacyjnych modeli węzłów kolejowych (p. np. Woch, 1999c).

Literatura

1. Woch J. (1993): Jak korzystać z SOUT. Dyrekcja Generalna PKP. Warszawa – Katowice.
2. Woch J. (1998a): Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Polska Akademia Nauk – O. w Katowicach, Komisja Transportu. Wydawnictwo Szumacher.
3. Woch J. (1998b): Compressed queueing processes for single traffic flows. The Archives of Transport 10, 3-4, 67-82.
4. Woch J. (1999a): Two models for traffic flow. Transportation Research – Submitted for publication.
5. Woch J. (1999b): Two queueing theory models for traffic flow. The Archives of Transport 11, 1-2, 73-90.
6. Woch J. (1999c): Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej. (System Oceny Układów Torowych – SOUT – opis podstawowego oprogramowania). Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, przygotowywane do druku.

Recenzent: Dr hab. inż. Tomasz Ambroziak, Prof. Pol. Warszawskiej

Abstract

This report is a piece of a summary reporting author's works on computer methods of effectiveness analyses and railway networks optimization , which had been done in period 1970 to 1999. These methods had been called SOUT's (System Oceny Układów Torowych) methods and were introduced in 1996 to application at Polish Railways, on DOS and Unix platform, after 20 years of testing application on Silesian Department of Polish Railways network in Katowice, and after 10 years of application Polish Railways network. Key words : capacity models, railway network effectiveness.

Praca wykonana w ramach BK 225/RM 10/2001