Wiesław DŹWIGOŃ

STRATY CZASU ZWIĄZANE Z PRZESIADKĄ NA WĘŹLE KOMUNIKACYJNYM

W artykule przedstawiono analizę przesiadek dokonywanych na dużym dwupoziomowym węźle komunikacyjnym. Częścią przesiadki jest przejście pomiędzy przystankami. Omówiono zakres pomiarów, które w takim przypadku obejmują ruch pieszy. Czasy przejścia i dojścia do przystanków są miarą dostępności do węzła. Są również elementem oceny jakości funkcjonowania komunikacji miejskiej. Wyniki mogą być przydatne w analizach symulacyjnych funkcjonowania węzła. Przesiadce towarzyszy niepewność związana z punktualnością kursowania linii oraz koniecznością przekraczania jezdni. Dobrze zaprojektowana infrastruktura zwiększa efektywność korzystania z transportu miejskiego.

WSTĘP

Węzły przesiadkowe są coraz ważniejszym elementem infrastruktury transportowej [4, 6]. Przechodzi przez nie nawet kilkanaście linii komunikacyjnych, które generują duży potok przesiadkowy. Powstało niewiele metod, przeznaczonych do oceny węzłów [2, 5]. Częściej zagadnienie przesiadki jest szeroko uwzględniane jako składnik kształtowania jakości w transporcie zbiorowym [6, 7]. Na efektywność przesiadki wpływają:

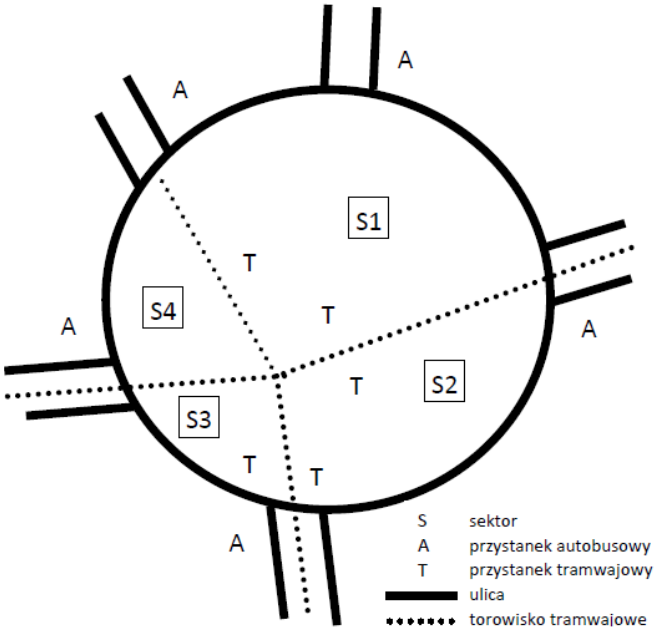
- odległość pomiędzy przystankami;
- czas oczekiwania na pojazd;
- warunki oczekiwania na przystanku (zadaszenie, gęstość ruchu pieszego);
- czas przejścia pomiędzy przystankami;
- warunki przejścia (orientacja, różnice wysokości, kolizyjność z innymi uczestnikami ruchu, sygnalizacja świetlna).

Wymiernym wskaźnikiem oceniającym przesiadkę jest czas jej trwania. Efektywność tego składnika podróży obniża się wraz z występowaniem na drodze pomiędzy przystankami punktów kolizji z innymi uczestnikami ruchu. Jednym z nich jest przejście dla pieszych z sygnalizacją świetlną [3] i wpływ tego elementu zostanie omówiony w artykule.

1. CHARAKTERYSTYKA WĘZŁA PRZESIADKOWEGO

Analizę strat czasu związanych z przesiadką przeprowadzono na dużym węźle komunikacyjnym, jakim jest Rondo Mogilskie w Krakowie. Skrzyżowanie jest położone na drugiej obwodnicy miasta, co jest związane z występowaniem na nim dużego ruchu samochodowego. Dodatkowo przebiega tutaj kilkanaście linii tramwajowych i autobusowym, kierujących pasażerów do centrum lub stycznie do śródmieścia i dalej do innych dzielnic. W 2008 r. skrzyżowanie zostało gruntownie przebudowane na węzeł dwupoziomowy. Celem przebudowy było zwiększenie bezpieczeństwa oraz poprawa sprawności i efektywności funkcjonowania komunikacji miejskiej. Osiągnięto to poprzez pozostawienie na poziomie terenu ruchu samochodów i autobusów, a na poziomie „-1" ruchu tramwajów, pieszych i rowerzystów.

Rys. 1 prezentuje schemat węzła. Wszystkie przystanki tramwajowe znajdują się na dole, blisko siebie, co skraca czas przesiadki pomiędzy nimi. Przystanki autobusowe są położone na górze na obrzeżach węzła, co wydłuża drogę przesiadki z autobusów do tramwajów. Cały ruch pieszy i rowerowy odbywa się na dolnym poziomie i dzięki temu rozwiązaniu zwiększono bezpieczeństwo – eliminując wypadki typu samochód-pieszy. W konsekwencji cały ruch pasażerów dochodzących do przystanków oraz przesiadających się jest kolizyjny tylko z rowerami i tramwajami. Obok przystanków tramwajowych znajdują się 3 przejścia dla pieszych. Większość pieszych i pasażerów musi z nich korzystać, co wydłuża czas przesiadki. Zmniejsza to sprawność dokonywanej przesiadki. Na Rys. 1 zaznaczono również sektory, na które w celach analizy został podzielony węzeł.



Rys. 1. *Schemat węzła przesiadkowego*

Przeprowadzone badanie polegało na śledzeniu osób, które pojawiły się na węźle. Jego podstawowym celem było wyznaczenie czasów przejść pomiędzy różnymi elementami węzła, w tym strat czasu ponoszonych przez pieszych i pasażerów. W dalszej kolejności można analizować czasy potrzebne do dokonania przesiadki dla różnych relacji pomiędzy przystankami tramwajowymi lub tramwajowymi i autobusowymi. Uzyskano również czasy dotarcia z otoczenia do przystanków, co służy do oceny dostępności węzła. Dodatkowo rejestrowano zachowania pasażerów:

- przyczyny ponoszonych strat czasu (sygnalizacja świetlna, zakup biletu, inne zakupy, konflikt ruchowy);
- sposób pokonywania różnic wysokości (schody ruchome [1], schody zwykłe, winda, pochylnia).

Ostatecznie w tym artykule zamieszczono tylko analizę strat czasu i ich wpływu na czasy przejść na węźle, a w konsekwencji na jakość dokonywanej przesiadki. Pozwoli to ocenić zasadność funkcjonowania sygnalizacji świetlnej na dolnym poziomie.

2. ANALIZA CZASÓW PRZEJŚĆ

Analiza została przeprowadzona dla przemieszczeń zestawionych w kilku grupach. Z geometrii węzła wynika, że w trzech miejscach znajdują się przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Osoby przechodzące przez węzeł w różnych relacjach mogą natrafić na 1, 2 lub 3 przejścia i doznać tam straty czasu oczekując na sygnale czerwonym. Z kolei niektóre relacje przechodzą nie napotykając na przejścia z sygnalizacją. Dlatego wszystkie przemieszczenia zostały podzielone na 4 grupy. Struktura pomierzonych przemieszczeń jest następująca:

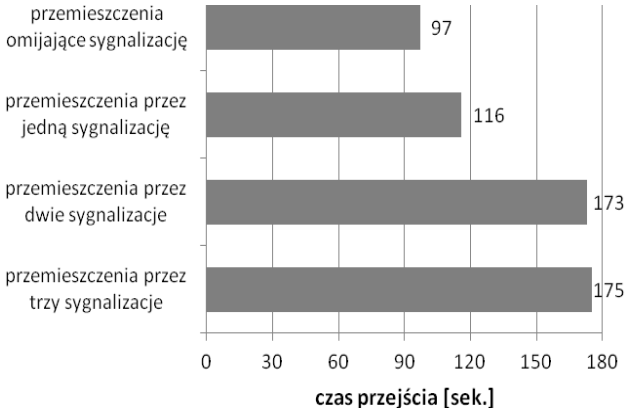
- omijające sygnalizację świetlną 27,5 %
- przechodzące przez jedną sygnalizację 53,7 %
- przechodzące przez dwie sygnalizacje 17,5 %
- przechodzące przez trzy sygnalizacje 1,3 %

Liczebność ostatniej grupy jest bardzo niska, dlatego jej analiza nie jest miarodajna.

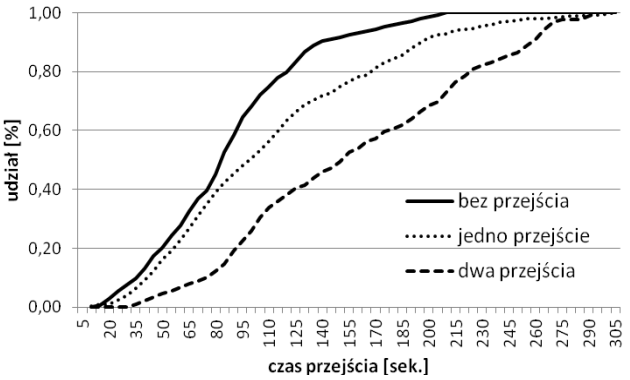
Wśród osób przechodzących przez jedno przejście dla pieszych: 57 % nie doznało zakłóceń, a pozostałe 43 % zatrzymało się na sygnalizacji. Sytuacja gwałtownie pogarsza się wśród osób, które przechodzą przez dwa przejścia: tylko 30 % nie doznało zakłóceń, 43 % zatrzymało się na jednym przejściu, a 24 % na dwóch przejściach. Wraz z koniecznością przekroczenia większej liczby przejść z sygnalizacją wyraźnie wzrasta prawdopodobieństwo zatrzymania na sygnale czerwonym. Konsekwencją tego jest wydłużenie czasu przejścia pomiędzy przystankami.

Na Rys. 2 przedstawiono średnie czasy przejścia w poszczególnych grupach. Oczywiście najkrótsze czasy przejścia występują dla relacji omijających sygnalizację i wynoszą średnio 97 sek. Konieczność pokonania jednej sygnalizacji wydłuża ten czas o 20 sek., a dwóch sygnalizacji prawie o 80 sek. W Tab. 1 zestawiono parametry statystyczne charakteryzujące czasy przejścia, tj. liczebność, średnią, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz kwantyle k_5 i k_{95}. Pokazują one skalę zakłóceń, wywołanych przez przejścia z sygnalizacją. Analizowane czasy przejścia charakteryzują się dużą zmiennością – współczynniki zmienności są wysokie i wynoszą od 0,4 do 0,7. Jest to związane z kilkoma czynnikami:

- piesi mają bardzo różne prędkości przemieszczania się, co jest związane z ich wiekiem, motywacją i pilnością podróży, znajomością rozkładu jazdy, itp.;
- istnieją różnice w odległościach pomiędzy przystankami;
- zachowania pieszych, którzy są gotowi wyraźnie przyspieszyć widząc sygnał zielony lub tramwaj na przystanku;
- występują zakłócenia związane z natężeniem ruchu pieszego i rowerowego, wzrastające znacznie w godzinach szczytu;
- obecność sygnalizacji, na której pieszy może stracić od 0 sek. do 3 min. (w skali całego węzła).



Rys. 2. *Średnie czasy przejścia przez węzeł [sek.]*



Rys. 3. *Dystrybuanta czasu przejścia przez węzeł dla wszystkich przemieszczeń*

Niższe wartości współczynników zmienności można otrzymać analizując przesiadki w grupach przystanków o podobnych odległościach (przykładowo przesiadki tramwaj-tramwaj lub autobus-tramwaj).

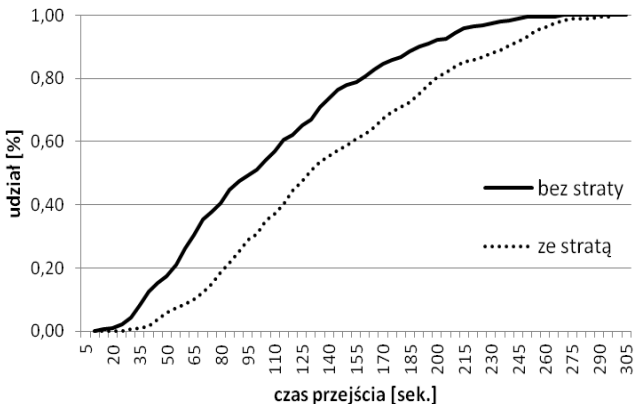
Na Rys. 3 przedstawiono dystrybuanty czasu przejścia dla trzech analizowanych grup przemieszczeń: przechodzących przez

Tab. 1. *Charakterystyka czasów przejścia dla różnych przemieszczeń*

Rodzaj relacji	Liczebność	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Kwantyl k_5	Kwantyl k_{95}
Omijające sygnalizację świetlną	146	97	67	0,70	28	187
Przechodzące przez jedną sygnalizację						
- bez zatrzymania	162	104	66	0,63	30	219
- z jednym zatrzymaniem	123	133	60	0,45	47	242
- wszystkie	285	116	65	0,56	37	239
Przechodzące przez dwie sygnalizacje						
- bez zatrzymania	28	131	71	0,54	53	275
- z jednym zatrzymaniem	43	164	65	0,40	75	272
- z dwoma zatrzymaniami	22	244	100	0,41	97	418
- wszystkie	93	173	66	0,38	37	242
Przechodzące przez trzy sygnalizacje						
- wszystkie	7	175	88	0,51	55	281

jedno, przez dwa przejścia oraz omijające przejścia dla pieszych. Widoczne jest wyraźne wydłużenie czasu w przypadku konieczności przechodzenia przez dwa przejścia.

W celu zobrazowania wpływu sygnalizacji na Rys. 4 zestawiono dystrybuanty czasu przejścia tylko dla przemieszczeń, które zostały zatrzymane na przejściach dla pieszych, czyli doznały straty czasu. Od kwantyla k_{20} widoczny jest wyraźny wpływ zakłóceń - sygnalizacja wydłuża czas przejścia o ok. 30 sek.



Rys. 4. *Dystrybuanta czasu przejścia przez węzeł tylko dla przemieszczeń z zakłóceniami*

Wykonano również estymację przedziałową dla różnych relacji, a w Tab. 2 zestawiono granice przedziałów ufności dla poziomu ufności równego 0,95. Błąd oszacowania dla różnych relacji wynosi:

- omijające sygnalizację świetlną 10,3 %
- przechodzące przez jedną sygnalizację 6,9 %
- przechodzące przez dwie sygnalizacje 10,4 %

Błąd oszacowania wyraźnie wzrasta wraz ze spadkiem liczebności próby.

Tab. 2. *Charakterystyka przedziałów ufności dla różnych relacji*

Rodzaj relacji	Dolna granica przedziału	Średnia	Górna granica przedziału
Omijające sygnalizację			
- wszystkie	87	97	107
Przechodzące przez jedną sygnalizacje			
- bez zatrzymania	94	104	114
- z 1 zatrzymaniem	123	133	143
- wszystkie	108	116	124
Przechodzące przez dwie sygnalizacje			
- bez zatrzymania	104	131	158
- z 1 zatrzymaniem	144	164	184
- z 2 zatrzymaniami	200	244	288
- wszystkie	155	173	191

Można również przedstawić inną strukturę pomierzonych przemieszczeń:

- bez zatrzymań 63,9 %
- z jednym zatrzymaniem 32,8 %
- z dwoma zatrzymaniami 4,3 %

Średnie przejście bez zatrzymań trwa 103 sek., jedno zatrzymanie wydłuża go do 142 sek., a dwa zatrzymania aż do 244 sek. Szansa na dwukrotne zatrzymanie na światłach jest niska (tylko 4,3 % przemieszczeń), jednak wydłuża to czas przejścia o ponad 100 %. Dla pasażera przechodzącego przez dwa przejścia dla pieszych sprawność przesiadki jest niska. Powinien on przeznaczyć 4 min. na przejście, chociaż może zmieścić się w 2 min.

Analizując geometrię węzła, zamieszczoną na Rys. 1, można zauważyć bardzo nierównomierne rozłożenie celów, do których zmierzają pasażerowie, co przedstawiono w Tab.3. Jest to ściśle związane z przebiegiem najpopularniejszych linii komunikacyjnych oraz z zagospodarowaniem otoczenia.

Tab. 3. *Rozkład przemieszczeń do różnych sektorów węzła*

Nazwa sektora	Udział przemieszczeń [%]	Udział przemieszczeń z zatrzymaniami [%]
Sektor S1	42	44
Sektor S2	35	30
Sektor S3	18	22
Sektor S4	5	4
SUMA	100	100

Sektory, na które został podzielony węzeł przesiadkowy można scharakteryzować następująco:

- w sektorze S1 znajdują się dwa przystanki tramwajowe i dwa autobusowe oraz intensywne zagospodarowanie (dużo miejsc pracy i wyższa uczelnia);
- w sektorze S2: dwa przystanki tramwajowe, jeden autobusowy oraz intensywne zagospodarowanie (dużo miejsc pracy);
- w sektorze S3: jeden przystanek tramwajowy i jeden autobusowy i mała ilość zabudowy;
- w sektorze S4: jeden przystanek autobusowy i mała ilość zabudowy.

Przemieszczenia związane z przystankami tramwajowymi rozłożyły się równomiernie pomiędzy trzy obszary, w których znajdują się te przystanki. Prawie wszystkie przemieszczenia związane z przystankami autobusowymi (aż 80 %) rozpoczynają się lub kończą w sektorze S1. Z kolei wśród ludzi, którzy kierują się do okolicznej zabudowy, dominują cele położone w sektorach S1 i S2 (83 % celów).

Można również wyznaczyć, jaka część przemieszczeń skierowanych do każdego sektora doznała zatrzymań:

- do sektora S1 53 %
- do sektora S2 43 %
- do sektora S3 58 %
- do sektora S4 42 %
- średnio 50 %

Najtrudniej dostępny jest przystanek tramwajowy położony w sektorze S3. Wiele zmierzających do niego relacji musi przekroczyć dwa przejścia dla pieszych, co skutkuje najwyższymi czasami przejścia.

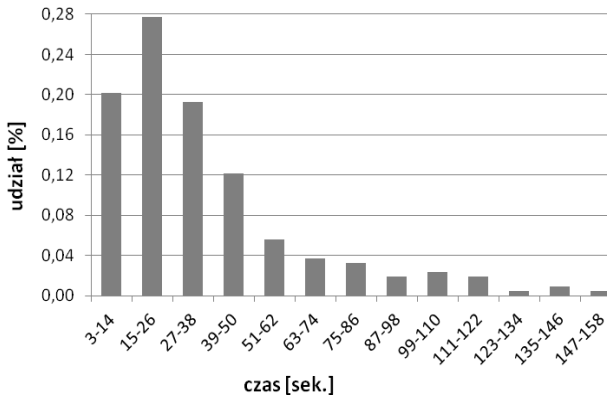
3. ANALIZA STRAT CZASU

Stratę czasu towarzyszącą przechodzeniu przez węzeł można rozpatrywać w dwóch aspektach. Pierwszym jest wielkość straty czasu, ponoszona na pojedynczym przejściu dla pieszych z sygnalizacją. Może ona być przydatna do oceny wpływu przejścia na przesiadkę na wielu skrzyżowaniach. Drugim aspektem jest strata czasu, ponoszona w trakcie przemieszczania się w różnych relacjach. Jest to suma strat z różnych przejść dla pieszych (jednego, dwóch lub trzech). Jest ona zależna od geometrii konkretnego skrzyżowania i wzajemnego układu jezdni i przejść dla pieszych. Średnia strata czasu na pojedynczym przejściu dla pieszych wynosi 37 sek. przy błędzie oszacowania wynoszącym 11 % (na poziomie ufności równym 0,95). Natomiast średnia strata ponoszona podczas przechodzenia przez węzeł wynosi 42 sek. przy błędzie oszacowania 12 %. Rozpiętość straty jest bardzo duża od 3 sek. aż do 2 min., chociaż 4 % przemieszczeń doznaje stratę sięgającą aż 3 min. Jest to związane z faktem, że pasażer może natrafić na światło czerwone na 1, 2 lub 3 przejściach oraz z dużą nieprzewidywalnością, w którym momencie cyklu sygnalizacyjnego to się zdarzy (początek lub koniec sygnału czerwonego). Dla relacji przechodzących przez

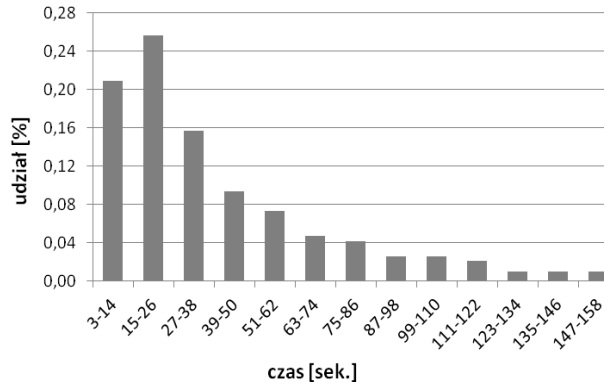
jedno przejście średnia strata czasu wynosi 33 sek., a przy dwóch przejściach 53 sek. (Tab. 4). Współczynnik zmienności jest bardzo wysoki (wynosi od 0,77 do 0,85), co jest związane z powyższymi czynnikami. Na Rys. 4 i Rys. 5 przedstawiono rozkłady strat czasu. Ostatecznie można stwierdzić, że obecność sygnalizacji znacznie obniża funkcjonalność i efektywność przesiadki, bowiem pasażer powinien zarezerwować na przejścia dla pieszych dodatkowe 2 minuty, jeżeli chce mieć pewność, że zdąży na następny pojazd.

Tab. 4. *Charakterystyka strat czasu generowanych podczas przemieszczeń*

Parametr	Przemieszczenia przez jedną sygnalizację	Przemieszczenia przez dwie sygnalizacje
Liczebność	123	65
Średnia	33	53
Odchylenie standardowe	28	40
Współczynnik zmienności	0,85	0,77
Kwantyl k_5	6	7
Kwantyl k_{95}	99	143



Rys. 4. *Rozkład strat czasu ponoszonych na pojedynczym przejściu dla pieszych*



Rys. 5. *Rozkład strat czasu ponoszonych przy przejściu przez węzeł*

PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano analizę wpływu przejścia z sygnalizacją świetlną na efektywność przesiadki. Przy przekraczaniu jednego przejścia 40 % użytkowników doznało w tym miejscu straty czasu, a przy dwóch przejściach aż 70 %. Konieczność pokonania dwóch przejść znacznie zwiększa prawdopodobieństwo zatrzymania na sygnale czerwonym i wydłużenia czasu przesiadki. Na analizowanym węźle średni czas przejścia pomiędzy przystankami (bez zakłóceń) wynosi 2 min. Jedno zatrzymanie wydłuża go o 40 %, a dwa zatrzymania o ponad 100 %. Jeżeli pasażer chce mieć pewność, że zdąży na pojazd następnej linii, to powinien w takiej sytuacji zaplanować czas przejścia dłuższy o 2 min. Średnia strata czasu na pojedynczym przejściu dla pieszych wynosi 37 sek. i może być pomocna przy ocenie przesiadki w wielu miejscach. Wielkość strat związanych z koniecznością przejścia przez dwie sygnalizacje jest bardziej złożona i ma związek z geometrią węzła.

Obecność sygnalizacji na przecięciu tylko z ruchem tramwajowym staje się problematyczna w sytuacji, w której generuje to konieczność zaplanowania dwukrotnie dłuższego czasu przejścia pomiędzy przystankami.

Nawet niezakłócone czasy przejścia charakteryzują się dużą zmiennością, co jest związane z dużymi różnicami w predyspozycjach pieszych.

BIBLIOGRAFIA

1. Dźwigoń W.: *Efficiency of escalators in public transport,* Logistyka, vol. 4, pp. 2781 – 2789 2014.
2. Dźwigoń, W.: *Kryterium oceny bezpieczeństwa w ocenie węzłów przesiadkowych,* Transport Miejski i Regionalny nr 6/2012.
3. Gaca S., Suchorzewski W. Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka,* WKiŁ, Warszawa 2008.
4. Husarek P., Palus W.: *Analiza funkcjonowania węzłów przesiadkowych w transporcie zbiorowym.* Transport Miejski i Regionalny nr 11/2005.
5. Krukowski P., Olszewski P.: *Wskaźnikowa metoda oceny węzłów przesiadkowych transportu publicznego,* VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego", Poznań-Rosnówko 2011.
6. Rudnicki A.: *Jakość komunikacji miejskiej,.* Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji, Kraków 1999.
7. Starowicz W.: *Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym,* Kraków 2007.

The Losses of time related to the change of the transport means at the interchange node

The article presents an analysis of the change of the transport means made on a large two-level interchange node. The part of the change is transition between stops. The article discusses the scope of the measurements, which in this case include pedestrian traffic. The transition time and the time access to the stops constitute the measures of the interchange node availability as well as the element of the assessment of the quality of the public transport operation. The results may be use in the simulation analysis of the interchange node operation. The change of the transport means is accompanied by the uncertainty associated with punctuality of lines running and with the need to cross the road. Well designed infrastructure increases the efficiency of the use of urban public transport.

Autor:
dr inż. **Wiesław Dźwigoń** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Zakład Systemów Komunikacyjnych, wdzwigon@pk.edu.pl