

Kazimierz Jamroz, Krystian Birr, Jacek Zarembki

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej

METODY OCENY EFEKTYWNOŚCI MIEJSKICH SYSTEMÓW STEROWANIA RUCHEM

Rękopis dostarczono: kwiecień 2016

Streszczenie: Rozwijające się duże miasta borykają się ze wzrostem zatłoczenia motoryzacyjnego. Celem usprawnienia sieci transportowej duże miasta, w tym również kilka miast polskich decyduje się na wdrożenie narzędzia, które umożliwi im efektywne zarządzanie i sterowanie ruchem. Jeden z takich systemów został wdrożony w Trójmieście w grudniu 2015 roku. W niniejszym referacie przedstawiono metody oceny efektywności miejskich systemów sterowania, które zostały wykorzystane do oceny efektywności Zintegrowanego Systemu Sterowania Ruchem TRISTAR w Trójmieście. Metody te uwzględniają zarówno klasyczne pomiary terenowe wielkości i warunków ruchu, jak i wykorzystują nowoczesne rozwiązania informatyczne w postaci specjalistycznego oprogramowania umożliwiającego przeprowadzenie symulacji ruchu z różnym poziomem szczegółowości. Uwzględniając obie z tych metod przedstawionych metod możliwe jest dokonanie kompleksowej oceny systemu w odniesieniu do różnych scenariuszy pod względem rozwoju miasta, jak i zmian natężenia ruchu zarówno w zakresie transportu indywidualnego, jak i zbiorowego.

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem, inteligentne systemy transportowe

1. WPROWADZENIE

Nowoczesne zarządzanie miastem, zarówno na poziomie prowadzenia prac planistycznych i podejmowania decyzji strategicznych w zakresie rozwoju systemu transportowego, jak i na poziomie decyzji operacyjnych dotyczących na przykład organizacji ruchu, wymaga zastosowania coraz lepszych i nowocześniejszych narzędzi. Technologie korzystające z telematyki transportu oferują narzędzia służące wzmocnieniu systemów transportowych w miastach poprzez oddziaływanie na zmiany zachowań transportowych mieszkańców, racjonalizację wykorzystania istniejącej infrastruktury oraz zwiększenie jej niezawodności przy jednoczesnej redukcji kosztów funkcjonowania transportu.

Zastosowanie Inteligentnych Systemów Transportu (Intelligent Transportation Systems – ITS) jest jednym ze sposobów doskonalenia systemów transportowych w celu zwiększenia ich sprawności, efektywności i bezpieczeństwa. ITS dostarczają szerokiego wachlarza narzędzi począwszy od zaawansowanych systemów sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji świetlnej do systemów ostrzegania o możliwości wystąpienia wypadku. Z wieloletnich badań prowadzonych w USA, Japonii i Europie wynika, że najczęściej wymienianymi celami stosowania systemów ITS w miastach (lub miejskich systemów sterowania ruchem jako elementów systemów ITS) są [7], [9], [4]:

- zwiększenie przepustowości istniejącej infrastruktury transportowej nawet o 20% sprawności sieci transportowych bez konieczności wykonywania inwestycji drogowych, a tym samym zmniejszenie nakładów na infrastrukturę transportową nawet o 30 – 35 %, przy uzyskaniu tych samych efektów poprawy sprawności systemu, jak w przypadku budowy nowych odcinków dróg lub modernizacji dróg istniejących,
- poprawa warunków ruchu pojazdów, na przykład zastosowanie sygnalizacji świetlnej powoduje redukcję strat czasu do 48%, a za zastosowanie systemów zarządzania zdarzeniami drogowymi powoduje zredukowanie strat czasu nawet o 45%,
- skrócenie czasu (nawet o 30 %) i poprawa komfortu podróży uczestników ruchu i podróżnych (zmniejszenie liczby zatrzymań, nawet o 60 % w przypadku nowych systemów zarządzania ruchem, wzrost punktualności pojazdów transportu zbiorowego nawet o 59% w godzinach szczytowych),
- poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego, znaczna redukcja ofiar wypadków (do 80 %) przy zastosowaniu systemów zarządzania prędkością i systemów wykrywania zdarzeń drogowych,
- zmniejszenie ujemnego wpływu transportu na środowisko naturalne, zastosowanie środków ITS pozwala na redukcję zatłoczenia wpływają również na redukcję emisji spalin w granicach 30 – 50 %.

Zastosowanie nowoczesnych technologii wykorzystujących instrumenty Inteligentnych Systemów Transportu pozwala ponadto na usprawnienie sfery operacyjnej w zarządzaniu ruchem, ale również może wspomagać działania związane z planowaniem systemów transportu i projektowaniem bieżących rozwiązań organizacji ruchu. Ponadto zastosowanie ITS pozwala na redukcję kosztów związanych z zarządzaniem taborem drogowym oraz bardziej efektywne jego wykorzystanie. Zainteresowanie tą grupą celów wykazywać będą przede wszystkim przedsiębiorstwa transportowe funkcjonujące na danym obszarze.

Efektywność ekonomiczna zastosowanych systemów jest bardzo istotnym czynnikiem przemawiającym za zasadnością stosowania systemów ITS. Już w pierwszym lub ewentualnie w drugim roku funkcjonowania systemu oszczędności ekonomiczne przekraczają koszty budowy i utrzymania zbudowanego systemu zarządzania ruchem miejskim. W przypadku systemów miejskich stosunek zysków do kosztów liczony w ciągu okresu 10 lat wynosi od 1,7 – 34,0, przy czym największą rentownością wykazują się systemy sterowania ruchem na skrzyżowaniach i obszarach miejskich [6].

Z powyższego wynika, że wiedza o skuteczności i efektywności zbudowanych (a także ITS) niezbędna jest do:

- podejmowania decyzji o podjęciu procesu budowy Inteligentnego Systemu Transportu lub zaawansowanych systemów zarządzania ruchem miejskim,
- doboru celów automatycznego zarządzania ruchem i przewozami,
- doboru szczegółowych metod oraz środków i struktury sterowania ruchem,
- oceny funkcjonowania zastosowanego systemu.



2. PRZEGLĄD METOD OCENY EFEKTYWNOŚCI STOSOWANIA SYSTEMÓW STEROWANIA RUCHEM

Z przedstawionej we wstępie ogólnej analizy efektywności systemów sterowania ruchem wynika, że systemy te przynoszą bardzo duże efekty już w krótkim czasie po ich zainstalowaniu. Efektywność tych systemów, traktowanych jako inwestycje nieprodukcyjne (nie przyczyniające się do bezpośredniej produkcji towarów) ocenia się w większości przypadków poprzez porównanie wybranych wskaźników, zwanych miarami oceny efektywności przed i po zainstalowaniu systemu.

Miary oceny efektywności (MOE) są to wskaźniki oceny działania systemów transportowych lub ich elementów. Stosuje się je do określenia korzyści przy ocenie różnych wariantów zastosowanych usprawnień. W historii stosowania tych wskaźników nie wiele uległo zmianie, wystarczy wymienić jedną z pierwszych klasyfikacji MOE, w której wymieniono pięć kryteriów: ruchowe (natężenie ruchu, praca przewozowa, prędkość itp.), bezpieczeństwa (liczba wypadków i ofiar wypadków), komfort jazdy (liczba zatrzymań, zmiany prędkości itp.), ekonomiczne (koszty czasu podróży, strat czasu, zatłoczenia, zużycia paliwa itp.), wpływu na środowisko (emisja spalin, poziom hałasu itp.) [5]. Wiele z tych wskaźników stosuje się do dnia dzisiejszego.

Nie mniej pojawiają się także nowe MOE służące do oceny funkcji operacyjnych działania systemu zarządzania ruchem takie jak: miary skuteczności systemu w spełnianiu postawionych mu wymagań funkcjonalnych (zmniejszenie czasu podróży, zwiększenie udziału pasażerów transportu zbiorowego, zmniejszenie liczby wystąpień i wielkości zatorów drogowych, zmniejszenie liczby przekroczeń dozwolonej prędkości i zwiększenie płynności przejazdu, zmniejszenie średnich długości kolejek pojazdów, zmniejszenie strat czasu, zmniejszenie liczby wypadków i ich ciężkości itp.). Natomiast do oceny funkcjonowania systemów zarządzania ruchem w stanie rzeczywistym mogą być stosowane miary wydajności systemu w celu zapewnienia skuteczności systemu w realizacji swoich celów i zadań (zgodność i szybkość działania systemu „doradcy” drogowego, np. o liczbie wolnych miejsc parkingowych, optymalnej trasie itp., szybkość wykrywania incydentów, udział fałszywych alarmów o zdarzeniach itp.).

Każda z tych miar może posłużyć do oceny spełnienia czterech podstawowych wymagań funkcjonalnych zaawansowanego systemu sterowania ruchem wyposażonego w system ostrzegania i kontroli ruchu, a mianowicie: sprawność i efektywność nadzoru, ostrzegania i reakcji na zdarzenia drogowe, prawidłowość i szybkość przekazywania informacji doradczych do kierowców, a także poziom dokładności funkcji kontrolnych. Dodatkowo, te miary pozwalają na określenie rzeczywistego wpływu systemu na warunki podróżowania po danym obszarze.

Stosując MOE do oceny skuteczności funkcjonowania systemu zarządzania ruchem bazuje się najczęściej na metodach porównawczych, w których poziom spełnienia wymagań funkcji może być skutecznie określany na podstawie porównania stanów funkcjonowania ocenianego systemu "przed" i "po" wdrożeniu systemu.

Dotychczasowe publikacje w zakresie oceny efektywności systemu sterowania ruchem prezentują zróżnicowane podejście metodologiczne. Praktycznie możemy wyróżnić trzy grupy metod oceny efektywności systemów zarządzania ruchem:



- metody analogowe,
- metody symulacyjne,
- metody bazujące na badaniach terenowych.

Wybór metody zależy od dostępnych danych do oceny oraz wymaganej dokładności oszacowania MOE, która może wynosić [4]:

- 15 – 20 % na etapie planowania,
- 3 – 5 % na etapie projektowania,
- 0,5 – 1 % na etapie oceny powykonawczej (po uruchomieniu systemu).

Poniżej przedstawiono charakterystykę wymienionych metod wraz z wskazaniem możliwości ich wykorzystania na przykładzie prac badawczych, studialnych i projektowych prowadzonych przez autorów niniejszego opracowania.

Metody analogowe szacowania skuteczności i efektywności systemów sterowania ruchem polegają na przyjęciu jednostkowych MOE uzyskanych z podobnych (analogicznych) systemów sterowania ruchem w innym mieście. Wskaźniki MOE przyjmuje się dla badanych elementów systemu (skrzyżowaniu ulic, ciągu ulicznym, sieci ulic), które mają podobne charakterystyki (klasa ulicy, jej funkcja, otoczenie). Metody te są stosowane na wczesnych etapach planowania i projektowania systemów sterowania ruchem, kiedy wymagana jest mała dokładność oszacowania MOE.

Metody ta była wykorzystywana między innymi na etapie planowania systemów sterowania ruchem miejskim w Gdańsku, Gdyni [6] i w Sopocie oraz sterowania ruchem drogowym na Obwodnicy Trójmiasta [10]. Do szacowania efektywności przyjmowano MOE pozyskane z studiów literatury dla miast i tras drogowych o podobnej charakterystyce.

Metody symulacyjne stosowane do szacowania skuteczności i efektywności systemów sterowania ruchem miejskim obejmują zastosowanie modeli symulacyjnych do odwzorowania funkcjonowania sieci ulic zarówno w stanie przed i po zainstalowaniu systemu sterowania ruchem. Istnieje wiele narzędzi umożliwiających symulowanie ruchu pojazdów w sieci ulic:

- dedykowane, służące głównie dla celów planowania, projektowania i ocenie skuteczności systemów sterowania ruchem drogowym, np. programy: TRANSYT,
- ogólne, służące do planowania, projektowania, oceny skuteczności oraz wizualizacji pracy sieci drogowej w różnych wariantach organizacji ruchu w tym także różnych wariantów sterowania ruchem, np. programy: SATURN, VISSIM, ponadto pakiety tych programów były i są wykorzystywane do prowadzenia badań naukowych.

Metody bazujące na badaniach terenowych polegają na prowadzeniu badań wybranych parametrów ruchu metoda „przed” i „po”. W tych metodach wykorzystuje się badania terenowe do określenia wybranych do oceny parametrów ruchu (czas przejazdu, prędkość przejazdu, straty czasu, liczba zatrzymań itp.) dla wybranych okresów ruchu (np. szczyt poranny, szczyt popołudniowy, kres między szczytami i okres poza szczytowy). Następnie na podstawie danych o wielkości ruchu (natężenie ruchu, napełnienie pojazdów) rozszerza się próbę uzyskując summaryczne wielkości szacowanych MOE. Przykład zastosowania omawianej metody do oceny efektywności systemu sterowania ruchem TRISTAR przedstawiono w dalszej części niniejszej pracy [3].

Nie zawsze możliwe są do pozyskania MOE z okresu „przed” budową systemu sterowania ruchem. Wówczas w trakcie prowadzenia badań dla stanu „po” symuluje się w rzeczywistości funkcjonowanie systemu w stanie „przed” i prowadzi badania wskaźników



MOE. Z takim przypadkiem mieliśmy do czynienia w trakcie badań efektywności Systemu Sterowania Ruchem Ulicznym EYSSA w Warszawie w 1978 roku. Nie przeprowadzono badań wskaźników MOE dla stanu „przed” wprowadzeniem systemu, zatem zasymulowano układ sterowania (brak koordynacji sygnalizacji) jak dla przed i przeprowadzono odpowiednie badania [4].

Dla zilustrowania omawianych zagadnień w niniejszym referacie przedstawiono metodykę oceny efektywności Zintegrowanego Systemu Sterowania Ruchem „TRISTAR” w Trójmieście.

3. BADANIA EFEKTYWNOŚCI SYSTEMU TRISTAR

3.1 CHARAKTERYSTYKA POLIGONU BADAWCZEGO

Mając na uwadze, wymienione we wstępie, korzyści z systemów ITS, Miasta Aglomeracji Trójmiejskiej również podjęły działania mające na celu wdrożenie takiego systemu. Pierwsze koncepcyjne prace nad strukturą systemu zarządzania ruchem TRISTAR (TRójmiejski Inteligentny System Transportu Aglomeracyjnego) rozpoczęły się w roku 2002. Powstały wówczas koncepcje zintegrowanego systemu dla Obwodnicy Trójmiejskiej oraz dla miasta Gdyni, a potem dla Gdańsk i Sopotu opracowane przez zespół Katedry Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej. Opracowane koncepcje przyczyniły się do kontynuacji działań, mających na celu wdrożenie systemu. W roku 2006 prezydenci Gdańska, Gdyni i Sopotu podpisali porozumienie o podjęciu wspólnych działań, zmierzających do przygotowania wniosku o dofinansowanie zewnętrzne na budowę systemu, co stanowiło podstawę do rozpoczęcia współpracy służb poszczególnych miast w celu osiągnięcia założonego celu. W roku 2007 na bazie porozumienia, opracowano koncepcję szczegółową systemu TRISTAR [3]. W założeniach docelowo system obejmie wszystkie ciągi Trójmiasta wyposażone w sygnalizację świetlną oraz zostanie zintegrowany z planowanymi systemami na drogach ekspresowych (Obwodnica Trójmiasta, Obwodnica Południowa), jak również z portami lotniczymi, koleją oraz portami morskimi na terenie Trójmiasta.

Opracowane dokumentacje pozwoliły na aplikowanie o środki UE na budowę I etapu systemu TRISTAR obejmującego około 35 % planowanej sieci ulic, skupiając się w pierwszej kolejności na najbardziej newralgicznych (centralnych) obszarach miast. Budowę I etapu systemu rozpoczęto na jesieni 2011 roku i zakończono w 2015 roku. Pierwszy etap budowy systemu TRISTAR (obejmuje I i II etap rozwoju systemu z etapowania przedstawionego na rys. 1), obejmował podstawowy układ uliczny Trójmiasta z 150 skrzyżowaniami i przejściami dla pieszych, wyposażonych w sygnalizację świetlną, infrastrukturę połączeń systemowych o długości ok. 100 km, montażem ok. 60 kamer nadzoru wizyjnego, ok. 60 kamer identyfikacji pojazdów, ok. 70 tablic informacji przystankowej, ponad 20 znaków i tablic zmiennej treści oraz wyposażeniem prawie 700



pojazdów transportu zbiorowego w nadajniki pozycji i komputery pokładowe, budowę dwóch centrów sterowania (w Gdańsku i w Gdyni) [3].

Takie środki sterowania pozwalają na realizację następujących funkcji:

- zarządzanie ruchem ulicznym poprzez sterowanie ruchem pojazdów za pomocą sygnalizacji świetlnej, stosowanie priorytetów dla pojazdów transportu zbiorowego, informowanie kierowców o warunkach ruchu, dynamiczną informację parkingową, nadzór nad ruchem,
- zarządzanie ruchem pojazdów transportu zbiorowego poprzez aktywny nadzór nad ruchem pojazdów transportu zbiorowego, dynamiczną informację dla pasażerów w pojazdach i na przystankach.

3.2 OPIS BADAŃ

Celem oceny efektywności wdrożenia inteligentnego systemu sterowania ruchem TRISTAR w Trójmieście wykonano szereg pomiarów, badań terenowych, jak i symulacyjnych, stanowiących bazę do określenia zmian w funkcjonowaniu systemu transportowego. Badania te można podzielić na dwa rodzaje:

- terenowe – przeprowadzane w terenie w pojazdach, na skrzyżowaniach i w przekrojach dróg,
- symulacyjne – bazujące na procesach obliczeniowych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania, odwzorowujących stan rzeczywisty.

Badania terenowe. Za punkt odniesienia do oceny efektywności systemu posłużyły badania przeprowadzone przed jego wdrożeniem (rok 2012). Następnie po uruchomieniu systemu wykonano badania terenowe w tym samym zakresie (rok 2015) [3].

Badania terenowe dla transportu indywidualnego „przed” wdrożeniem systemu obejmowały pomiary natężenia, struktury rodzajowej i kierunkowej na wszystkich skrzyżowaniach objętych systemem w ciągu dnia (godz. 6-20). Badania prowadzono metodą obserwacji z zewnątrz. Badania „po” prowadzono metodą rejestracji ruchu drogowego na skrzyżowaniach kamerami redukując ilość skrzyżowań i okres pomiaru, zliczanie pojazdów następowało podczas prac kameralnych. Przeprowadzono, także całodobowe badania natężeń ruchu kołowego w przekrojach ulic, które prowadzono metodami automatycznymi. Badania te są niezbędne były do określenia współczynników rozszerzających próbę do okresu doby.

Do uzyskania danych o podstawowych wskaźnikach MOE (czas przejazdu, prędkość przejazdu, straty czasu) przeprowadzono badania czasu przejazdu samochodem osobowym w czterech charakterystycznych okresach w ciągu doby: w okresie szczytu porannego, szczytu popołudniowego, okresie międzyszczytowym oraz w okresie nocnym. Badanie czasu przejazdu samochodem prowadzono dokładnie w takim samym zakresie przed i po wdrożeniu systemu TRISTAR. Badanie czasu przejazdu prowadzono metodą „unoszenia pojazdu testowego przez potok” na wszystkich ciągach objętych I etapem budowy systemu. Metoda ta polega na wielokrotnym przejechaniu badanego odcinka przez pojazd testowy prowadzony przez kierowcę z prędkością zbliżoną do innych pojazdów jadących w kolumnie. Pojazd włączał się do ruchu wcześniej, w pewnej odległości od początku odcinka. Chwilę przejazdu pojazdu przez wybrany przekrój będący początkiem odcinka



pomiarowego (linia zatrzymań lub przejście dla pieszych na skrzyżowaniu) traktowano jako czas rozpoczęcia pomiaru.

Na podstawie przeprowadzonych badań obliczano dla każdego ciągu ulicznego oraz dla każdego miasta następujące MOE:

- średni czas przejazdu samochodem osobowym TPSo,
- średnie natężenie ruchu No,
- pracę przewozową PPO,
- sumaryczny czas przejazdu samochodem osobowym STPO,
- średnią prędkość podróży samochodem osobowym VPSO.

Badania terenowe w zakresie transportu zbiorowego obejmowały pomiary napełnień i czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego przed i po uruchomieniu systemu na wszystkich liniach miejskiego transportu zbiorowego na odcinkach objętych systemem oraz odcinkach dojazdowych. Pomiary „przed” wykonano w okresie maj – czerwiec 2012 roku, zaś pomiary „po” wykonano w okresie październik – listopad 2015 roku. Zakresem pomiarów, zgodnie ze specyfikacją zadania, objęto 25% kursów na poszczególnych liniach transportu zbiorowego w analizowanych okrasach czasu lub 100% kursów w przypadku, gdy częstotliwość kursowania pojazdów na danej linii była mniejsza lub równa 60 minut

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczono:

Na podstawie przeprowadzonych badań obliczano dla każdego ciągu ulicznego oraz dla każdego miasta następujące MOE:

- średni czas przejazdu transportem zbiorowym TPSz,
- napełnienie pojazdów transportu zbiorowego Nz,
- pracę przewozową PPz,
- sumaryczny czas przejazdu transportem zbiorowym STPz,
- średnią prędkość podróży transportem zbiorowym VPSz.

Badania symulacyjne. Z uwagi na zmiany wielkości ruchu na poszczególnych odcinkach sieci, wynikające ze zmian zachowań transportowych mieszkańców, rozbudowy sieci transportowej, zmianę oferty przewozowej, jak i niekiedy zmiany organizacji ruchu w ciągu czteroletniego okresu budowy i wdrażania systemu, oprócz badań terenowych wykonano także badania symulacyjne [2].

Do przeprowadzenia badania symulacyjnych w zakresie transportu indywidualnego wykorzystano pakiet do analiz transportowych SATURN – model mezoskopowy. W analizach wykorzystano model, który zbudowano dla potrzeb przeprowadzenia prac planistycznych i projektowych [xx]. Model sieci zarówno pod względem infrastruktury zaktualizowano do stanu istniejącego na grudzień 2015 roku.

W modelu sieci ulicznej uwzględniono liczbę pasów ruchu oraz prędkość w ruchu swobodnym na odcinkach międzywęzłowych, geometrię skrzyżowań (liczba pasów ruchu na wlocie, organizacja ruchu na skrzyżowaniu, natężenie nasycenia poszczególnych pasów ruchu itp.), programy sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach, na których sygnalizacja występuje. Uwzględniono zatem zjawisko zatłoczenia w sieci ulicznej.

Symulacje wykonano dla dwóch wariantów:

- bezinwestycyjnego WO, zakładającego brak wdrożenia systemu, tj. reprezentującego stan przed,



– inwestycyjnego W_n , zakładającego wdrożenie systemu, tj. reprezentującego stan po.

W wariantcie inwestycyjnym założono obszarową i lokalną optymalizację sygnalizacji świetlnej poprzez wykorzystanie w programie SATURN opcji pozwalającej na optymalizację splitów i offsetów sygnalizacji podczas iteracyjnej procedury rozkładu ruchu w sieci. Algorytm bazuje na minimalizacji stopnia nasycenia poszczególnych pasów z uwzględnieniem minimalizacji kolejek, strat czasu i liczby zatrzymań. Optymalizacją objęto sygnalizację świetlną włączone do systemu.

W wariantcie inwestycyjnym, w modelu ruchu uwzględniono wpływ elementów systemu TRISTAR, które mają największy wpływ na warunki ruchu w sieci tzn. System Sterowania Ruchem Drogowym za pomocą sygnalizacji świetlnej oraz System Informacji dla Kierowców za pomocą tablic zmiennej treści. Wpływ Systemu Informacji dla Kierowców uwzględniono poprzez zastosowanie deterministycznej metody rozkładu, która zakłada wiedzę kierowcy na temat bieżących warunków ruchu w sieci (dla takich założeń skalibrowano model dla wariantu inwestycyjnego). Dla wariantu bezinwestycyjnego zastosowano rozkład stochastyczny (brak wiedzy kierowców na temat bieżących warunków ruchu). Do kalibracji modelu wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych w październiku i listopadzie 2015 (natężenia ruchu i czasy przejazdu wyspecyfikowanymi odcinkami dróg, na których wdrożono system TRISTAR).

Do przeprowadzenia badania symulacyjnych w zakresie transportu zbiorowego wykorzystano oprogramowanie VISUM firmy PTV. W analizach wykorzystano model, który zbudowano dla potrzeb analiz planistycznych i projektowych, który poddano aktualizacji do stanu sieci z grudnia 2015 roku.

Na potrzeby oceny efektywności funkcjonowania systemu w wariantcie inwestycyjnym w stosunku do wariantu bezinwestycyjnego przeprowadzono analizy symulacyjne dla obecnego układu sieci w oparciu o wyniki badań PRZED i wyniki badań PO uruchomieniu systemu, zgodnie z opisaną w jednym z poprzednich rozdziałów metodologią. Wyniki analiz pozwoliły na uzyskanie danych do oceny efektywności systemu w zakresie funkcjonowania transportu zbiorowego. Z przeprowadzonych zgodnie z metodologią symulacji do oceny wybrano cztery istotne wskaźniki charakteryzujące stan sieci i funkcjonowanie transportu zbiorowego w każdym z wariantów. Do tych wskaźników zaliczono:

- sumaryczny czas przejazdu, czyli sumaryczny czas jaki wszyscy użytkownicy sieci spędzają w pojazdach transportu zbiorowego wykonując podróże;
- pracę przewozową, czyli sumaryczną odległość jaką pokonują poszczególni użytkownicy sieci w pojazdach transportu zbiorowego;
- średnia prędkość przejazdu pasażerów, czyli prędkość liczona ze średniej odległości przebytej przez użytkowników w pojeździe transportu zbiorowego podczas wykonywania podróży, w stosunku do średniego czasu jazdy w pojazdach transportu zbiorowego, scharakteryzowanego powyżej;
- średni czas jazdy w pojazdach transportu zbiorowego, czyli średni czas jaki użytkownicy sieci spędzają w pojazdach transportu zbiorowego wykonując jakąś podróż. W tym wskaźniku nie ujęto czasu przesiadek, czasu oczekiwania na pojazd itd. celem wykazania rzeczywistego stopnia osiągniętego efektu poprawy czasu i prędkości przejazdu.



3.3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki badań terenowych i symulacyjnych przedstawiono na przykładzie Trasy Średnicowej (ul. Zwycięstwa, ul. Śląska i ul. Morska) w Gdyni.

Transport indywidualny. W tablicy 1 i na rys. 1 zaprezentowano wyniki badań efektywności systemu TRISTAR dla transportu indywidualnego. Zestawienie prezentuje porównanie wyników uzyskanych w badaniach terenowych oraz otrzymanych na podstawie analiz symulacyjnych.

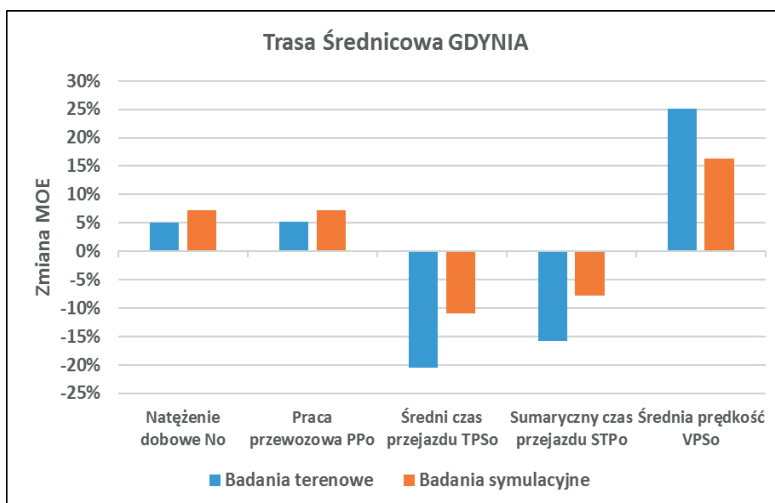
Analiza wyników badań terenowych i symulacyjnych wskazuje, że w wyniku zastosowania systemu TRISTAR uzyskano wyraźną poprawę warunków ruchu ulicznego. Na analizowanym ciągu ulic mimo wzrostu natężenia ruchu nastąpiło skrócenie średniego czasu podróży TPS_o o 20,5 % i tym samym zwiększenie średniej prędkości podróży VPS_o o 25,1 %. Jest to znacznie wyższy efekt niż zakładano przy formułowaniu wymagań przetargowych (uzyskanie skrócenia czasu przejazdu po wyznaczonych trasach o 5,5%).

Widoczna poprawa warunków ruchu skłoniła większą liczbę kierowców do korzystania z tej trasy, co spowodowało zwiększenie natężenia ruchu o 5 % po wybudowaniu i uruchomieniu systemu sterowania ruchem. W wyniku badań symulacyjnych uzyskano nieco gorsze efekty, ale znacznie większe od oczekiwanych.

Tablica 1

**Porównanie wartości wybranych MOE dla Trasy Średnicowej w Gdyni
– transport indywidualny**

Wskaźnik	Jednostka	Badania terenowe			Badania symulacyjne		
		Przed	Po	Zmiana	W0 (przed)	Wn (po)	Zmiana
Natężenie średnio - dobowe No	(P/dobę)	35663	37485	5,1%	30619	32849	7,3%
Praca przewozowa PPO	(tys.Pkm/ dobę)	187,5	197,3	5,3%	183,4	196,8	7,3%
Średni czas przejazdu TPS _o	(min/P)	22,9	18,2	-20,5%	20,3	18,0	-11,0%
Sumaryczny czas przejazdu STPo	(tys.poj. godz)	7,0	5,9	-15,8%	6,4	5,9	-7,7%
Średnia prędkość VPS _o	(km/h)	26,8	33,5	25,1%	28,7	33,4	16,3%



Rys. 1. Wykres zmian wybranych MOE dla transportu indywidualnego na Trasie Średnicowej w Gdyni dla stanu przed i po zainstalowaniu systemu TRISTAR

Badano także inne wskaźniki MOE i stwierdzono, że długości kolejek na wybranych skrzyżowaniach jak i średnie straty czasu na wlotach bocznych do Trasy Średnicowej nie uległy zwiększeniu o wartość większą niż dopuszczalna górna granica określona na poziomie 3%.

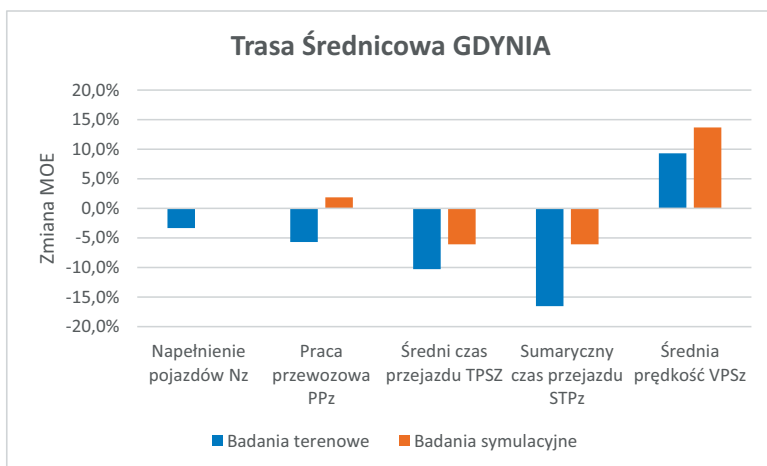
Transport zbiorowy. W tablicy 2 i na rys. 2 zaprezentowano wyniki badań efektywności systemu TRISTAR dla transportu zbiorowego. Zestawienie prezentuje porównanie wyników uzyskanych w badaniach terenowych oraz otrzymanych na podstawie analiz symulacyjnych.

Przedstawiono osobno wyniki na podstawie badań terenowych odniesionych do stanu sprzed uruchomienia systemu oraz na podstawie badań symulacyjnych porównujących wariant inwestycyjny do bezinwestycyjnego w aktualnym okresie czasowym. Analizując uzyskane dane można zauważyć, że osiągnięto poprawę warunków ruchu. Na analizowanym ciągu ulic (trasa Średnicowa w Gdyni) nastąpiło skrócenie średniego czasu podróży TPSz o 9,3 % i tym samym zwiększenie średniej podróży VPSz o 10,3 %. Jest to znacznie wyższy efekt niż zakładano przy formułowaniu wymagań przetargowych (uzyskanie skrócenia czasu przejazdu po wyznaczonych trasach o 7,5%). Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają uzyskane efekty.

Tablica 2

Porównanie wartości wybranych MOE dla Trasy Średnicowej w Gdyni – transport zbiorowy

Wskaźnik	Jednostka	Badania terenowe			Badania symulacyjne		
		Przed	Po	Zmiana	W0 (przed)	Wn (po)	Zmiana
Napełnienie pojazdów Nz	(tys. pas./dobę)	40,28	38,98	-3,3%	-	-	-
Praca przewozowa PPz	(tys. pas.km/dobę)	115,16	108,97	-5,7%	94,59	96,39	1,9%
Średni czas przejazdu TPSz	(min/P)	33,4	30,3	-10,3%	35,2	29,3	-16,6%
Sumaryczny czas przejazdu STPz	(pas. godz)	5,37	4,61	-16,5%	4,58	4,03	-6,1%
Średnia prędkość VPSz	(km/h)	21,45	23,65	9,3%	20,66	23,94	13,7%



Rys. 2. Wykres zmian wybranych MOE dla transportu zbiorowego na Trasie Średnicowej w Gdyni dla stanu przed i po zainstalowaniu systemu TRISTAR

Spośród wszystkich analizowanych ciągów objętych systemem na zdecydowanej większości otrzymano oczekiwaną poprawę warunków ruchu. Na części ciągów jednak, odnotowano mniejsze od oczekiwanego skrócenie średniego czasu przejazdu względem wartości przed uruchomieniem systemu. Sytuacja ta wystąpiła dla odcinków sieci, na których w jakiś sposób zmieniona została organizacja ruchu. Na przykład w Sopocie dla ciągu w ulicy 3 Maja wprowadzona została strefa „tempo 30”; w Gdyni na ciągu ulicy Wielkopolskiej zainstalowano trzy dodatkowe punkty ze sterowaniem sygnalizacją świetlną (skrzyżowania i przejścia dla pieszych); w Gdańsku w ciągu Trasy Średnicowej także zbudowano nowe skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.



4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Duża liczba wdrażanych systemów zarządzania ruchem drogowym i transportem zbiorowym w miastach wymaga zastosowania prawidłowych metod oceny efektywności ich stosowania. Przedstawione w niniejszej pracy analizy i wyniki badań wskazują, że bardzo dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie metod oceny efektywności bazujących na badaniach terenowych.
2. Liczne ograniczenia: duże koszty badań terenowych, zmiany w infrastrukturze, współpracującym układzie drogowym, zachowaniach transportowych mieszkańców (zmiany trasy przejazdu) powodują, że następują dość istotne różnice w warunkach drogowo – ruchowych w badanych stanach przed i po, dlatego dobrym rozwiązaniem jest stosowanie równoległe badan symulacyjnych.
3. Przeprowadzona ocena efektywności zastosowania Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem Miejskim TRISTAR w Gdyni, obiema metodami wskazuje, że system ten przynosi spodziewane efekty mierzone skróceniem czasu podróży i zwiększeniem prędkości przejazdu nawet mimo wzrostu ruchu w przypadku transportu indywidualnego.

Bibliografia

1. Jamroz K.: Analiza dokładności identyfikacji ruchu ulicznego i jej wpływu na jakość sterowania. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Budownictwa Lądowego. Gdańsk 1985
2. Jamroz K., Birr K., Mackun T.: Analizy ruchu wraz z obliczeniem mierzalnych celów ilościowych w zakresie transportu indywidualnego i zbiorowego dla przedsięwzięcia dotyczącego wdrożenia Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem TRISTAR na terenie Trójmiasta; Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, grudzień 2015.
3. Jamroz K., Kustra W., Mackun T. i inni: Koncepcja zintegrowanego systemu zarządzania ruchem na obszarze Gdańska, Gdyni i Sopotu. Praca badawcza – na zlecenie Gminy Miasta Gdyni; FRIL, Gdańsk, 2007/2008.
4. Jamroz K., Oskarbski J. i inni: Koncepcja ogólna Systemu Zarządzania Ruchem na obszarze Gdyni, Katedra Inżynierii Drogowej PG, Gdańsk 2002.
5. Jamroz K., Oskarbski J. i inni: Koncepcja ogólna Systemu Zarządzania Ruchem na Obwodnicy Trójmiasta, Katedra Inżynierii Drogowej PG, Gdańsk 2002.
6. Kurzak H.: Steuerung und Bevertung verkheersabhangiger Signalanlangenim Strassennetz. Strassenbau und Strassenverherstechnik H. 172/1974.
7. MCQUEEN B., MC QUEEN J.: Intelligent Transportation Systems Architectures. Artech House, Boston 1999.
8. Oskarbski J.: Wpływ struktury sieci ulicznej na sprawność i efektywność funkcjonowania transportu indywidualnego w miastach. Praca doktorska. Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
9. PROPER, ALLEN T.: Intelligent Transportation System Benefits: 2003 Update. U.S. Department of Transportation, Washington D.C. 2002.
10. TRL: TRANSYT 15 User Application Guide AG 70 (issue E). Transport Research Laboratory, September 2014.
11. Van Vliet D., Hall M. (1997): SATURN 9.3. user manual. Leeds/Surrey 1997.

