

Krzysztof Ostrowski

Politechnika Krakowska, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu

ZMIENNOŚĆ NATEŻEŃ DOPLÝWAJĄCYCH DO SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ W ANALIZACH NIEZAWODNOŚCI ICH FUNKCJONOWANIA

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: W referacie zaprezentowano analizy zmienności warunków ruchu w stanach przeciążeń ruchowych przy różnych przyrostach natężenia dopływającego i przy jego parabolicznym profilu, w odmiennych warunkach pogodowych. Ocena warunków ruchu została wzbogacona o teorię niezawodności, co pozwala na uwzględnienie zmienności wielu czynników przy charakteryzowaniu wybranych miar warunków ruchu. Przedstawione podejście dotyczy sytuacji, w której występują ustabilizowane przeciążenia, które mogą być akceptowane lub nie, przez kierujących pojazdami. Wyniki analiz mogą być uzupełnieniem metodologii projektowania sygnalizacji w stanach przeciążeń ruchowych, a także wykorzystane w nowoczesnych systemach informacji o ruchu.

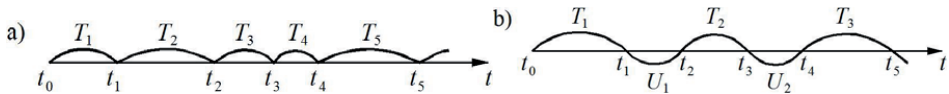
Słowa kluczowe: sygnalizacja świetlna, warunki ruchu, niezawodność

1. WPROWADZENIE

Niezawodne funkcjonowanie grupy pasów ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją utożsamiane jest zazwyczaj z dobrymi warunkami ruchowymi tj. małymi stratami czasu. Przy obecnych wskaźnikach motoryzacji niezawodność funkcjonalna jest miarą specyfikowaną zazwyczaj do okresów międzyszczytowych lub nocnych. W dużych miastach takich jak Kraków lub Warszawa szczyty ruchowe są dość długie, a warunki ruchu w nich panujące odbiegają od idealnych. Bardzo często kierujący pojazdami oczekują w kolejkach na przejazd przez skrzyżowanie i ponoszą znaczne straty czasu. Sytuacja ta jest na tyle powszechna, że kierujący akceptują pewne stany kolejek na wlotach uznając je za akceptowalne. Takie, możliwe do zaakceptowania stany kolejek pojawiają się zazwyczaj w początkowych okresach ich tworzenia, a po pewnym czasie w wyniku wzrostu natężenia dopływającego ulegają wydłużeniu i są nieakceptowane przez ogółu kierujących. W artykule przedstawiono zastosowanie teorii niezawodności do opisu zmienności procesów zachodzących w stanach występowania akceptowalnych długości kolejek, przy różnych przyrostach natężeń ruchu i różnych warunkach pogodowych.

2. SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ W ŚWIETLE NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW

Pojęcie niezawodności obiektów odnosi się zarówno do obiektów nieodnawialnych, jak i odnawialnych w czasie [9, 12]. Niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo, że obiekt będzie zdalny (sprawny) w założonym przedziale czasu (t_i, t_{i+1}). W rzeczywistości mamy do czynienia zarówno z obiektami o skończonej trwałości (np. żarówka, bateria), jak i z obiektami, których prawidłowe funkcjonowanie w czasie połączone jest z okresami kolejnych odnów, tj. naprawy (np. samochód, pralka) aż do czasu osiągnięcia granicznej trwałości i zniszczenia [7]. Na rys. 1. przedstawiono przykłady teoretycznych, prostych procesów odnowy.



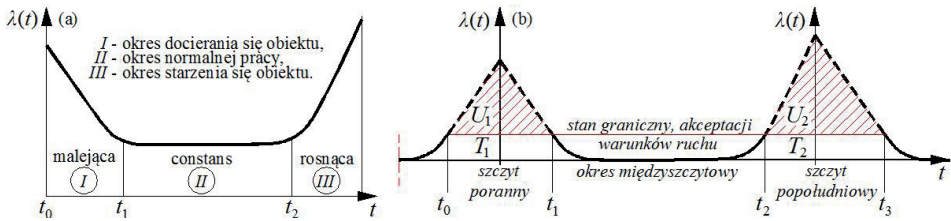
Rys. 1. Przykłady procesów odnowy [8]: a) proces odnowy natychmiastowej (z zerowym czasem odnowy), b) proces odnowy rzeczywistej (z niezerowym czasem odnowy)

Specyfika funkcjonowania obiektów takich jak skrzyżowania w stanach przecięcia odbiega istotnie od pracy np. konstrukcji stalowych czy żelbetonowych pod względem skutków przeciążeń (rys. 2a), ponieważ po rozładowaniu kolejki, skrzyżowanie w okresie mniejszego ruchu znowu działa sprawnie.

Pojęcie odnowy obiektu może odnosić się do odnowy teoretycznej, kiedy odnowiony obiekt ma niezawodność taką, jaką miał bezpośrednio przed uszkodzeniem, i odnowy praktycznej, kiedy po utracie zdadności obiekt może ponownie pracować [7].

W odniesieniu do skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i jakości obsługi jest podobnie. Prawidłowe funkcjonowanie sygnalizacji świetlnej występuje w okresach, gdy natężenie dopływające jest mniejsze od przepustowości ($Q < C$). Okresy te (rys. 2b) dotyczą zwykle godzin międzyszczytowych lub szczytów ruchowych na skrzyżowaniach nieprzeciążonych ruchem (tj. od t_1 do t_2 itd.). Czasy odnowy utożsamiać można z okresami występowania nieakceptowanych przeciążeń występujących najczęściej w szczytach ruchowych (gdy $Q > C$, tj. od t_0 do t_1 , od t_2 do t_3 itd.), jednak w tym przypadku „naprawa”, czyli odnowa funkcjonowania nastąpić będzie w chwili, gdy zmniejszą się długości kolejek lub straty czasu do poziomu akceptowanego np. przez kierujących pojazdami (momenty t_1, t_3 , itd.). Jakość warunków ruchu po okresie odnowy powróci więc do stanu przed okresem odnowy, co stanowi proces odnawialny z niezerowym czasem odnowy (rys. 1b). Funkcjonowania pasa ruchu można zatem potraktować jako proces odnawialny, rozumiany jako następujące po sobie przedziały czasu opisujące na przemian akceptowalne (T_1, T_2) i nieakceptowalne (U_1, U_2) stany warunków ruchu, czyli jako ciąg wielkości $T_1, U_1, T_2, U_2, \dots, T_n, U_n$. W takim ujęciu odnową jest przywrócenie warunków możliwych do zaakceptowania.

W oparciu o rys. 1b naszkicowano krzywe intensywności odnowy funkcjonalnej grupy pasów ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną w dobie (rys. 2b).



Rys. 2. Przebieg intensywności uszkodzeń w obiekcie nieodnawialnym (a) oraz intensywności odnowy funkcjonalnej grupy pasów ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją w dobie (b)

Z rys. 2b wynika że istnieje pewien teoretyczny moment, w którym następuje zmiana jakości warunków ruchu i niezawodności funkcjonowania grupy pasów ruchu (momenty t_0 , t_2 , itd.). Moment ten może być opisywany przez szereg miar używanych w opisie warunków ruchu [13, 14], w tym poprzez graniczne wartości strat czasu d_{gr} , kolejek pozostających $K_{p,gr}$, maksymalnych $K_{m,gr}$ oraz inne miary związane z odczuciami kierujących pojazdami tj. graniczną liczbą cykli oczekiwania LT_{gr} do momentu zjazdu ze skrzyżowania lub graniczną wartością czasu oczekiwania w kolejce na zjazd $t_{0,gr}$. Wybór miernika warunków ruchu uzależniony będzie od przeznaczenia analizy. W odmienny sposób funkcjonowanie grupy pasów ruchu oceniać będą zarządzający ulicami i skrzyżowaniami w mieście (eksperti) oraz kierujący pojazdami z subiektywną oceną sytuacji. Najtrudniejszym problemem badawczym jest ocena czasu trwania nieakceptowalnych warunków ruchu przez kierujących z uwzględnieniem innych uwarunkowań np. trasy alternatywne, cele podróży, możliwości oceny czasu traconego itp. Dobór krytycznych miar definiujących stan zawadności zależec powinien od celu analizy i powinien wynikać z geometrii i usytuowania pasów ruchu na wlocie, lokalizacji skrzyżowania w obszarze (strefie) miasta, odległości pomiędzy skrzyżowaniami lub z i innych lokalnych potrzeb.

3. STAN GRANICZNY FUNKCJONOWANIA GRUPY PASÓW RUCHU Z SYGNALIZACJĄ

Przejście ze stanu niezawodnego funkcjonowania pasa ruchu do stanu zawodnego może zostać potraktowane jako osiągnięcie pewnego rodzaju stanu granicznego. W niniejszej analizie zawód definiuje się dla wybranego, ważnego w ocenie, miernika warunków ruchu. Może być on określony zarówno z punktu widzenia kierujących pojazdami, podróżujących często przez analizowane skrzyżowanie oraz od strony eksperta.

Poniżej przedstawiono kilka wybranych, ogólnych definicji zawodu [10]. Dla kierujących pojazdami zawód zdefiniować można następująco:

K1) Przekroczenie krytycznej długości kolejki pojazdów na pasie ruchu lub/i wystąpienie zbyt niskiej, nieakceptowalnej przez ogół kierujących prędkości jazdy kolumny pojazdów w kolejce.

K2) Przekroczenie krytycznej wartości czasu oczekiwania na zjazd w kolejce pojazdów lub krytycznej liczby cykli sygnalizacyjnych (szacowanych do momentu zjazdu).

Dla eksperta zawód można zdefiniować następująco:

E1) Przekroczenie krytycznej długości kolejki pozostającej pojazdów oraz/lub akceptowalnego czasu trwania przeciążenia na analizowanym pasie ruchu.

E2) Przekroczenie krytycznej długości kolejki maksymalnej na pasach dla relacji na wprost powodującej blokowanie dojazdu do dodatkowych pasów ruchu lub tarczy sąsiedniego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną w arterii miejskiej.

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną badania i analizy niezawodności funkcjonowania pasa ruchu z relacją na wprost ukierunkowane na działania eksperta, dla którego ważne będzie zapewnienie wysokiej jakości warunków ruchu dla relacji na wprost. W analizie początek wystąpienia stanu zawodności oparto na przyjętej *a priori* krytycznej długości kolejki pozostającej K_{pkr} (podejście E1), czyli tzw. klasie jakości obsługi. Analizy prowadzone przy różnych wartościach natężeń dopływających i w różnych warunkach pogodowych ukażą kształt funkcji niezawodności i potrzebę operowania poziomami niezawodności.

W zależności od lokalnych potrzeb ekspertów możliwe jest używanie kilku klas jakości obsługi np. w zależności od lokalizacji skrzyżowania w mieście lub od „ważności” wlotów skrzyżowań w arterii miejskiej. Długości kolejek pozostających powiązane są ściśle z procesem ich tworzenia, którego charakter zależy od wielkości i zmienności potoku dopływającego w czasie oraz od parametrów sterowania i innych czynników w tym warunków pogodowych.

W dużych miastach wystąpienie stanu zawodności rys. 4b ($t_{zaw,i}$, $t_{zaw,i+1}$, $t_{zaw,k}$) zazwyczaj wiąże się z długimi okresami zatłoczenia w wyniku występowania rozciągniętych w czasie szczytów ruchowych. W małych miastach, w których szczyty ruchowe są krótkie, czas trwania stanu zawodności t_{zaw} może mieć dodatkowe, istotne znaczenie w ocenie niezawodności funkcjonalnej. Przy doborze klasy jakości obsługi K_{pkr} , w oparciu o lokalne długotrwałe obserwacje ruchu na skrzyżowaniu, możemy świadomie dopuszczać występowanie okresowych przeciążeń ruchowych np. w okresach przedświątecznych itp.

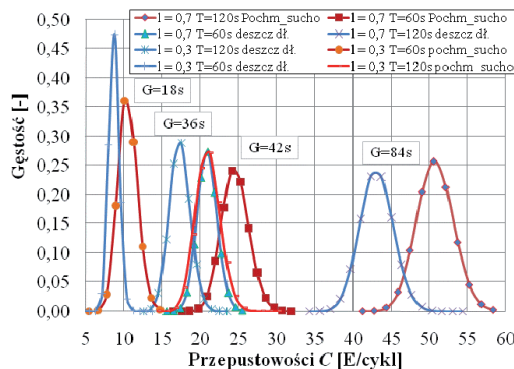
Złożoność zagadnienia i cele analiz wymagają zastosowania modelu symulacyjnego, który został opracowany przez autora i opisany szczegółowo w publikacji [11].

4. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ SYMULACYJNYCH

Analizy sprawności i niezawodności funkcjonowania pasa ruchu z relacją na wprost na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną prowadzone będą w modelu symulacyjnym [10, 11] dla różnych założonych przyrostów natężenia dopływającego i przy ustalonych parametrach sterowania w odmiennych warunkach pogodowych. Model symulacyjny łączy zmienność procesów obsługi na linii zatrzymań i zgłoszeń pojazdów, generowanych w przekroju usytuowanym poza wpływem kolejki. Poniżej przedstawiony zostanie skrótowo opis procesu obsługi i zgłoszeń zaimplementowany w modelu symulacyjnym.

4.1. PROCES OBSŁUGI POJAZDÓW

Proces obsługi w cyklu sygnalizacyjnym bazuje na teoretycznych rozkładach zmienności empirycznych odstępów czasu pomiędzy pojazdami na linii zatrzymań, wyznaczonych oddzielnie dla każdej pozycji pojazdu w kolejce. Spośród objętych badaniami empirycznymi poligonów badawczych [10] wybrano poligon z jednym pasem dla relacji na wprost, dla którego zestawiono wartości odstępów czasu na linii zatrzymań pomiędzy tylnymi zderzakami pojazdów osobowych dla kolejnych pozycji pojazdów w kolejce dla wybranych grup warunków pogodowych (pochmurno/sucho, opady długotrwałe deszczu). Poligon charakteryzuje geometria wlotu oraz struktura rodzajowa ruchu najbardziej zbliżona do warunków wyjściowych [1, 6, 13]. Oceny dopasowania rozkładów teoretycznych do danych empirycznych przeprowadzone z użyciem testu zgodności Kołmogorowa–Smirnowa wykazały, że najlepszym rozkładem teoretycznym na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, opisującym zmienność odstępów czasu dla kolejnych pozycji pojazdów w kolejce jest rozkład logarytmiczno-normalny. Badania symulacyjne przeprowadzone zostały dla dwóch różnych procesów obsługi występujących przy odmiennej pogodzie [10]. Model symulacyjny przystosowany został do wprowadzania parametrów wybranego rozkładu teoretycznego oddzielnie dla każdej pozycji pojazdu w kolejce. Wykorzystując wyniki empiryczne odstępów czasu między pojazdami zasymulowano zmienność przepustowości w cyklach, w różnych warunkach pogodowych.



Rys.3. Funkcje gęstości C [E/cykl] przy różnych λ ($\lambda=G/T$) i długościach sygnału zielonego G [s] w odmiennych warunkach pogodowych. Wyniki uzyskano z modelu symulacyjnego [4, 10].

4.2. PROCES ZGŁOSZEŃ POJAZDÓW

Założono, że zmienność procesu zgłoszeń będzie reprezentowana przez dopływy pojazdów wg założonego, najbardziej niekorzystnego dla warunków ruchu parabolicznego profilu zmienności natężenia dopływającego [2, 3] – rys. 4a. Zakres zmienności wartości natężenia dopływającego pojazdów osobowych w kolejnych cyklach sygnalizacyjnych przy

różnych wartościach parametrów sterowania G i T wynika z przyjęcia granicznych wielkości stopni obciążeń X_{15}^w (Q/C) w kolejnych interwałach 15 minutowych. Dla zbadania wpływu zmienności natężeń dopływających wprowadzono trzy zakresy przyrostu średniego stopnia obciążenia X_{15}^w tj. 0,7, 0,8 i 0,9 (tabl. 1). Badaniami symulacyjnymi objęto okres czasu przed, w trakcie i po zakończeniu przecięcia tj. do momentu rozładowania kolejki pojazdów osobowych na wlocie skrzyżowania. Wartości intensywności potoku dopływającego generowano dla każdego cyklu sygnalizacyjnego wg rozkładu równomiernego dla ustalonych, kolejnych 15-minutowych przedziałów natężeń ruchu. Średnie stopnie obciążenia w okresach 15 minutowych dobierano tak, aby uzyskać profil paraboliczny w badanym szczycie ruchowym (rys. 4a). Przyjęto, że wartość maksymalna średniego stopnia obciążenia $X_{15,max}^w$ nie będzie przekraczać wartości 1,5.

Tablica 1

Zestawienie przyjętych przyrostów stopni obciążenia X_{15}^w modelowanego szczytu ruchowego [10]

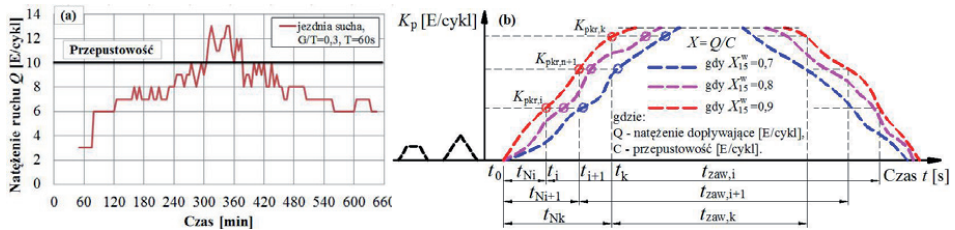
Kolejne 15 min	$X_{15}^w/0,7$	$X_{15}^w/0,8$	$X_{15}^w/0,9$
0	<i>Rozruch modelu symulacyjnego</i>		
1	0,7	0,8	0,9
2	0,76 ÷ 0,83	0,87 ÷ 0,93	0,99 ÷ 1,05
3	1,03 ÷ 1,12	1,08 ÷ 1,17	1,16 ÷ 1,23
4	1,38 ÷ 1,44	1,38 ÷ 1,44	1,38 ÷ 1,44
5	1,03 ÷ 1,12	1,08 ÷ 1,17	1,16 ÷ 1,23
6	0,76 ÷ 0,83	0,87 ÷ 0,93	0,99 ÷ 1,05
7, 8, 9, 10 ...	0,7	0,8	0,9

Analizy prowadzono w obu grupach warunków pogodowych przy tych samych parametrach procesu zgłoszeń dla następujących, skrajnych zestawów parametrów sterowania tj. **1)** $G = 18$ s, $T = 60$ s, $\lambda = G/T = 0,3$; **2)** $G = 36$ s, $T = 120$ s, $G/T = 0,3$; **3)** $G = 42$ s, $T = 60$ s, $G/T = 0,7$; **4)** $G = 84$ s, $T = 120$ s, $G/T = 0,7$, przy stałoczasowym sterowaniu sygnalizacją. Przyjęty sposób sterowania wynika z potrzeb analiz, które prowadzone są w stanach przecięcia ruchowych, kiedy to osiągane są maksymalne wartości sygnałów zielonych i cykli. Z obserwacji wynika, że w takich warunkach ruchowych sygnalizacja akomodacyjna zaczyna pracować podobnie jak stałoczasowa.

4.3. ANALIZY SYMULACYJNE

W metodach analitycznych [1, 6, 13] ocena warunków ruchu opiera się na prostych kryteriach oceny poziomów swobody ruchu określanych najczęściej na podstawie średnich strat czasu, ale w ocenie warunków ruchu mogą być również stosowane inne mierniki. Celem przedstawionej w artykule analizy jest określenie zakresów akceptowalnych wartości wybranego miernika warunków ruchu dla kierunku dominującego (na wprost), przy założeniu, że początek wystąpienia stanu zawodności, występował będzie po osiągnięciu krytycznej długości kolejki pozostającej K_{pkr} (podejście E1). Dla celów artykułu przedstawione zostaną wyniki dla przyjętej *a priori* klasy jakości obsługi $K_{pkr} = 20$ [E/cykl] (tj. przy krytycznej kolejce pozostającej równej 20 pojazdów w cyklu). Realizując zadania

badawcze wykonano po 100 przebiegów symulacyjnych w każdej z ww. grup parametrów sygnalizacji i odmiennych warunków pogodowych przy założonych przyrostach natężeń dopływających (tabl. 1) dla ww. klasy jakości obsługi K_{pkr} . Każdy przebieg symulacyjny odzwierciedla pojedynczy szczyt ruchowy w którym występują kolejki pozostające. Zakładając, że analizowane są kolejne szczyty popołudniowe to zasymulowane zostały warunki ruchu w 100 kolejnych dniach roboczych.



Rys. 4. Przykład zasymulowanego pojedynczego profilu natężenia dopływającego (a) oraz schemat analiz symulacyjnych ilustrujący zmiany K_p przy różnych przyrostach natężeń ruchu (b)

W rezultacie przeprowadzonych symulacji otrzymano zmienne wartości mierników warunków ruchu na badanym pasie ruchu w okresie t_{Ni} . Dla każdego cyklu sygnalizacyjnego oprócz wartości strat czasu otrzymano dodatkowy zestaw informacji o warunkach ruchu [15] tj. o długościach kolejek maksymalnych i pozostających, o zatrzymaniach, o czasach poprawnego funkcjonowania pasa ruchu do momentu wystąpienia stanu zawodności itd.. Z uzyskanych w okresie czasu t_{Ni} zmiennych wartości mierników warunków ruchu zbudowano rozkłady empiryczne, do których dopasowywano następujące rozkłady teoretyczne: normalny, logarytmiczno-normalny, Gumbela, gamma i Weibulla. Dopasowywanie rozkładów wykonywano w każdej grupie badawczej tj. dla wyróżnionych grup parametrów sterowania oraz warunków pogodowych. Ze względu na duże próby badawcze (> 450 pojazdów) zastosowano test zgodności Kołmogorowa–Smirnowa ($\alpha = 0,05$), który wyłonił dwa rozkłady teoretyczne najlepiej opisujące zmienność badanych charakterystyk tj. rozkład gamma i Weibulla. Rozkłady te są stosowane powszechnie w analizach teorii niezawodności [5, 9]. W kolejnym kroku bazując na wyznaczonych teoretycznych funkcjach gęstości $f(x_i)$ opisujących zmienności wybranych mierników warunków ruchu x_i wyznaczyć można funkcje niezawodności $R(x_i)$, zawodności $\Omega(x_i)$ oraz intensywności odnowy $\lambda_{ini}(x_{i,gr})$ dla granicznych jego wartości. W teorii niezawodności, dla poprawnej budowy i interpretacji ww. charakterystyk niezawodności należy sprecyzować pojęcie „zawodu” w odniesieniu do jednostki analizowanego miernika, zmiennego w czasie. Za zawód uznaje się przekraczanie wartości granicznych wybranego miernika warunków ruchu. Wtedy warunki te uznawane są za zawodne.

W literaturze [8, 9] dostępne są ogólne wzory i gotowe procedury, które odnosić można zarówno do oceny niezawodności obiektu nieodnawialnego, jak i odnawialnego w czasie. Ogólny zapis charakterystyk, należy każdorazowo sprawdzić i ewentualnie przekształcić w zależności od zastosowanego miernika i przyjętej definicji „zawodu”. Poniżej przedstawiono charakterystyki niezawodnościowe w odniesieniu do miernika x , przy założeniu, że $x > 0$, $x \in [t_0, t_i]$.

$$\text{Funkcja gęstości:} \quad f(x) = -\frac{d}{dx}[R(x)] = \frac{d}{dx}[\Omega(x)], \quad (1)$$

$$\text{Funkcja niezawodności:} \quad R(x) = P(x_{gr} > x), \quad (2)$$

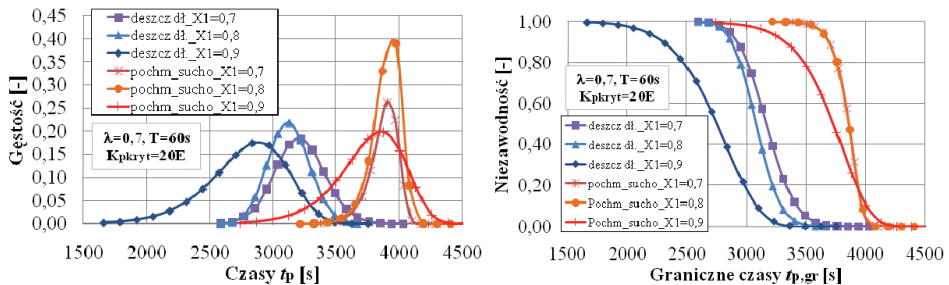
$$\text{Funkcja zawodności:} \quad \Omega(x) = P(x_{gr} < x) = 1 - R(x), \quad (3)$$

$$\text{Funkcja intensywności odnowy:} \quad \lambda_{int}(x_{gr}) = \frac{f(x)}{R(x)}, \quad x > 0, \quad (4)$$

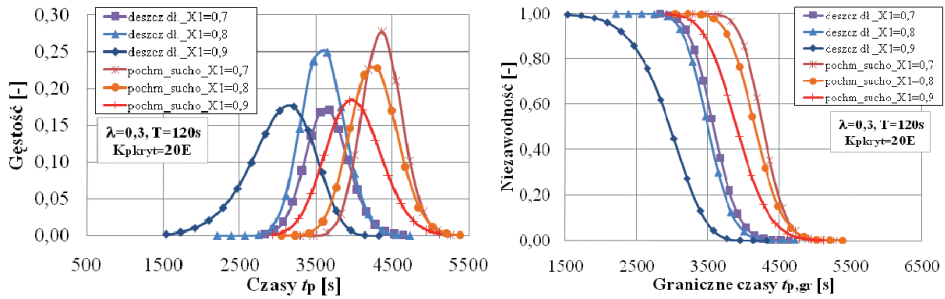
5. ZMIENNOŚĆ NATĘŻENIA DOPIYWAJĄCEGO A NIEZAWODNOŚĆ FUNKCJONALNA

Powszechność występowania kolejek pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją w dużych miastach powoduje, że kierujący samochodami akceptują z konieczności pewne stany kongestii. Łatwo zauważyć, że dla newralgicznego skrzyżowania na trasie codziennych podróży, o podobnych porach dnia np. w motywacji praca - dom, występują dni, w których kolejki pojazdów są raz krótsze, innym razem dłuższe, a czasami ich zasięg jest ogromny i nieprzewidywalny. Prezentowane wykresy ukazują jak kształtuje się niezawodność funkcjonowania pasa ruchu (poprzez czasy t_p) przy różnych przyrostach natężeń dopływających ruchu (zdefiniowanych poprzez stopnie obciążeń X_{15}^{av} , wg. tabl.1) w odmiennych warunkach pogodowych, wpływających niekorzystnie na natężenie nasycenia i przepustowość analizowanych pasów ruchu (rys. 3) dla danych z przedziału t_{Ni} .

W przypadku czasów t_p „zawodem” nazywa się przypadek, gdy czasy t_p poprawnego funkcjonowania pasa ruchu do osiągnięcia krytycznej długości kolejki pozostającej K_{pkr} są zbyt krótkie, czyli $t_p < t_{p,gr}$. Jeżeli $t_p \geq t_{p,gr}$, to można uznać, że obsługa będzie niezawodna. W pracach [10, 15] ukazano inne definicje zawodu i wykresy, w tym w odniesieniu do strat czasu, gdzie przyjęto *a priori* klasy jakości obsługi oraz poziomy niezawodności.



Rys. 5. Funkcje gęstości t_p i funkcje niezawodności dla granicznych czasów $t_{p,gr}$ dla $\lambda = 0,7$ i $T = 60$ s przy różnym przyroście stopni obciążeń X_{15}^{av} , w odmiennych warunkach pogodowych



Rys. 6. Funkcje gęstości t_p i funkcje niezawodności dla granicznych czasów $t_{p,gr}$ dla $\lambda = 0,3$ i $T = 120$ s przy różnym przyroście stopni obciążenia X^w_{15} , w odmiennych warunkach pogodowych

Największy rozrzut wartości czasów poprawnego funkcjonowania pasa ruchu t_p (rys. 5 i 6) występuje przy przyroście natężeń oznaczonym $X^w_{15}/0,9$. W tym przypadku utrata niezawodności następowała najwcześniej zarówno dla parametrów sterowania przy $T = 60$ s i 120s. Dla przyrostów $X^w_{15}/0,7$ oraz $X^w_{15}/0,8$ nie odnotowano znaczących różnic w przebiegu funkcji niezawodności przy $T = 60$ s. Generalnie im większy przyrost natężenia dopływającego tym szybciej rosną kolejki pozostające i osiągnię jest stan zawodności, przy klasie jakości obsługi $K_{pkr} = 20$ [E/cykl]. Na wykresach uwidacznia się również niekorzystny wpływ warunków pogodowych redukujących czas poprawnego funkcjonowania pasa ruchu t_p . Ten negatywny wpływ ilustrują funkcje niezawodności wyznaczone dla skrajnych parametrów sterowania. Analiza niezawodności pozwala ocenić jakość warunków ruchu do momentu wystąpienia stanu zawodności (K_{pkr}) w oparciu o „skalę” niezawodności. Przykładowo, zakładając do oceny, graniczną wartość czasu poprawnego funkcjonowania pasa ruchu $t_{p,gr}$ dla $\lambda = 0,7$ i $T = 60$ s jako 3500 s (od momentu pojawienia się pierwszych kolejek pozostających) łatwo zauważyć, że w korzystnych warunkach pogodowych niezawodność funkcjonowania pasa ruchu w 100 okresach szczytowych (liczba przebiegów symulacji) wynosić będzie prawie 100%, a w opadach deszczu blisko 0%. Dla łatwiejszej interpretacji zmian niezawodności można wprowadzić poziomy niezawodności N_i (np. od 0,0 do 0,2 - poziom N4 itd.), z którymi powiązać można graniczne wartości mierników warunków ruchu dla przyjętych klas jakości obsługi K_{pkr} .

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przedstawionych powyżej analiz wynikają następujące ogólne wnioski:

- 1) Zdefiniowanie i świadome wprowadzenie klasy jakości obsługi K_{pkr} oraz poziomów niezawodności obsługi N_i dla grup pasów ruchu skrzyżowań z sygnalizacją umożliwi ekspertom kontrolę nad funkcjonowaniem skrzyżowań w stanach przeciążeń ruchowych,
- 2) Wraz ze zwiększeniem poziomu niezawodności N_i dla założonej klasy jakości obsługi K_{pkr} , lub z przyjęciem dłuższej krytycznej kolejki pozostającej K_{pkr} wzrasta średni czas akceptowalnego, poprawnego w ocenie ekspertów funkcjonowania pasa ruchu t_p . Przyjęcie

większej wartości N_i lub K_{pkr} powinno być zgodne z poziomem akceptacji przeciążeń przez kierujących pojazdami lub wynikać z klasy technicznej ulicy i jej położenia w mieście,

3) Obecność niekorzystnych dla ruchu warunków pogodowych (opad długotrwały deszczu, śniegu, lub obcość mgły) powinna być uwzględniana w obliczeniach przepustowości i warunków ruchu oraz w sterowaniu ruchem i zarządzaniu przeciążeniami, gdyż wyraźnie obniżają one komfort przejazdu przez skrzyżowanie [10],

4) Wprowadzona definicja krytycznych długości kolejek pozostających K_{pkr} (klas jakości obsługi) pozwala modelować czas trwania zatłoczenia t_{zaw} (rys. 4b).

Bibliografia

1. Canadian capacity guide for signalized intersections. ITE, Canada 2008.
2. Chodur J.: Funkcjonowanie skrzyżowań drogowych w warunkach zmienności ruchu, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
3. Chodur J., Ostrowski, K.: Assessment of traffic performance at signalized intersections, The Archives of Transport, vol. 18, Warszawa 2006, str. 5-24.
4. Chodur J., Ostrowski K. and Tracz, M.: Impact of saturation flow changes on performance of traffic lanes at signalized intersections. Proceedings of the 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, Sweden 2011, pp. 600 – 611.
5. Gertsbakh I.: Reliability theory with applications to preventive maintenance, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
6. Highway Capacity Manual. TRB. Washington D.C., USA 2010.
7. Janicki D., Hebda M.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji, WKŁ, Warszawa 1977.
8. Mięgdalski J., praca zbiorowa: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne, WEMA, Warszawa 1982.
9. Murzewski J.: Niezawodność konstrukcji inżynierskich, Arkady, Warszawa 1989.
10. Ostrowski K.: Niezawodność funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją w warunkach zmiennego natężenia nasycenia, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
11. Ostrowski K.: Mikromodel symulacyjny ruchu pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, XV Międzynarodowa Konferencja TransComp, Zakopane 2011.
12. Słowiński B.: Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych, Politechnika Koszalińska 1999.
13. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K.: Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2004.
14. Tracz M., Gaca S., Suchorzewski W.: Inżynieria ruchu drogowego, teoria i praktyka, WKŁ, Warszawa 2008.
15. Tracz M., Ostrowski K.: Impact of capacity variability in different weather conditions on reliability of signalised intersections, The 5th International Symposium on Transportation Network Reliability, Hong Kong 2012.

VARIABILITY OF DEMAND FLOW TO INTERSECTIONS WITH SIGNALS IN ANALYSES OF THEIR OPERATING RELIABILITY

Summary: The paper presents the analysis of the variability of traffic performance during overload states with varying demand flow increments and parabolic demand flow profiles under different weather conditions. Assessment of traffic conditions is based on the theory of reliability, which allows the inclusion of variability of many factors in the description of the variability of selected measures of traffic performance. The approach describes a situation in which there are stabilized congestions at different increments of demand flow which can be acceptable or not to the drivers. The results of the analysis can be used in the design of traffic signal at the intersection of the overload states in the arteries, as well as in modern traffic information systems.

Keywords: traffic signals, traffic performance, reliability