

POPRAWA PRZEPUSTOWOŚCI SKRZYŻOWAŃ W SIECI MIEJSKIEJ POPRZECZ EFEKTYWNIJSZE ZARZĄDZANIE PRZEPŁYWEM STRUMIENIA POJAZDÓW

Dominik Malinowski, Jolanta Labuch

1. Wstęp

Zatłoczone drogi i nieprzejezdne skrzyżowania w godzinach szczytu komunikacyjnego rano/popołudniu to problem, z którym obecnie mierzyć się muszą już nie tylko wielkie aglomeracje miejskie ale również miasta i miasteczka powyżej 30 tysięcy mieszkańców. Szacuje się, że ponad 10% miast Europejskich codziennie zmaga się z ogromnym zatłoczeniem na drogach a jego koszty szacowane są na poziomie 0,9%-1,5% unijnego PKB [1]. Coraz powszechniejszym problemem stają się przepełnione ulice i nieprzejezdne skrzyżowania, które zablokowane są również przez pojazdy komunikacji miejskiej. Powoduje to znaczne wydłużenie się czasu przejazdów przez miasta, znaczny wzrost hałasu oraz (mimo wzrostu wymagań norm EURO) pogorszenie się stanu środowiska poprzez długie oczekiwanie pojazdów na zielone światło, lub czas spędzony w korkach. Ponad 70% emisji gazów cieplarnianych z całego sektora transportowego pochodzi z transportu drogowego [1]. Średni czas przejazdu przez duże Polskie miasta w godzinach szczytu wydłuża się od około 35% do nawet 200% (nie biorąc pod uwagę sytuacji losowych).

Głównymi przyczynami powstawania zatorów na drogach w godzinach szczytu są przede wszystkim wąskie, często tylko jedno lub dwupasmowe ulice, duże zagęszczenie skrzyżowań z niedostosowaną, niesynchronizowaną sygnalizacją świetlną, brak wydzielonych pasów dla komunikacji miejskiej (powoduje to przede wszystkim znaczne opóźnienia w komunikacji miejskiej ale także blokowanie przejazdu pojazdów kiedy to autobus lub tramwaj będzie musiał zatrzymać się na przystanku). W dużych miastach kiedy to nie ma już możliwości przebudowy, poszerzenia skrzyżowania wprowadza się sygnalizację świetlną (jeżeli nie było jej wcześniej) lub udoskonala jej funkcjonowanie poprzez zastosowanie asynchronicznej, genetycznej sygnalizacji wspomaganej pętlami indukcyjnymi. W największych polskich miastach jest kilkaset skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, np. w Warszawie - 700, w Łodzi - 250, w Krakowie- 180, Poznań-250 [2]. Niestety zazwyczaj nawet scentralizowane, zaawansowane systemy nie są w stanie w czasie rzeczywistym dokonać analizy sytuacji na skrzyżowaniu by zapewnić odpowiedni poziom intuicyjności sterowania przepływem strumienia pojazdów. Dodatkowo nowoczesne systemy, czy też wspomagające pętle indukcyjne są zawodne i nie obejmują, nie

wspierają sygnalizacji świetlnych na wszystkich skrzyżowaniach. Należy zatem opracować tańszą, mniej zawodną ale przede wszystkim pomagającą dokładniej określić co się dzieje na skrzyżowaniu metodę.

2. Cel główny

W odpowiedzi na ciągły wzrost liczby pojazdów (w samej Łodzi w 2017 roku było prawie pół miliona zarejestrowanych samochodów [6]) i praktycznie niewielki lub bardzo wolno postępujący stopień rozbudowy dróg należy opracować efektywniejszy i wydajniejszy system zarządzania przepływem strumienia pojazdów przez skrzyżowania. Skutki takich działań mogą być tylko pozytywne: minimalizacja i zmniejszenie frustracji kierowców, redukcja hałasu poprzez szybsze przemieszczenie się strumienia pojazdów oraz skrócenie czasu przedostawania się szkodliwych substancji do środowiska.

3. Analiza bieżącej sytuacji na przykładzie sieci drogowej aglomeracji łódzkiej i propozycje zmian obecnego systemu.

Z pośród wielu przyczyn powstawania zatorów na ulicach Łodzi na pierwszym miejscu wymieniana jest oczywiście zła geometria skrzyżowań oraz przede wszystkim nawierzchnia. O ile na ostatnią przyczynę mamy wpływ o tyle geometrii skrzyżowania często nie jesteśmy w stanie zmienić chociażby z braku miejsca do rozbudowy czy przebudowy skrzyżowania. Przykładem ulic w Łodzi, na których tworzą się znaczne spowolnienia ruchu a przez to również zatory (spowodowane całkowitym wytracaniem prędkości przez kolejnych kierowców) jest chociażby ulica Jaracza na odcinku od ul. Uniwersyteckiej przynajmniej do ulicy Piotrkowskiej (największe zatory tworzą się w okolicach ulicy wschodniej, gdzie do złego stanu nawierzchni dochodzi brak wydzielonego pasa do skrętu w lewo z Ulicy Jaracza we Wschodnią), ulica Lutomska na odcinku od Al. Włókniarzy do ulicy Klonowej (Kierowcy jadący w stronę centrum miasta niejednokrotnie zjeżdżają na przeciwny pas ruchu i jada pod prąd lepszą częścią ulicy. Powoduje to przede wszystkim zagrożenie bezpieczeństwa, ale także zmniejszanie prędkości kierowców jadących z naprzeciwka. Kierowcy jadący od zachodniej strony miasta dojeżdżając do skrzyżowania z ulicą Klonową znacznie obniżają prędkość z uwagi na zły stan nawierzchni co powoduje spadek przepustowości skrzyżowania do około 35% możliwości). Typowym przykładem złej geometrii skrzyżowania może być skrzyżowanie Al. Włókniarzy z ul. Ogrodową. Kierowcy jadący od strony północnej Al. Włókniarzy chcąc skręcić w lewo muszą zmniejszyć swoją prędkość minimum do 15-20 km/h ponieważ kierowcy muszą skręcić bardzo ostro w lewo, czego nie da się wykonać z takimi prędkościami jak np. na skrzyżowaniu Al. Piłsudskiego z Al. Śmigłego-Rydza. Można poprawić tą sytuację zmieniając geometrię wylotu ul. Ogrodowej od strony centrum miasta, tworząc chociażby osobne pasy do skrętu w lewo i w prawo. Zmieni to układ skrzyżowania

a dodatkowo odblokuje pas jezdni do jazdy na wprost w kierunku Retkini i Teofilowa. Jeżeli tylko istnieje możliwość przebudowy, lub niewielkiej korekcji skrzyżowania należałoby to uczynić. W podanym wyżej przypadku możliwość taka istnieje. Poszerzyć natomiast nie można chociażby skrzyżowania ul. Żeromskiego z ul. Kopernika. Tam należy poszukać innych rozwiązań, gdyż uwagi na istniejące budynki nie można wybudować dodatkowych pasów ruchu. W 2017 roku zakończyła się przebudowa ul. Kopernika w stronę centrum od ul. Żeromskiego - wybudowano nowe przystanki, zwężono ulicę i zakazano na ulicy ruchu pojazdów osobowych (w określonych godzinach). Nie jest to dobra zmiana- zamykając kolejne ulice (choćby Zieloną, Narutowicza, Kilińskiego itd.) dla aut osobowych, powodujemy większe zatłoczenie innych ulic oraz wydłużenie drogi dojazdów uczestników ruchu, co z kolei wpływa na dodatkowe miejscowe zatory, większy okres hałasu oraz więcej wydzielonych spalin do atmosfery. W tym wypadku należało jedynie przenieść przystanek Żeromskiego - Kopernika nieco dalej, na drugą stronę ulicy Kopernika (która i tak jest już zamknięta dla ruchu samochodów w określonych godzinach) oraz na ulicy Żeromskiego zrobić przystanek obustronny. Nie powodowałoby to zatorów kierowców skręcających z ulicy Kopernika od strony centrum miasta w prawo ani w lewo, jadący prosto i tak mają zakaz wjazdu na dalszą część ulicy Kopernika.

Kolejnych przyczyn w powstawaniu zatorów można doszukiwać się w złym zsynchronizowaniu sygnalizacji świetlnej na terenie całego miasta. Za przykład może posłużyć przebudowana niedawno ulica Inflancka w Łodzi. Jadą od ronda Powstańców 1986r. w stronę ulicy Strykowskiej na większości skrzyżowań najpierw zapala się światło zielone dla lewoskrętu (od przeciwnej strony wszystkie sygnalizatory również wskazują światło czerwone) natomiast zielone światło dla jadących prosto dopiero w połowie czasu świecenia się lewoskrętu lub tuż po tej fazie. Na każdej zmianie świateł kierowcy jadący na wprost tracą około 2-4 sekund. W tym czasie przez skrzyżowanie może przejechać kilka aut a tym samym następne kilka aut nie musi wytracać całkowicie swojej prędkości powodując miejscowe zatory. Podobne sytuacje zdarzają się na skrzyżowaniach na których tramwaje mogą przejeżdżać tylko prosto przez skrzyżowanie. Są to między innymi: Al. Włókniarzy, Ul. Zielona, Ul. Narutowicza, Ul. Kilińskiego, Al. Politechniki i wiele innych. Na większości tych skrzyżowań zielone światło dla aut jadących na wprost zapala się nawet 5 sekund później niż z tego samego skrzyżowania może ruszyć tramwaj. Poprawne zsynchronizowanie skrzyżowań w Łodzi w praktycznie darmowy sposób mogłoby zwiększyć efektywność przepływu strumienia pojazdów.

W 2014 roku na ponad 230 skrzyżowaniach w Łodzi zaczęto wymieniać oraz montować nowe pętle indukcyjne. Znacząco wpłynęło to na jakość oraz sprawność funkcjonowania sygnalizacji świetlnej na Łódzkich ulicach. Rozwiązanie to (stosowane na całym świecie) ma niezaprzeczalnie wiele zalet ale także (mimo dynamicznego rozwoju technologii) wiele wad. Plusem pętli indukcyjnych jest niewątpliwie wspieranie sterowania sygnalizacją świetlną-

jeżeli na danym pasie ruchu nie ma pojazdu to system nie włącza dla tej fazy zielonego światła, jest ona pomijana w cyklu. Ważną zaletą takiego rozwiązania jest również możliwość po przejechaniu pojazdu podania sygnału, że zielone światło nie jest już „potrzebne”- niestety po przeprowadzonych analizach na Łódzkich ulicach akurat ta funkcjonalność pętli indukcyjnych w większości przypadków nie działa. Ponadto dzięki tym rozwiązaniom jesteśmy w stanie uzyskać dane na temat liczby samochodów, które przez skrzyżowanie przejechały. Przy niewątpliwych zaletach pętli indukcyjnych pojawiają się niestety również wady. W 2014 roku np. w Olsztynie system pętli indukcyjnych nie załączał poprawnie zielonego światła i kierowcy musieli manewrować na skrzyżowaniach by wzbudzić pętle i otrzymać zielone światło- według urzędników to była wina kierowców, którzy nie umieją prawidłowo jeździć [3]. Niestety to nie jest wina kierowców a zawodności systemu. Takie przypadki mają również miejsce w Łodzi. Bardzo często zdarza się, że pętla nie załączy zielonego światła, bo umieszczona jest w złym miejscu, lub kierowca nie zatrzymał się dokładnie w miejscu gdzie jest ona zamontowana. Po części jest to wina kierowców, a po części także tego, że w wielu przypadkach pętle nie wykrywają lekkich samochodów lub pojazdów jednośladowych ale także rowerów, które wzbudzałyby pętle [4]. Może być to spowodowane faktem iż, elementy pętli zostały zatopione zbyt głęboko w jezdni (Jeżeli zostały by zatopione zbyt płytko to przy dużym rozgrzaniu się asfaltu w słoneczne dni mogłyby zostać przerwane podczas pracy asfaltu). Kolejną wadą w funkcjonowaniu pętli indukcyjnych jest fakt iż w wielu przypadkach duży pojazd na pasie obok może wpływać również na działanie pętli indukcyjnej z sąsiedniego pasa ruchu [5]. Przy niewątpliwych zaletach ale także dość uciążliwych wadach tego rozwiązania należy się zastanowić czy nie ma lepszego, mniej zawodnego systemu traktującego każdego uczestnika ruchu z takim samym priorytetem.

Omówione wyżej dwie główne przyczyny zakorkowania Łodzi nie dotyczą tylko tego miasta ale wszystkich miast, które dynamicznie się rozwijają. Trzy stosowane rozwiązania to zamykanie ulic dla ruchu samochodów tak by mogły się po nich poruszać tylko pojazdy komunikacji miejskiej, przebudowa niektórych ulic poprawiając geometrię oraz nawierzchnię ale także stosowanie pętli indukcyjnych. Wszystkie metody są dobre oprócz zewężania ulic i budowy chociażby lansowanych woonerfów. Niestety mimo wielu realizowanych planów poprawy infrastruktury drogowej w Łodzi nadal miasto nie jest w stanie w szybszym tempie wykonywać napraw nawierzchni czy budować tuneli oraz wiaduktów w tempie proporcjonalnym do wzrostu natężenia ruchu oraz powstających zatorów na ulicach. Należy zatem przede wszystkim poprawnie zsynchronizować wszystkie sygnalizatory świetlne oraz poprawić obecne współdziałanie pętli indukcyjnych z obecnymi systemami.

4. Komunikacja miejska

W kwietniu 2017 roku w Łodzi przeprowadzona została wielka rewolucja komunikacyjna. Zmianą uległy niemal wszystkie trasy połączeń autobusowych i tramwajowych. Niestety nie wpłynęło to znacząco na poprawę i wydajność funkcjonowania transportu zbiorowego w mieście. Drugim zabiegiem jakie MPK Łódź oraz ZDiT realizuje aby można było szybciej przemieszczać się komunikacją miejską Łodzi jest wydzielanie tzw. Bus-Pasów. Jest to dobre rozwiązanie gdyż pozwala ono na poruszanie się pojazdom komunikacji miejskiej na poruszanie się po własnych niezależnych pasach ruchu. Niestety poprzez długie czasy oczekiwania tramwajów na skrzyżowaniach oraz w większości złym umiejscowieniu przystanków tramwajowych (przykładem jest chociażby ulica Zachodnia) przejazdy komunikacją miejską są wyjątkowo długie. Wielu specjalistów twierdzi, że umieszczanie przystanków za skrzyżowaniami to błąd. Pod koniec 2017 roku MPK oraz ZDiT próbowało wprowadzić względy i bezwzględny przejazd priorytetowy dla tramwajów na niektórych skrzyżowaniach w Łodzi. Szybko jednak z tego planu się wycofano, gdyż na pasach podporządkowanych zaczęły zwiększać się korki. Wystarczyło jedynie odpowiednio dostosować sygnalizację świetlną i określić poziom priorytetu. ZDiT Łódzki podaje jako przykład zakorkowane w ten sposób skrzyżowanie ulicy zachodniej z ulicą Struga [6]. Trasą tą przejeżdża 5 linii tramwajowych. Wystarczyłoby wprowadzić bezwzględny priorytet np. dla co drugiego (taki sam przypadek byłby możliwy chociażby przy przystanku Manufaktura) przejazdu tramwaju w obie strony, synchronizując przy tym chociażby skrzyżowanie z Zamenhofs by fazy światła zielonego na ulicy Kościuszki były podporządkowane w większości przypadków tramwajom. Jadąc dalej ulicą Kościuszki docieramy do skrzyżowania z Al. Piłsudskiego. Bardzo ciekawym przypadkiem jest faza sygnalizacji świetlnej w której to „zielone światło” otrzymują tramwaje wjeżdżające i i wyjeżdżające z przystanku Centrum w Al. Kościuszki i z ulicy Piotrkowskiej do przystanku Centrum. W tym samym czasie na skrzyżowaniach w pobliżu przystanku nie odbywa się ruch w żadnym z kierunków. W tym czasie ruch mógłby odbywać się co najmniej w dwóch kierunkach jazdy:

a). Ulicą Kościuszki zachodnim pasem ruchu lub Al. Piłsudskiego/Al. Mickiewicza po pasie południowym- wobec faktu wybudowania tunelu trasy WZ lepszym rozwiązaniem wydaje się być pierwsze.

b). Al. Piłsudskiego po północnym torze wzdłuż przystanku centrum, wraz ze skretem w prawo w al. Kościuszki.

W przypadku gdy pod przystankiem wybudowany został tunel powinno się w tym miejscu wprowadzić bezwzględny (lub względny np. dla co drugiego tramwaju) priorytet, włączając sygnał zielonego światła dla samochodów dla zaproponowanych kierunków jazdy. Miejsc oraz sytuacji takich jak wkoło przystanku Centrum w Łodzi jest wyjątkowo wiele. Ruch tramwajów oraz przepływ pojazdów przez skrzyżowania można usprawnić również wyłączając w pewnych miejscach w mieście sygnalizację dla tramwajów (nie włączając fazy

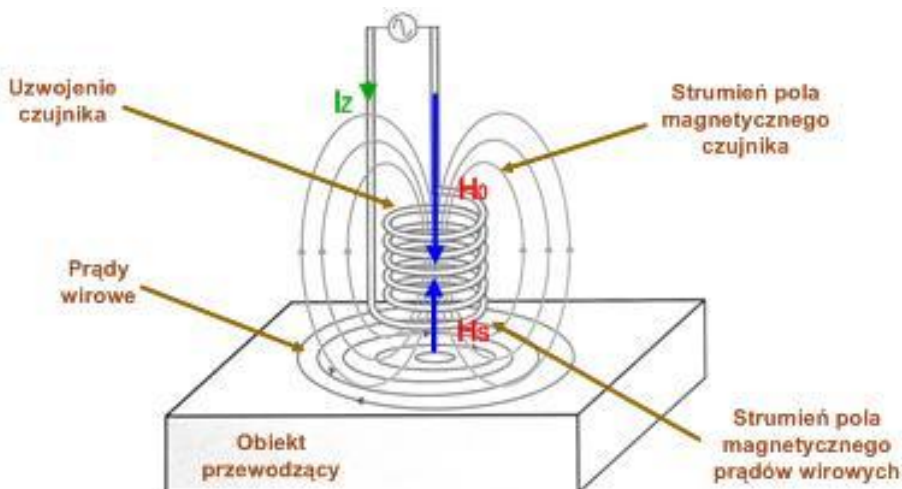
pozwalającej jechać tramwajom) wtedy gdy faktycznie w pobliżu nie ma żadnego tramwaju mającego w danym kierunku przejechać przez skrzyżowanie. Spowoduje to, że kierowcy samochodów będą mogli wjechać na skrzyżowanie nie czekając aż minie faza, w której przez skrzyżowanie powinien przejechać tramwaj (którego akurat w danej fazie nie będzie). Skrzyżowaniem takim w Łodzi jest chociażby wspomniane już przeze mnie skrzyżowanie Żeromskiego/Kopernika, Zielona/Gdańska, Legionów/Zachodnia, Zachodnia, Zgierska, Dolna/Łagiewnicka oraz większość skrzyżowań z tramwajami w Łodzi. Warto pominąć niepotrzebne fazy w cyklu sygnalizacji świetlnych aby czas ten spożytkować na przejazdy pojazdów. Pomijając pewne fazy dla tramwajów gdy tych po prostu na skrzyżowaniu nie ma lub wyłączając sygnał „zielony” bezpośrednio po przejechaniu pojazdu szynowego znacznie skracam czas blokady skrzyżowania i więcej pojazdów szybciej może opuścić skrzyżowanie. Jeżeli wyłączone zostaną niepotrzebne fazy „zielonego światła” dla tramwaju, można spróbować w pozostałych fazach wprowadzać względne lub bezwzględne pierwszeństwo dla tych pojazdów.

5. Zasada działania pętli indukcyjnych- najczęściej wykorzystywanych elementów do sterowania skrzyżowaniami

Detekcja pojazdów przez pętle indukcyjne nie opiera się na efekcie ferromagnetycznym, ale na wzbudzaniu prądów wirowych w przewodzących częściach pojazdu, którego efektem jest mierzalny spadek indukcyjności pętli. Dlatego dla detekcji pojazdów istotne jest przewodnictwo elektryczne materiału z którego są zbudowane, jego powierzchnia oraz odległość od pętli, a nie przenikalność magnetyczna czy masa. Aluminium wykryć jest wręcz łatwiej niż stal [7]. Podstawą działania indukcyjnego czujnika pętlowego, popularnie nazywanego pętlą indukcyjną, jest zjawisko prądów wirowych. Jest to zjawisko dobrze znane fizykom a zwłaszcza elektrotechnikom od wielu dziesiątków lat.. Zjawisko prądów wirowych występuje wszędzie tam gdzie w obszarze występowania zmiennego pola magnetycznego znajduje się obiekt metalowy. Pole magnetyczne napotykając na swojej drodze obiekt wykonany z metalu wnika do niego indukując przepływ prądu elektrycznego. Kierunek i wartość prądów wirowych zgodny jest z regułą Lentza, tzn. taki, że wytworzone pole magnetyczne wynikające z ich przepływu przeciwdziała polu, które jest przyczyną ich indukowania. Efektem tego jest zmniejszenie strumienia pola magnetycznego wywołującego to zjawisko. Indukcyjne czujniki pętlowe zasilane są najczęściej sinusoidalnym napięciem przemiennym. Prąd płynący przez zwoje indukcyjnego czujnika pętlowego wytwarza sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne (pole pierwotne) w przestrzeni wokół niego [10]. Pole to natrafiając na obiekt metalowy znajdujący się w jego pobliżu indukuje w nim prądy wirowe, które wytwarzają sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne, osłabiające pole pierwotne. Skutkiem tego pole wypadkowe posiada także zmniejszony moduł oraz jest przesunięte w fazie. W wyniku zaistnienia

zjawiska, o którym mowa, impedancja czujnika obserwowana z jego zacisków także zmienia się zarówno co do modułu jak i kąta fazowego. To właśnie w tej zmianie, odnoszonej do pierwotnych parametrów czujnika tzn. bez obecności obiektu pomiaru jakim jest poruszający się pojazd w jego otoczeniu, zawarta jest informacja o obiekcie, jego położeniu, gabarytach, rodzaju materiału, prędkości [9]. Niestety bardzo często za fakt niewykrywania lekkich rowerów czy też motorowerów winione są właśnie pętla. To, że w Polsce zdarzają się pętla "nie widzące" rowerów, to kwestia błędów w projekcie, wykonaniu i regulacji pętli, a nie aluminiowej ramy. Plusem pętli indukcyjnych jest niewątpliwie wspieranie sterowania sygnalizacją świetlną- jeżeli na danym pasie ruchu nie ma pojazdu to system nie włącza dla tej fazy zielonego światła, jest ona pomijana w cyklu. Rozwiązanie to sprawdza się zazwyczaj jedynie w porach pozaszczytowych gdyż tylko wtedy jest szansa, że jakiegokolwiek fazy sygnalizacji na danym pasie ruchu nie pojawi się żaden pojazd. Zazwyczaj na każdym z pasów ruchu znajduje się przynajmniej jeden pojazd, który wzbudza pętla i system musi załączyć daną fazę. Wielu inżynierów jako jedną z niewątpliwych zalet pętli indukcyjnych wymienia fakt, iż po przejechaniu pojazdu przez pętla system wyłącza zielone światło i tym samym przyspiesza załączenie się kolejnej fazy. Można się z tym zgadzać lub nie lecz w Łodzi funkcjonuje to źle lub nie funkcjonuje to w ogóle. Przykładem jest chociażby skrzyżowanie ulic Wielkopolskiej i Lutomierskiej z Al. Włókniarzy. W co najmniej dwóch fazach w kierunku północ-południe po przejechaniu samochodów cały czas świecą się zielone światła a nie powinny bo w tym czasie niejednokrotnie mogłaby zostać załączona kolejna faza lub też nawet dwie. Jak widać system ten sprawdza się tylko w sytuacji kiedy można pominąć jedną z faz- jeżeli nie posiadamy sygnału wejściowego o zbliżającym się pojeździe. Niestety system nie funkcjonuje prawidłowo jeśli chodzi o wyłączenie lub skrócenie danej fazy. Kolejnym minusem w stosowaniu tego typu rozwiązań są determinanty montażu tego typu urządzeń. Niestety nie można umieścić ich zbyt głęboko w warstwie ścieralnej asfaltu lub tuż pod nią ponieważ zakłóci to lub całkowicie uniemożliwi działanie pętli. Jeżeli natomiast umieścimy pętla zbyt płytko, umożliwiając tym samym jej prawidłowe działanie to narażamy elementy płyty na przerwanie w trakcie użytkowania- asfalt przy wysokich temperaturach intensywnie pracuje i cząsteczki zmieniają swoje położenie, tworzą się koleiny a tym samym druty, z których zbudowana jest pętla ulegają uszkodzeniu. Zatem pętla jest dobrym rozwiązaniem tylko na załączanie zielonego światła dla pojazdów ale okres eksploatacyjny tego urządzenia nie jest zbyt długi. Zapewne w Łodzi wadliwe działanie tego typu rozwiązania w większości przypadków determinowane jest głównie właśnie tymi dwoma czynnikami. Bardzo często zdarza się, że duży pojazd ciężarowy może zakłócać sygnał pętli indukcyjnej znajdującej się na sąsiednim pasie. Niezaprzeczalną zaletą pętli indukcyjnych jest fakt, iż pozwalają one na określanie prędkości pojazdów, które przejeżdżają przez skrzyżowanie, liczby pojazdów oraz kilku innych danych, które są wykorzystywane do sterowania i kalibracji sygnalizacją świetlną przez

zarządców. To czy dane te są wykorzystywane we właściwy sposób i czy w ogóle są wykorzystywane to kwestia odpowiedniej jakości zarządzania w komórkach odpowiedzialnych. Podsumowując, pętle indukcyjne to dobre rozwiązanie jednak nie w pełni odpowiadające potrzebom obecnych aglomeracji miejskich, cechujące się krótkim okresem eksploatacyjnych i stosunkowo dużą zawadnością.

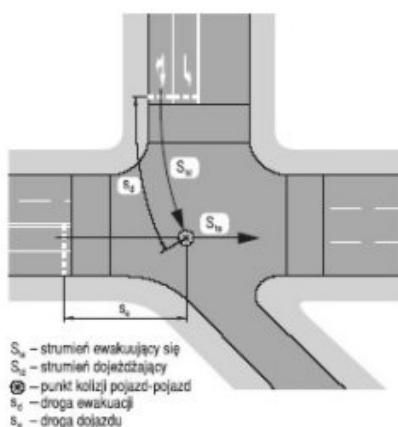


Rys. 1. Pętla indukcyjna – zasada działania

Źródło: [ITS- Inteligentne Systemy transportowe – z 28.06.2018r.](#)

6. Normy prawne regulujące przepływ strumienia pojazdów przez skrzyżowania- czas międzydzielony

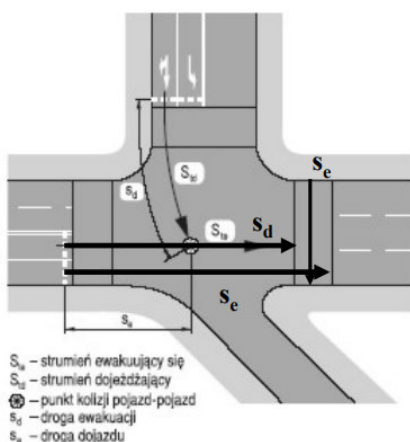
Czas międzydzielony jest to czas od zakończenia nadawania sygnału zielonego do rozpoczęcia nadawania sygnału zielonego dla dwóch pasów ruchu wzajemnie kolizyjnych, z których pierwszy jest strumieniem ewakuującym się ze skrzyżowania a drugi wjeżdżającym na to samo skrzyżowanie. Jest to minimalny czas, który musi zostać zaprogramowany do sygnalizacji świetlnej aby zachować teoretyczne bezpieczeństwo- aby teoretycznie auta zdążyły się ewakuować ze skrzyżowania. Niestety jest to właśnie sytuacja tylko teoretyczna bo sygnalizacja świetlna nie wiedząc czy auta opuściły już skrzyżowanie nadaje sygnał jazdy dla innego pasa. Problem pojawia się w momencie gdy wylot skrzyżowania jest zablokowany i auta nie mogą go opuścić a z drugiej strony nadjeżdżają kolejne. Aby obliczyć wymagany czas międzydzielony stosowane są odpowiednie wzory i normy. Czas ten wylicza się zgodnie z poniższymi założeniami:

OBLICZANIE CZASÓW MIĘDZYDZIELONYCH:

$$t_m = t_z + t_e - t_d$$

$$t_e = \frac{s_e + l_p}{v_e}$$

$$t_d = \frac{s_d}{v_d} + 1$$

CZASY MIĘDZYDZIELONE Z UDZIAŁEM PIESZYCH:

v_e :

- dla pieszych = 1,4 m/s (1,0 m/s w przypadku przejść dla niepełnosprawnych),
- dla rowerzystów = 2,8 m/s

Rys. 2. Obliczanie czasów międzydzielonych.

Źródło: *Inżynieria Ruchu, Politechnika Wrocławska, rozdział 8, 2007*

Wyliczany za pomocą powyższych wzorów czas międzydzielony jest programowany dla danej sygnalizacji świetlnej. Zaprogramowany cykl nie wie i nie może sam ocenić czy dane auta opuściły już skrzyżowanie czy nie i dlatego należy zadać mu minimalny czas, w którym na skrzyżowanie nie może wjechać żadnej pojazd i teoretycznie w tym czasie wszystkie pojazdy powinny opuścić skrzyżowanie.

Przykład obliczeń i macierzy czasów międzyzielonych

gr. ewak.	gr. dojazd.	t _z	se	ve	lp	te	sd	vd	a	td1	td2	td	tm	po zaokr.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
K1	K2	3	6	13,8	10	1,2	15	19,4	3,5	1,8	3,1	1,8	2,4	3
K1	K4	3	11	13,8	10	1,5	5	19,4	3,5	1,3	1,9	1,3	3,3	4
K2	K1	3	15	14	10	1,8	6	13,8	3,5	1,4	2,1	1,4	3,4	4
K2	K3	3	6	14	10	1,1	10	13,8	3,5	1,7	2,6	1,7	2,4	3
K3	K2	3	10	13,8	10	1,4	6	19,4	3,5	1,3	2,1	1,3	3,1	4
K3	K4	3	5	13,8	10	1,1	10	19,4	3,5	1,5	2,6	1,5	2,6	3
K4	K1	3	5	14	10	1,1	11	13,8	3,5	1,8	2,7	1,8	2,3	3
K4	K3	3	10	14	10	1,4	5	13,8	3,5	1,4	1,9	1,4	3,1	4

	K1	K2	K3	K4	
K1		3		4	K1
K2	4		3		K2
K3		4		3	K3
K4	3		4		K4
	K1	K2	K3	K4	

Przykład obliczeń czasów międzyzielonych z udziałem pieszych

gr. ewak.	gr. dojazd.	t _z	se	ve	lp	te	sd	vd	a	td1	td2	td	tm	po zaokr.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
K1a	K3b	3	23	13,9	10	2,4	22	13,9	3,5	2,6	3,7	2,6	2,8	3
	K4a	3	13	13,9	10	1,7	20	13,9	3,5	2,4	3,5	2,4	2,2	3
K1b	K3a	3	18	13,9	10	2,0	24	13,9	3,5	2,7	3,8	2,7	2,3	3
	K4a	3	15	13,9	10	1,8	15	13,9	3,5	2,1	3,1	2,1	2,7	3
	K4b	3	30	13,9	10	2,9	17	13,9	3,5	2,2	3,3	2,2	3,7	4
K2	K3b	3	25	13,9	10	2,5	32	13,9	3,5	3,3	4,4	3,3	2,2	3
	K4a	3	30	13,9	10	2,9	25	13,9	3,5	2,8	3,9	2,8	3,1	4
K3a	K1b	3	24	13,9	10	2,4	18	13,9	3,5	2,3	3,3	2,3	3,2	4
	K4a	3	27	13,9	10	2,7	12	13,9	3,5	1,9	2,8	1,9	3,8	4
K3b	K1a	3	22	13,9	10	2,3	23	13,9	3,5	2,7	3,7	2,7	2,6	3
	K2	3	32	13,9	10	3,0	25	13,9	3,5	2,8	3,9	2,8	3,2	4
	K4a	3	37	13,9	10	3,4	25	13,9	3,5	2,8	3,9	2,8	3,6	4
K4a	K1a	3	20	13,9	10	2,2	13	13,9	3,5	1,9	2,9	1,9	3,2	4
	K1b	3	15	13,9	10	1,8	15	13,9	3,5	2,1	3,1	2,1	2,7	3
	K2	3	25	13,9	10	2,5	30	13,9	3,5	3,2	4,2	3,2	2,4	3
	K3a	3	12	13,9	10	1,6	27	13,9	3,5	2,9	4,0	2,9	1,6	2
	K3b	3	25	13,9	10	2,5	37	13,9	3,5	3,7	4,7	3,7	1,9	2
K4b	K1b	3	17	13,9	10	1,9	30	13,9	3,5	3,2	4,2	3,2	1,8	2
K1a	PR2	3	40	13,9	10	3,6						0,0	6,6	7
K1b	PR3	3	41	13,9	10	3,7						0,0	6,7	7
K2	PR2	3	10	13,9	10	1,6						0,0	4,6	5
K3a	PR3	3	12	13,9	10	1,8						0,0	4,6	5
	PR4	3	37	13,9	10	3,4						0,0	6,4	7
K3b	PR3	3	12	13,9	10	1,6						0,0	4,6	5
K4a	PR4	3	10	13,9	10	1,4						0,0	4,4	5
K4b	PR3	3	27	13,9	10	2,7						0,0	5,7	6
	PR4	3	11	13,9	10	1,5						0,0	4,5	5
PR2	K1a	0	8	1,4	0	5,7	32	13,9	3,5	3,3	4,4	3,3	2,4	3
	K2	0	8	1,4	0	5,7	2	13,9	3,5	1,1	1,4	1,1	4,6	5
PR3	K1b	0	11	1,4	0	7,9	31	13,9	3,5	3,2	4,3	3,2	4,6	5
	K3a	0	11	1,4	0	7,9	2	13,9	3,5	1,1	1,4	1,1	6,7	7
	K3b	0	11	1,4	0	7,9	2	13,9	3,5	1,1	1,4	1,1	6,7	7
	K4b	0	11	1,4	0	7,9	18	13,9	3,5	2,3	3,3	2,3	5,6	6
PR4	K3a	0	12	1,4	0	8,6	28	13,9	3,5	3,0	4,1	3,0	5,6	6
	K4a	0	12	1,4	0	8,6	2	13,9	3,5	1,1	1,4	1,1	7,4	8
	K4b	0	12	1,4	0	8,6	2	13,9	3,5	1,1	1,4	1,1	7,4	8

Rys.3. Przykładowe obliczenia czasów międzydzielonych.

Źródło danych: Inżynieria Ruchu, Politechnika Wrocławska, rozdział 8, wersja 2007

Jest to też zabezpieczenie przez pojazdami, które w nagły sposób wjeżdżają na skrzyżowanie na żółtym lub też już na czerwonym świetle. Jest to swego rodzaju zabezpieczenie, które teoretycznie powinno chronić uczestników ruchu komunikacyjnego. Niestety nie jest to pewne zabezpieczenie gdyż cały czas zdarzają się kierowcy, którzy za nic mają czerwone światło.

Jak można temu zaradzić? Innowacyjne i autorskie rozważania na ten temat zawarte zostały poniżej.

7. Liczniku czasu na skrzyżowaniach- zalety i wady

Dyskusja nad sprawą sekundników umieszczanych obok sygnalizatorów na skrzyżowaniach w Polsce toczy się od bardzo dawna. Sekundniki takie zamontowane były między innymi w Płocku oraz w Toruniu. Do maja 2017 roku nie było żadnego prawa stanowiącego o tym czy można je montować czy nie. W wielu miejscach w Polsce w pewnym momencie nakazano nawet ich demontaż. W Łodzi do tej pory nie skorzystano z tego rozwiązania. 25 maja 2017 roku ówczesny szef MSWiA Mariusz Błaszczak oraz Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa wydali rozporządzenie, które pozwala montować sekundniki na skrzyżowaniach dróg pod zarządem GDDKiA, starostów, burmistrzów marszałków, wojewodów oraz miast na prawach powiatów. Stanowi to o tym, że od czerwca 2017 roku żadne z zamontowanych sekundników (o ile zrobiono to zgodnie z prawem) nie będą musiały zostać zdemonstrowane. Między innymi Płock oraz Toruń mogą odetchnąć z ulgą.

Sekundniki mają swoich zwolenników oraz przeciwników. Zwolennicy są zadowoleni, że od teraz wiedzą czy zdążą przejechać na zielonym świetle czy odpowiednio wcześniej powinni zacząć hamować. Wskazują na to, że ich zdaniem bezpieczeństwo na drogach poprawiło się i od tej pory kierowcy przejeżdżający na czerwonym świetle nie mają prawa tłumaczyć się przejazdem na czerwonym świetle, że „nie zdążyliby i tak wyhamować i spowodowałiby większe zagrożenie”. Zwolennicy tego rozwiązania wskazują również na fakt możliwości przygotowania się kierowcy do ruszenia ze skrzyżowania gdyż wie on dokładnie, w którym momencie będzie mógł ruszyć. Ich zdaniem zdecydowanie poprawia to płynność na skrzyżowaniach i nie powoduje opóźnień wywołanych przez kierowców, którzy po zapaleniu się zielonego światła potrzebują czasu by „wrzucić jedynkę”. Niestety są również przeciwnicy tej metody, których na szczęście jest mniej. Wskazują na to iż kierowcy, którzy widząc, że zostało mało czasu na przejazd i tak będą się spieszyć bo najwyżej przejadą na żółtym świetle. W pewnym sensie jest to zrozumiała obawa lecz należy zwrócić uwagę na inny aspekt. Kiedy nie ma na skrzyżowaniu sekundników to w momencie zapalenia się żółtego światła na każdym ruchu na żółtym świetle przejeżdża przynajmniej jedno auto. Powoduje to tym samym, że na skrzyżowaniu, na którym 4 pasy mają zielone światło w chwili zapalenia się żółtego sygnału przez skrzyżowanie przejeżdża od 4 do 10 aut na pomarańczowym świetle. Gdyby na tym samym skrzyżowaniu zamontować

sekundniki przypadki osób przejeżdżających na żółtym świetle zmniejszyłyby się do 1-4. Byłyby to przypadki kierowców skrajnie nieodpowiedzialnych, którzy w każdych warunkach zawsze na drodze się znajdują- niezależnie czy na skrzyżowaniu będą zamontowane sekundniki czy nie. Obecnie można znaleźć wiele badań i ekspertyz na ten temat. Zarówno zwolenników jak i przeciwników tej metody jest tyle ile opracowań naukowych powstało na ten temat. Rozwiązanie to na pewno mogłoby usprawnić i poprawić przepustowość ruchu w centrum miasta gdzie prędkości kierowców są zdecydowanie mniejsze od tych uzyskiwanych na odcinkach miejskich drogi krajowej 99 oraz 14. W centrach miast w czasie szczytu komunikacyjnego prędkości kierowców podczas normalnego przemieszczania się oscylują w granicach 40-50 km/h. Jest to bezpieczna prędkość aby zatrzymać pojazd w stosunkowo krótkim czasie i na pewno ograniczyłoby dzięki sekundnikom przejazdu kierowców przez skrzyżowanie na pomarańczowym świetle (kierowcy, którzy przejeżdżają na ostatnią chwilę tak czy inaczej jeżeli mają dopuścić się takiego manewru i tak go wykonają). Sekundniki na skrzyżowaniach bardzo ułatwić mogą życie motorniczym tramwajów. Niejednokrotnie na przystankach komunikacji miejskiej można zaobserwować iż motorniczy przez cały czas gdy dla tramwaju pali się pozioma belka zabraniająca przejazdu mają otwarte drzwi dla pasażerów. Następnie gdy sygnalizacja zezwala na ruszenie tramwaju dopiero motorniczy zamyka drzwi i po około 10 sekundach pojazd szynowy rusza. Gdyby motorniczy wiedział kiedy dokładnie będzie mógł ruszyć odpowiednio wcześniej mógłby zamknąć drzwi i nie tracić czasu na skrzyżowaniu. Średni czas takiego oczekiwania na ruszenie tramwaju można przyspieszyć średnio o 11,85 sekundy. W tym czasie przez skrzyżowanie mogłoby dodatkowo przejechać od 3 do nawet 10 samochodów osobowych.

W Polsce szczególnie w dużych miastach przybywa przeciwników montowania sekundników na skrzyżowaniach. Jako główny powód podają fakt, że coraz to większa liczba skrzyżowań objęta jest systemem dynamicznego sterowania ruchem na skrzyżowaniach objętych systemem ITS. Są to głównie pracownicy Zarządu Dróg i Inżynierowie Ruchu. Wskazują, że sekundników na skrzyżowaniach z dynamicznym sterowaniem ruchu nie można montować bo i tak będą pokazywać błędny czas w sekundach, który niejednokrotnie jest wydłużany lub (choć rzadziej) skracany przez system [11]. Faktycznie system w takiej formie może wprowadzać kierowców w błąd i powodować niebezpieczeństwo na skrzyżowaniu. Kierowca, który dostanie komunikat, że ma jeszcze 10 sekund na przejechanie przez skrzyżowanie wie, że nie musi zwalniać. Jeżeli nagle system skróci czas danej fazy dojdzie do gwałtownego hamowania tego kierowcy oraz wielu kierowców podążających za nim lub przed nim.

8. Nowe rozwiązanie

O ile fakt ten jest zrozumiały w przypadku urządzeń nazywanych sekundnikami (które wyświetlają tak jak zegar sekundy) o tyle argumenty te

zdają się być całkowicie obalane w przypadku „sekundników dynamicznych”. Poniżej na grafice został zaprezentowany nowy, innowacyjny sekundnik dynamiczny. Od tej pory na skrzyżowaniach na dodatkowych sygnalizatorach nie będą musiały być wyświetlane stałe wartości w sekundach, które przy skróceniu lub wydłużeniu danej fazy mogły wprowadzać kierowców w błąd i powodować tym samym niebezpieczne sytuacje na skrzyżowaniach. Dynamiczny sygnalizator czasu danej fazy pozwala wyświetlać nie sekundy lecz zakresy czasu za pomocą kolorów na okrągłej tarczy (kolor zielony, żółty i czerwony). Kolor zielony oznaczać będzie, że w najbliższych kilku sekundach kierowcy nie powinni obawiać się o zmianę światła, kolor żółty oznacza, że za chwilę należy spodziewać się zmiany światła, natomiast kolor czerwony oznacza, że należy rozpocząć manewr hamowania gdyż za chwilę sygnalizacja świetlna przestanie wyświetlać sygnał zezwalający wjazd na skrzyżowanie. Analogiczna sytuacja będzie w przypadku oczekiwania na zezwolenie na wjazd na skrzyżowanie. Kolor czerwony oznaczać będzie niemalże natychmiastową zmianę wyświetlanych komunikatów przez sygnalizację świetlną. Zaletą takiego rozwiązania jest to iż mogłaby znaleźć ona zastosowanie na skrzyżowaniach z dynamiczną sygnalizacją świetlną. Gdy dana faza miałaby zostać skrócona kolejne kafelki na tarczy wyświetlacza „sekundnika dynamicznego” zapalałyby się znacznie szybciej, analogicznie w przypadku wydłużenia danej fazy, kafelki wyświetlacza sekundnika zapalałyby się wolniej przez co kierowcy mieliby również dynamiczny komunikat w postaci możliwości przybliżonego określenia palenia się danego światła na skrzyżowaniu. Rozwiązanie takie można zastosować na obecnych skrzyżowaniach zarówno ze stałoczasową sygnalizacją jak i na skrzyżowaniach z dynamiczną sygnalizacją. Wspomagane będą przez obecne systemy sterowania ruchem, które obecnie masowo i praktycznie tylko i wyłącznie wykorzystują pętle indukcyjne opisane w poprzednich rozdziałach artykułu. Bez konieczności instalowania dodatkowych urządzeń, zmiany systemu sterowania ruchem, można w stosunkowo tani sposób usprawnić komunikację chociażby w centrach miast. Komunikaty w postaci dynamicznego paska lub okręgu kolorów zdecydowanie ułatwiłyby poruszanie się po ulicach miast zarówno kierowcom indywidualnym, kierowcom pojazdów komunikacji miejskiej jak i pieszym oraz rowerzystom. W wyniku przeprowadzonego własnego badania wynika iż ponad 75% uczestników ruchu życzyłoby sobie aby takie usprawnienia zostały wprowadzone w Łodzi. Na podstawie tych danych można wnioskować, iż podobnych wyników badania należy spodziewać się w innych miastach.

Włączenie do dynamicznego systemu sterowania przepływem strumienia pojazdów na skrzyżowaniach dynamicznych sekundników określający przybliżony czas nadawania jednego komunikatu w postaci sygnalizacji świetlnej powinno zdecydowanie poprawić przepustowość skrzyżowań. Kierowcy mieliby czas aby przygotować się do ruszenia ze skrzyżowania, motorniczy wiedzieliby odpowiednio wcześniej kiedy powinni zamknąć drzwi do tramwaju. Jeżeli w jakimkolwiek przypadku lub w jakichkolwiek badaniach

doświadczalnych udowodniono by, że takie dodatkowe urządzenia na skrzyżowaniach zmniejszają bezpieczeństwo to należy mimo wszystko wprowadzić je do użytkowania lecz załączyć w fazie oczekiwania kierowców na zezwolenie na wjazd na skrzyżowanie. Czas przejazdu tracony jest przede wszystkim przez to iż kierowcy ruszają zbyt późno ze skrzyżowania, zatem wprowadzenie chociażby samych sekundników pokazujących przewidywany czas palenia się czerwonego światła umożliwi kierowcą przygotowanie się do ruszenia i zdecydowanie szybsze opuszczenie skrzyżowania. Byłoby to bardzo dobre, kompromisowe rozwiązanie, usprawniające ruch, zmniejszające zatamowania ruchu, zmniejszające wydalenie spalin, redukujące hałas rozwiązanie, które zapewni wymagane bezpieczeństwo.

9. Przyciski dla pieszych

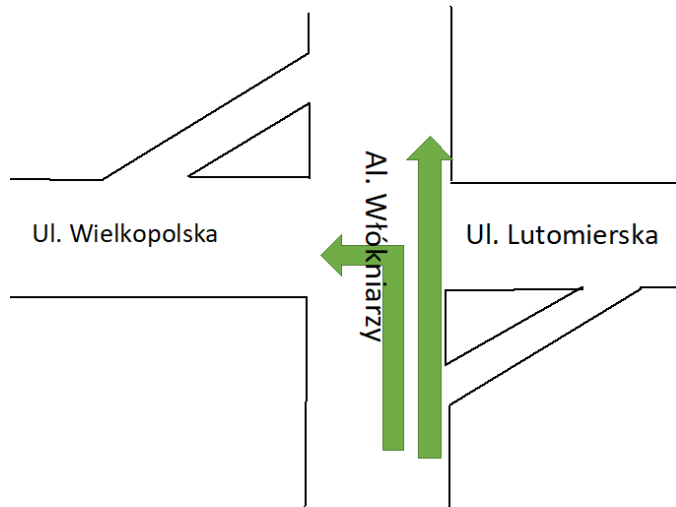
Obecnie w Łodzi jak i w całej Polsce na większości skrzyżowań montowane są przyciski dla pieszych, które po dotknięciu podczas najbliższego cyklu sygnalizacji świetlnej powinny uruchomić nadawanie sygnału zezwalającego pieszym na przejście przez pasy. W teorii wydaje się to bardzo praktyczne urządzenie a po kilku latach obecności na Polskich skrzyżowaniach piesi zdążyli się przyzwyczaić już korzystania z takiej infrastruktury drogowo-komunikacyjnej. Niestety jest to koleje z urządzeń wprowadzonych do systemu zarządzania ruchem jednak nie do końca spełnia ono swoje wymagania, często gubi dezorientuje przechodniów. Na fakt takich niepożądanych działań uwagę zwrócili pracownicy oraz inżynierowie Warszawskiego Zarządu Dróg. Stwierdzili iż urządzenia takie nie sprawdzają się w miejscach dużego natężenia ruchu pieszych a jedynie w miejscach gdzie ruch pieszych jest mały a natężenie ruchu tranzytowego jest duże. Obecnie w wielu miejscach zarówno w Łodzi jak i w Warszawie montowane są czujniki, które same wykrywają pieszych a przyciski pozostawione są tylko na wypadek awarii systemu czujników [12]. Jest to dość kontrowersyjne- skąd pieszy ma wiedzieć, że nastąpiła awaria czujnika, czy też czujnik działa nieprawidłowo? Wywołuje to dość duże kontrowersje i stawia pytanie czy warto zatem montować automatyczne czujniki wykrywania ruchu pieszych? W badaniu przeprowadzonym na potrzeby opracowania badania mieszkańcy Łodzi nie do końca wiedzieli czy są za czy przeciwko automatycznemu wykrywaniu pieszego, jednak wszyscy badani zgodnie odpowiedzieli, że przyciski dla pieszych są bardzo ważne. Przyciski dla mieszkańców Łodzi są bardzo ważne jednak mieszkańcy wymieniają szereg wad takiego rozwiązania. Jeżeli pieszy nie zdąży dotknąć przycisku w momencie gdy pojazdy mają sygnał zielony i przejeżdżają przez skrzyżowanie lecz w trakcie chociażby już żółtego światła dla tych pojazdów sygnał zielony dla przejścia dla pieszych się już nie zapali i trzeba bardzo długo czekać na następną fazę światła. Sytuacja taka ma miejsce między innymi na badanym szczegółowo skrzyżowaniu Al. Włókniarzy z ul. Wielkopolską i ul. Lutomierską. Należy zatem wprowadzić do systemu takie usprawnienie, że jeżeli pieszy wciśnie żółty

przycisk to o ile auta nie ruszą wcześniej niż szacowany czas przejścia pieszego przez co najmniej połowę skrzyżowania to sygnał zielony dla pieszego powinien i tak zostać załączony. Ewentualnie należy zastanowić się nad wprowadzeniem na drogach z pierwszeństwem obowiązku palenia się zielonego światła dla pieszych (oczywiście odpowiednio krócej niż dla fazy gdy to pieszy łączy zielone światło) tak jak odbywa się to na większości dróg podporządkowanych- przykładem jest chociażby wspomniane badane szczegółowo skrzyżowanie. Ponadto w wielu miejscach w Łodzi, szczególnie na skrzyżowaniach z przystankami tramwajowymi powinna być możliwość wyświetlania zielonego sygnału dla pieszych na połowie skrzyżowania (drugą połowę należy wzbudzić kolejnym przyciskiem). Spowoduje to znacznie mniejsze blokowanie skrzyżowania przez pieszych, którzy np. chcą dotrzeć tylko do połowy przejścia na przystanek tramwajowy. W Łodzi takie rozwiązanie z powodzeniem działa na skrzyżowaniu Al. Politechniki i ul. Wróblewskiego oraz w każdej części przystanku tramwajowego Piotrkowska-Centrum. Piesi wzbudzają jedynie tę część skrzyżowania z, której aktualnie korzystają. Rozwiązanie to wydaje się być szczególnie korzystne na długich ulicach w miastach gdzie sygnalizacja ustawione jest jedynie na przejściu dla pieszych lub dodatkowo jeśli przy przejściu dla pieszych znajdują się przystanki tramwajowe. Sytuacja taka ma miejsce w Łodzi chociażby na Al. Włókniarzy przy ul. Żubardzkiej oraz ul. Długosza, na ul. Julianowskiej przy ul. Żarnowcowa. W przypadku dwóch pierwszych ulic z powodzeniem działać może system dzielonego światła dla pierwszych gdyż w większości przypadków piesi potrzebują przedostać się jedynie do przystanku tramwajowego znajdującego się między pasami jezdni. W przypadku ulicy Julianowskiej należy zastanowić się nad dwoma wariantami: ustalenie ruchu pieszych względem ruchu na rondzie Powstańców 1983 roku lub względem skrzyżowania ul. Zgierskiej i ul. Julianowskiej. Przyciski znajdujące się na tym skrzyżowaniu powinny służyć jedynie do tego aby w razie braku jakichkolwiek pojazdów na wyżej wymienionych skrzyżowaniach umożliwiły pieszym przejście w stosunkowo krótkim czasie. Drugim dobrym rozwiązaniem może być chociażby zastosowanie pętli indukcyjnych w odpowiedniej odległości od skrzyżowania. System dla takich świateł powinien być tak zaprojektowany aby nie umożliwiał załączenia zielonego światła jeżeli przed skrzyżowaniem w pewnej odległości znajdowałby się samochód, który musiałby wytracać prędkość (system powinien dopuszczać sytuację zatrzymywania pojazdów tylko wtedy kiedy np. pieszy czeka na sygnalizację określony czas np. 1 minutę). Dodatkowo dobrym rozwiązaniem może być zastosowanie w godzinach pozaszczytowych rozwiązania, które z powodzeniem działa przez cały dzień na Al. Śmigłego Rydza w okolicach Parku nad Jasieniem. W tym miejscu znajduje się przejście dla pieszych oraz przystanek tramwajowy. Nie ma tutaj sygnalizacji świetlnej a jedynie pulsatywne światła nad znakami dla pieszych- w momencie pojawienia się pieszego na światłach kierowcy dodatkowo otrzymują sygnał błyskowy i są zmuszeni do przepuszczenia pieszego. Tym samym ruch samochodów blokowany jest jedynie w przypadku

przyjazdu tramwaju lub sporadycznych przekroczeń jezdni przez pieszych. Nie zawsze ułatwieniem jakim wydawać by się mogło jest sygnalizacja świetlna ułatwia życie zarówno kierowcą jak i pieszym. Montując jedynie cztery czujniki oraz kilka lamp błyskowych nad znakami, wyłączając sygnalizację świetlną chociażby w godzinach pozaszczytowych ułatwiamy życie zarówno kierowcą jak i pieszym, redukując wydalenie spalin, zużycie paliwa oraz zmniejszając poziom hałasu, zachowując przy tym samym wymagane bezpieczeństwo.

10. Analiza faz i cykli ruchu na skrzyżowaniu Al. Włókniarzy z ulicami Wielkopolską i Lutomierską w Łodzi

Skrzyżowanie Al. Włókniarzy z ulicami Wielkopolską i Lutomierską nie jest może największym skrzyżowaniem w Łodzi ale jednym z najbardziej zatłoczonych. Podczas przeprowadzonych badań analizowano przede wszystkim ile czas świeci się zielone światło dla danej fazy a przez skrzyżowanie nie przejeżdża żadne auto lub też ile czasu świeci się zielone światło a przez skrzyżowanie przejeżdża do 5 aut podczas gdy na czerwonym świetle kolejnej fazy czeka bardzo duża liczba aut. Ponadto badaniu poddano czas, w którym na skrzyżowaniu nie znajduje się ani jeden pojazd, czyli to ile czasu „marnuje” się podczas gdy mogłyby przez skrzyżowanie przejeżdżać inne auta gdyby zastosowano bardziej zaawansowaną i inteligentną technologię (nie zwiększając przy tym wymagań sprzętowych i nie komplikując całego systemu sterowania ruchem). W poniższych tabelach przedstawiono ile sekund wcześniej można byłoby wyłączyć daną fazę gdyż przy aktualnych warunkach panujących na skrzyżowaniu na pasie dla którego świeci się zielone światło nie ma żadnego pojazdu w godzinach szczytu komunikacyjnego (16:00-17:00).



Rys. 4. Pierwsza faza sygnalizacji świetlnej, zezwolenie wjazdu dla pojazdów nadjeżdżających od Katowic

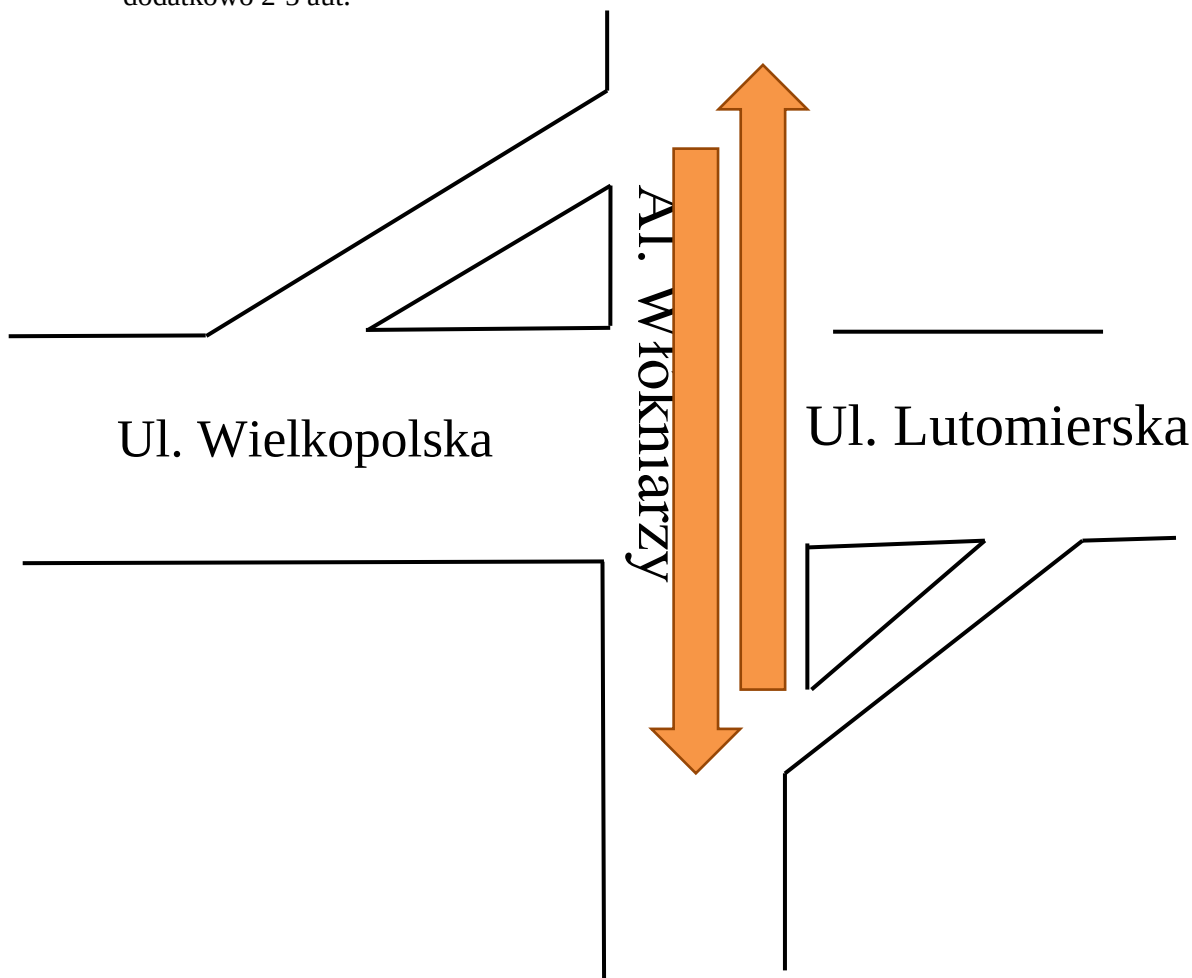
Źródło: opracowanie własne.

Tab. 1. Przedstawiająca straty czasu świecenia się światła zielonego dla skrętu w ulicę Wielkopolską w lewo oraz czerwonego po fazie wyłączenia światła zielonego dla lewoskrętu

Lp.	światło czerwone	światło zielone
1	0	18,3
2	1,23	0
3	0	0,96
4	0	3,37
5	0,45	3,02
6	0,96	0
7	1,56	2,45
8	2,56	4,16
9	0,15	0
10	0,25	2,15
11	1,12	3,45
średnia	0,75	3,44

Źródło: opracowanie własne

Dla zaprezentowanego kierunku ruchu w godzinach szczytu komunikacyjnego istniałaby możliwość skrócenia czasu świecenia się sygnału zielonego dla skrętu w lewo w ulicę Wielkopolską o średnio blisko sekundę. Również istnieje możliwość aby przyspieszyć kolejną fazę światła (ruch ulicą włókniarzy w kierunku północnym oraz południowym) o nieco ponad 3,4 sekundy. Łącznie gdyby system sterujący sygnalizacją świetlną skracał prawidłowo (mają dane z czujników zapewniających bezpieczeństwo) tę fazę sygnalizacji w ciągu następnej fazy przez skrzyżowanie mogłoby przejechać dodatkowo 2-5 aut.



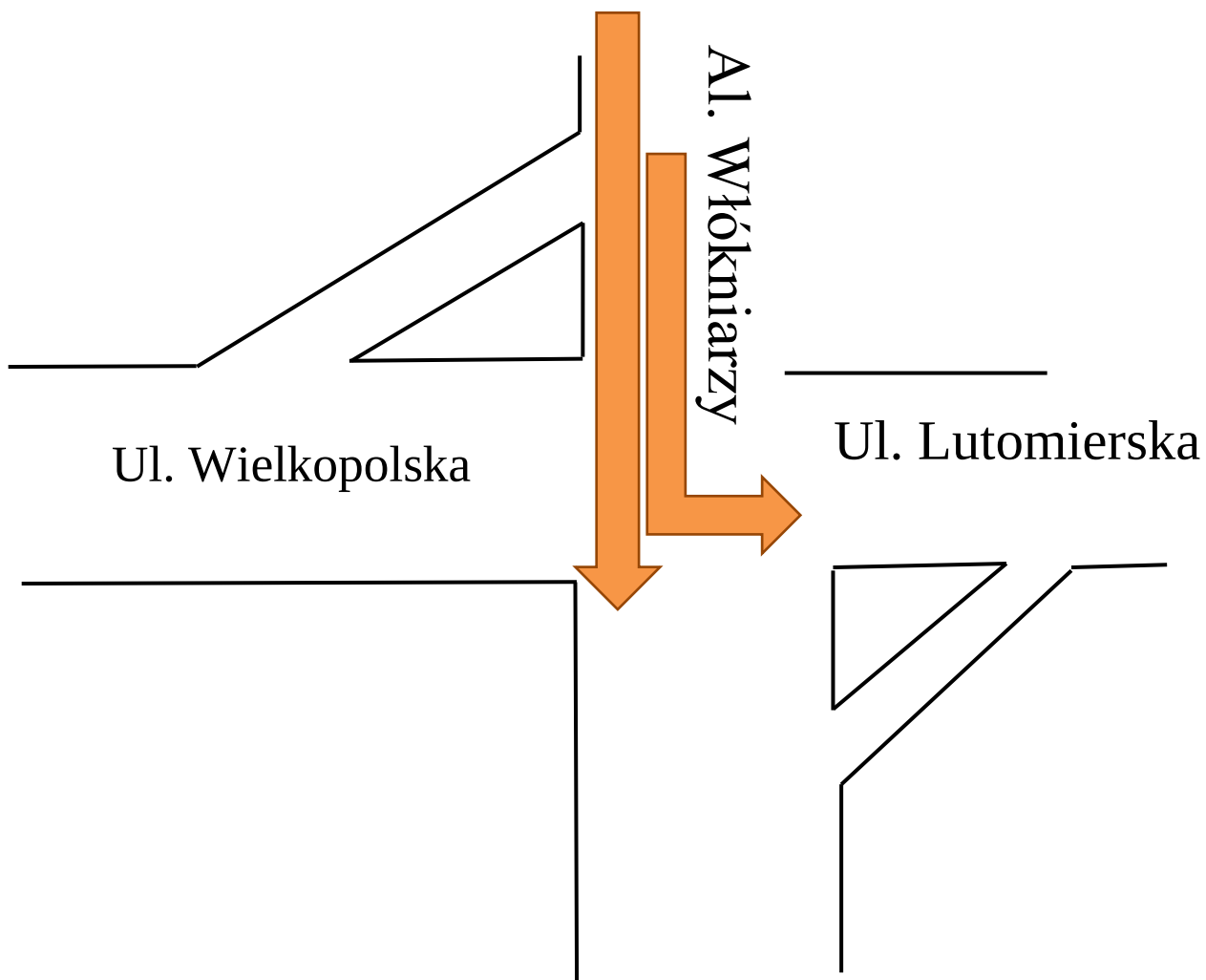
Rys. 5. Przejazd przez skrzyżowanie w kierunku północnym oraz południowym
Źródło: opracowanie własne.

Tab. 2. Prezentująca straty czasu dla sygnału zielonego oraz czerwonego nadawanego dla kierowców jadących na wprost od Strony Katowic w stronę Gdańska

	ŚWIATŁO CZERWONE	ŚWIATŁO ZIELONE	ŚWIATŁO ZIELONE W TRAKCIE
1	4,25	7,62	16,2
2	3,36	18,83	16,35
3	8,65	16,27	32,02
4	2,3	10,32	14,65
5	5	0	17,23
6	3,45	12,36	23,05
7	3,25	4,65	21,5
8	4,16	14,23	17,36
9	5,1	0	23,1
10	3,99	5,36	17
11	2,11	8,96	27,25
ŚREDNIA	4,15	8,96	20,52

Źródło: opracowanie własne.

W trakcie fazy ruchu na Al. Włókniarzy północ-południe dla wschodniego pasa ruchu można zdecydowanie skrócić czasy cykli - nie robią tego zainstalowane na skrzyżowaniu pętle indukcyjne, co pozwala na stwierdzenie iż albo nie działają we właściwy sposób albo są już zepsute co jest bardzo możliwe iż asfalt już dawno zmienił swoją geometrię. W trakcie świecenia się sygnału zielonego dla kierowców jadących od Katowic mniej więcej w połowie cyklu przez średnio 20 sekund na skrzyżowaniu nie pojawia się żaden pojazd. W trakcie jednego cyklu pozostali kierowcy tracą na skrzyżowaniu średnio dodatkowe 20 sekund. W tym czasie mógłby zostać nadawany chociażby sygnał dla skrętu w lewo z Al. Włókniarzy w Ul. Lutomierską. Czas ten byłby dobrze wykorzystany. Druga strata dla tego cyklu to czas od przejazdu ostatniego auta do momentu zapalenia się sygnału czerwonego - średnio blisko 9 sekund. Ponadto po zapaleniu się sygnału czerwonego na skrzyżowaniu nie pojawia się żaden pojazd przez średnio 4 sekundy. Gdyby system był wyposażony w odpowiednie czujniki lub chociażby wspomniane pętle indukcyjne ale u wylotu skrzyżowania w samej tylko tej jednej fazie można byłoby zaoszczędzić ponad pół minuty.



Rys. 6. Przejazd przez skrzyżowanie w kierunku południowym wraz z fazą zielonego światła dla pojazdów skręcających w lewo w ulicę Lutomierską

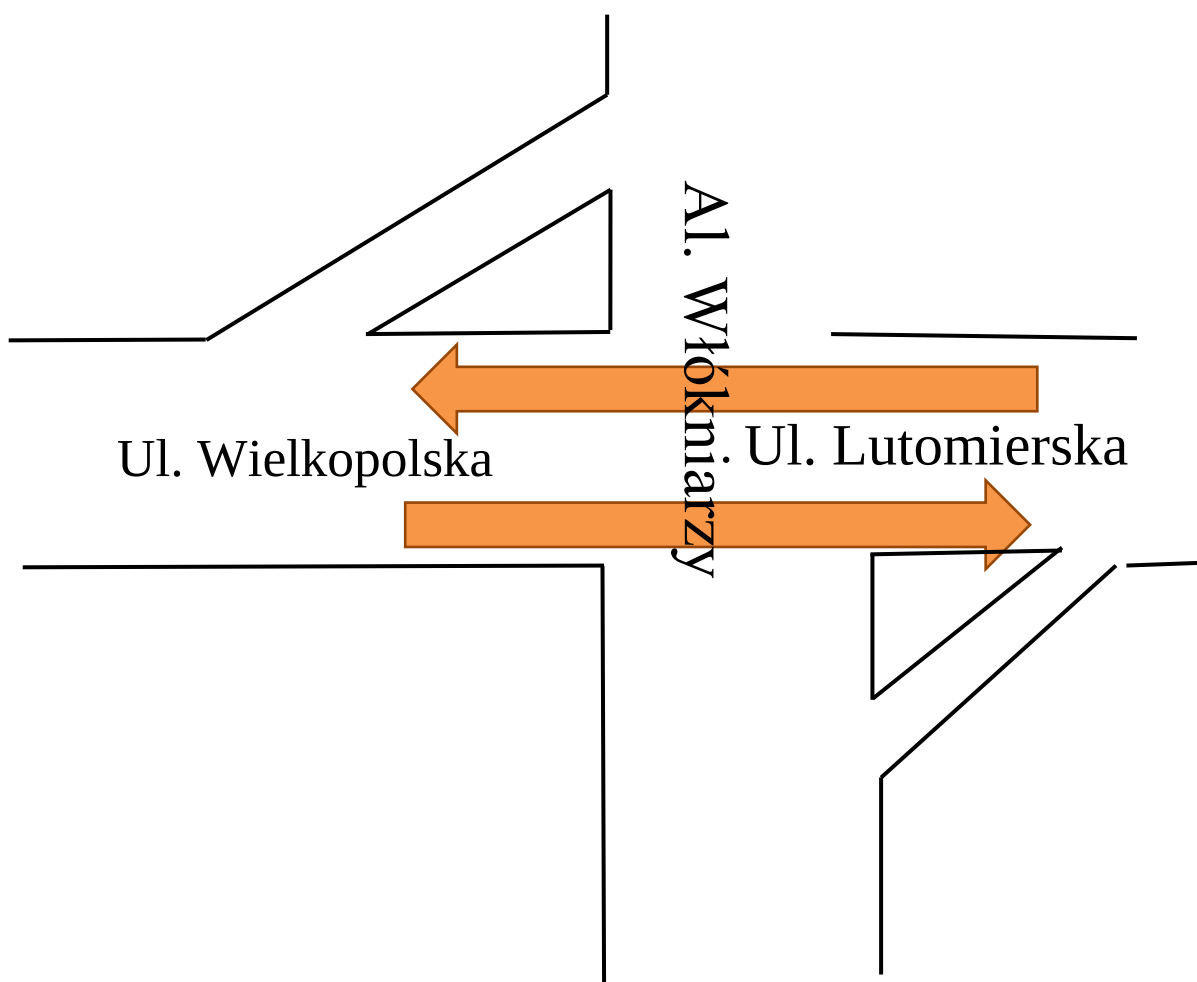
Źródło: opracowanie własne.

Tab. 3. Straty czasu świecenia się sygnałów dla jadących od północy w kierunku południa wraz ze skrętem w lewo w ul. Lutomierską

	ŚWIATŁO CZERWONE	ŚWIATŁO ZIELONE
1	10,52	8,12
2	1,25	4,85
3	4,36	6,39
4	14	3,46
5	5,36	3,4
6	0	5,12
7	1,25	3,65
8	16,25	4,56
9	5,36	3,36
10	17,25	4,52
11	21,36	5,15
ŚREDNIA	8,81	4,78

Źródło: opracowanie własne.

Od kiedy przez skrzyżowanie przejedzie ostatni pojazd światło zielone świeci się jeszcze przez średnio 4,78 sekundy. Mimo zatopienia w asfalcie pętli indukcyjnych nie spełniają one swoich zadań i nie wyłączają w odpowiedniej chwili zielonego sygnału. O ile ta sama pętla załącza lub nie zielone światło gdy auta są na skrzyżowaniu lub gdy się nie znajdują na nim o tyle pętla po przejechaniu skrzyżowania nie skraca fazy. Oprócz strat na zielone światło po załączeniu czerwonego sygnału i opuszczeniu skrzyżowania przez ostatnie auto na skrzyżowanie nie wjeżdża żadne auto przez średnio 8,81 sekundy. Na samej tej fazie kierowcy na skrzyżowaniu tracą ponad 13 sekund. Wynik ten jest jeszcze wyższy gdy żółty guzik przejścia dla pieszych włączą piesi. Mimo iż na pasie ruchu nie ma już żadnego auta a piesi opuścili pasy lub doszli na przystanek tramwajowy na skrzyżowanie nie może wjechać żadne inne auto.



Rys. 7. Przejazd przez skrzyżowanie w kierunkach wschód-zachód
Źródło: opracowanie własne.

Tab. 4. Utraty czasu podczas faz świateł przy przejeździe wschód-zachód

L.p	przejazd w stronę lutomierskiej		przejazd w stronę wielkopolskiej	
	światło czerwone	światło zielone	światło czerwone	światło zielone
1	7,6	0	1,25	2
2	7,65	0	4,65	1,9
3	7,66	2,56	8,45	2,1
4	7,29	3,16	4,56	1,81
5	7,59	0	5,69	3,01
6	6,15	1,12	7,23	2,03
7	4,08	1,56	5	5
8	5,26	0	4,11	1
9	7,96	0	4,25	2,03
10	8,12	0	2,65	1,47
11	7,16	0	5	3,14
średnia	6,96	0,76	4,80	2,32

Źródło: opracowanie własne.

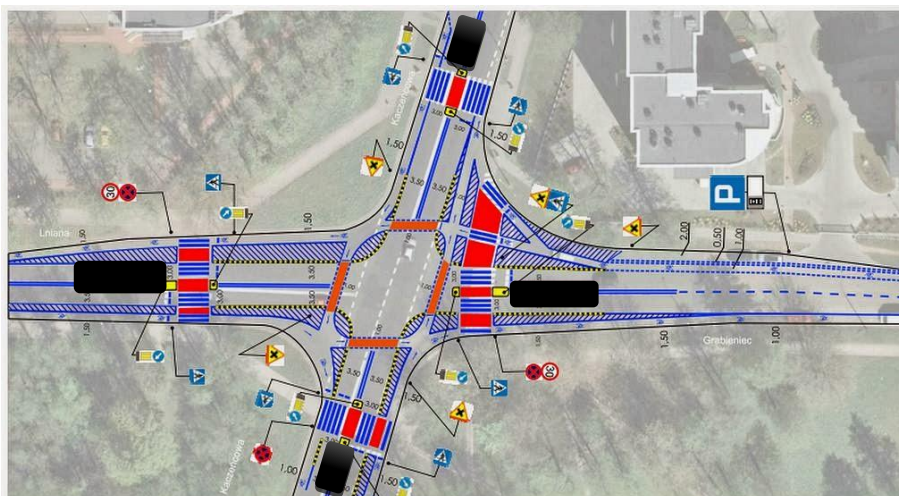
Podczas przejazdu drogą podporządkowaną z każdej ze stron marnuje się od 0,5 do 2,5 sekundy zielonego światła oraz po zapaleniu się czerwonego światła gdy ostatnie auto opuści już skrzyżowanie marnuje się około 5 sekund czerwonego światła. Gdyby wykorzystać ten czas (a system miałby pewność, że na skrzyżowaniu nie ma już auta i przy zachowaniu bezpieczeństwa może włączyć zielne światło dla następnej fazy) przez skrzyżowanie mogłoby przejechać kilka aut więcej.

Uwzględniając wyniki powyżej jednej sekundy każdej z faz w czasie jednego cyklu zmiany sygnalizacji świetlnej w najbardziej zatłoczonych godzinach można uzyskać od 25 sekund (licząc tylko niewykorzystane światło zielone) do ponad pół minuty czasu w którym przez skrzyżowanie mogłoby przejechać kilkanaście samochodów więcej. Jest to czas pozwalający na bardzo duże zwiększenie przepustowości lub dodanie dodatkowej fazy świateł- np. dodanie dodatkowe sygnalizatora z bezwzględnym skrętem z ulicy Lutomierskiej w lewo w stronę Katowic oraz z ulicy Wielkopolskiej w lewo w stronę Gdańska. Około pół minuty niewykorzystanego czasu podczas jednej fazy w godzinach szczytu oraz niewykorzystanie nawet ponad minuty w czasie pozaszczytowym powoduje bardzo duże zużycie paliwa, zwiększone wydzielanie szkodliwych substancji oraz zwiększenie hałasu i zużycie pojazdów. Wobec faktu ciągle rosnącego ruchu na ulicach należy opracować

metodę oraz sposób zoptymalizowania i wykorzystania tego potencjału. Wpływie to pozytywnie na środowisko oraz poprawi wydajność skrzyżowań w Polsce- niestety pętle indukcyjne- co potwierdziło powyższe badanie- nie spełniają dobrze swojej roli i nie odpowiadają na stale rosnące zapotrzebowanie.

11. Propozycja wykorzystania istniejących urządzeń do poprawy przepustowości skrzyżowań

Jak już zostało opisane wcześniej, obecnie najchętniej wykorzystywanym narzędziem do poprawy wydajności skrzyżowań w większości Polskich miast są stosowane pętle indukcyjne. Niestety jak już zostało opisane oraz udowodnione w powyższych badaniach, rozwiązanie to nie spełnia do końca swojej roli. Załącza zielone światło jeżeli wykryje pojazd jednakże w większości przypadków nie wyłącza fazy zielonego światła po przejechaniu pojazdu. Wiąże się to z niepoprawnym działaniem pętli wynikającym z jej konstrukcji lub z powodu przerwania się pętli (na większości skrzyżowań w Łodzi pętle nie leżą na równej płaskiej powierzchni lecz pofalowanej- wynika to z tego iż ciężkie pojazdy mechanicznie odkształcają ścieralną warstwę asfaltu powodując tym przesunięcia asfaltu a tym samym przerywanie się pętli. Pomijając mechaniczne aspekty montażu i eksploatacji pętli indukcyjnych jest to powszechnie stosowana metoda i mimo wszystko bardzo usprawniająca działanie sygnalizacji stałoczasowych. Jednakże w Polsce pętle stosowane są jedynie na dojazdach do skrzyżowań. Pozwala to załączyć lub nie fazę zielonego światła dla danych pasów. Istnieje jednak możliwość montażu pętli indukcyjnych za wylotami skrzyżowań dzięki czemu system mógłby dostać informacje o tym ile pojazdów i czy już czy jeszcze nie opuściło skrzyżowanie. Jest to rozwiązanie, które z obecnie stosowanych systemów sterowania sygnalizacją świetlną tworzy jeszcze bardziej inteligentne systemy. Niestety rozwiązanie zawiera dwa znaczące ograniczenia, które są dużymi minusami. Po pierwsze aby zamontować pętlę indukcyjną za skrzyżowaniem trzeba zamontować ją kilka metrów od skrzyżowania tuż za przejściem dla pieszych co zostało pokazane na grafice poniżej:



Rys. 8. Sposób montażu pętli indukcyjnych

Źródło: rowerowloz.pl

Biorąc pod uwagę standardowe wymiary pętli indukcyjnych zatapianych w asfalcie, lokalizację pasów oraz innych elementów pasa drogowego rozwiązanie staje się to mało praktyczne. Zanim ostatnie auto pokona niejednokrotnie odległość kilkudziesięciu metrów aby najechać na kolejną pętlę opóźni to informację przekazaną do systemu o czas, który można byłoby przekazać dla następnej fazy. Zatem rozwiązanie montażu pętli indukcyjnych u wylotu skrzyżowań ma rację bytu jedynie na skrzyżowaniach małych o ograniczonej dodatkowej infrastrukturze drogowej. Drugim aspektem, który nie zachęca do stosowania tego typu rozwiązań jest fakt iż system staje się bardziej skomplikowany i mniej wydajny. Zarządcy dróg oraz inżynierowie stwierdzają, że nawet bardzo zaawansowane sieci i systemy neuronowe nie są w stanie w czasie rzeczywistym przekazać informacji i załączyć odpowiednich świateł na skrzyżowaniu. Z mitem tym zmierzył się dr inż. Marcin Ruchaj z Politechniki Opolskiej z Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i informatyki, który opracował algorytm sterowania acykliczną sygnalizacją świetlną w zatłoczonej sieci miejskiej. Dzięki opracowanemu nowemu sposobowi przesyłania danych system opracowany przez dr Ruchaj może obsługiwać bardziej skomplikowaną sygnalizację świetlną uzyskując zdecydowanie lepsze wyniki niż nawet sieci neuronowe [13]. Dzięki zastosowaniu pętli indukcyjnych u wylotu prostych skrzyżowań oraz znacznie szybszego systemu niż obecnie są stosowane na Łódzkich ulicach można zdecydowanie bardziej poprawić przepływ strumienia pojazdów przez skrzyżowanie. Jest to rozwiązanie stosunkowo tanie i proste do zainstalowania. Należy rozważyć na ilu skrzyżowaniach w Łodzi rozwiązanie to przyniosło by pożądane skutki w postaci lepszego zarządzania czasem cykli na skrzyżowaniach.

12. Propozycja wykorzystania nowych urządzeń, niestosowanych do tej pory w infrastrukturze sterowania sygnalizacją świetlną na każdym typie skrzyżowań z nawet bardzo rozbudowaną infrastrukturą drogową

Coraz częściej na drogach w całej Polsce można zauważyć srebrne, metalowe paski montowane wzdłuż drogi. Są to wagi preselekcyjne. Urządzenia te służą do wykrywania i ważenia pojazdów. Dzięki tym urządzeniom Inspekcja Transportu Drogowego ma możliwość zarejestrowania przybliżonego nacisku na oś pojazdu, określenia liczby przejeżdżających pojazdów a nawet prędkości pojazdu. Urządzenia takie są zamontowane w Łodzi między innymi na Ul. Zgierskiej oraz Al. Jana Pawła II. Jest to dobre urządzenie ponieważ żaden z pojazdów, który jest przeciążony nie przejedzie niezauważony i nie powinien uniknąć mandatu. Urządzenia te w dużej mierze mogą działać na zasadzie tensometrii oporowej. Pojazd najeżdżając na poziomą belkę umiejscowioną w jezdni zwiększa opór zainstalowanego obwodu i na tej podstawie system dostaje informację o tym, że przez urządzenie przejechała oś. Waga preselekcyjna została pokazana na grafice poniżej.



Rys. 9. Przykładowa waga preselekcyjna

Źródło: <http://cat-traffic.pl/2018/01/09/plyta-wazaca-daw100-waga-preselekcyjna/>- 28.06.2018r.

Urządzenie jakim jest preselekcyjna waga można by wykorzystać w zarządzaniu i sterowaniu sygnalizacją świetlną na skrzyżowaniach lecz

wystarczyła by do tego zdecydowanie prostsza i o wiele tańsza instalacja. Ten sam czujnik, który w przypadku wag preselekcyjnych musiałby rejestrować szereg parametrów na skrzyżowaniu wystarczy aby odczytywał tylko jeden parametr- obecność pojazdu lub nie. Czas i sposób montażu takiego urządzenia jest podobny do pętli indukcyjnych. Koszt montażu prostego rozwiązania również nie powinien znacząco przewyższać cen montażu pętli indukcyjnych. Urządzenie to ma niewątpliwie wielkie zalety- jest zdecydowanie bardziej niezawodne niż pętla indukcyjna oraz jest zdecydowanie mniejsze od pętli indukcyjnych. Zmiany geometryczne powierzchni asfaltu nie wpływają na działanie tego typu czujnika. Urządzenie takie ma niewielkie wymiary- z jednej strony ma niewielką szerokość i można montować je w zasadzie w każdym miejscu skrzyżowania z każdą infrastrukturą drogową a z drugiej strony może mieć dowolną długość co pozwoli na montaż na całej długości skrzyżowania. Spowoduje to, iż żaden pojazd nie będzie miał możliwości przejazdu przez skrzyżowanie nie najeżdżając na czujnik- obecnie często kierowcy „nie najeżdżają” na pętla indukcyjne prawidłowo. Czujniki takie z powodzeniem można by montować zarówno przed jak i tuż za skrzyżowaniem przez co system mógłby otrzymywać informację natychmiast jak ostatni pojazd znajdzie się tuż u wyloty skrzyżowania. Pozwoli to dzięki nawet obecnie stosowanym systemom ruchu przekazać sygnał z czujnika w praktycznie rzeczywistym czasie. Tym samym można zlikwidować jeden z głównych, obecnych problemów pętli indukcyjnych- załączanie lecz brak wyłączania nadawania sygnału zielonego po opuszczeniu skrzyżowania.

Jeżeli czujniki takie montowane byłyby tuż za skrzyżowaniem to system w czasie rzeczywistym mógłby otrzymywać informację czy zarówno może wyłączyć już fazę zielonego światła oraz czy dla następnej kolizyjnej fazy może wcześniej załączyć zielone światło. Zlikwidowano by tym samym sposobem fazy czasowe, w których na skrzyżowaniu nie ma żadnego pojazdu. Gdyby takie czujniki były zainstalowane choćby na badanym wcześniej skrzyżowaniu Al. Włókniarzy z ulicami Wielkopolską i Lutomiarską podczas jednego cyklu ruchu na skrzyżowaniu można w czasie szczytu komunikacyjnego zaoszczędzić nawet pół minuty a w czasie pozaszczytowym można by większość samochodów przepuszczać w czasie rzeczywistym przez skrzyżowanie. Obniżyłoby to zdecydowanie koszty eksploatacji pojazdów, wydzielanie substancji szkodliwych do atmosfery i zdecydowaną redukcję hałasu- zarówno w godzinach szczytu komunikacyjnego jak i w pozostałych godzinach.

13. Podsumowanie oraz wnioski

Obecnie w warunkach normalnych oraz w czasie szczytu komunikacyjnego na dużej liczbie skrzyżowań czy to w całej Polsce czy tylko w samej Łodzi spotkać można się z sytuacją kiedy kierowcy na skrzyżowaniach „przepuszczają powietrze”. Chodzi o to, że w bardzo wielu przypadkach czas zielonego światła na danym pasie świeci się do czasu do kiedy zaprogramowany wcześniej cykl

nie minie lub do czasu aż na sąsiednim pasie zainstalowana pętla indukcyjna załączy zielone światło dla następnej fazy. Nawet jeżeli na tym pasie nie ma już samochodów to kierowcy z kolejnego cyklu nie mogą wjechać na skrzyżowanie. Na Łódzkich ulicach problem ten miał być rozwiązany głównie przez pętle indukcyjne, które powinny wyłączać sygnał zielony jeżeli na danym pasie nie znajduje się już żadne auto. W praktyce niestety nie działa to poprawnie a dane na ten temat przedstawione zostały w analizie przeprowadzonego badania. Należy zatem rozważyć alternatywne urządzenie, na przykład zaproponowany w opracowaniu czujnik tensometryczny, który nadawać będzie dwa komunikaty- 0 oraz 1. Może być on zastosowany na każdym typie skrzyżowań i nie ogranicza nas powierzchnia montażu. Pętle indukcyjne potrzebują zdecydowanie więcej metrów kwadratowych powierzchni i dlatego mogą być montowane w znacznej odległości od skrzyżowania. Zaproponowany powyżej czujnik w skrajnych przypadkach mógłby być montowany nawet pomiędzy przejściem dla pieszych a przejściem dla rowerzystów. W obecnych czasach, w dobie ciągle wzrostu liczby pojazdów na drogach należy zastanowić się jak lepiej zsynchronizować sygnalizację świetlną na skrzyżowaniach oraz jak efektywniej wykorzystać bardzo duże straty czasu zarówno dla światła zielonego jak i czerwonego na skrzyżowaniach. Rozwój tego obszaru zarządzania ruchem zawiera ogromny potencjał i przy zachowaniu odpowiednich norm bezpieczeństwa przepływ strumienia pojazdów przez skrzyżowania nawet w warunkach szczytu komunikacyjnego można zdecydowanie zwiększyć. Zmniejszy to zatory powstające na drogach ale także zminimalizuje zużycie się pojazdów podczas hamowania, zredukuje poziom hałasu oraz wydalenie szkodliwych substancji do atmosfery.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Komisja Wspólnot Europejskich, Plan Działania na Rzecz wdrażania
- [2] prezentacji Piotra Krukowskiego podczas konferencji „Informatyka w zarządzaniu drogami”, która odbyła się 14 kwietnia 2011 roku.
- [3] <http://gazetaolsztynska.pl/Korkuja-miasto--bo-nie-potrafia-wjechac-na-petle-indukcyjne,70458>
- [4] <http://gazetaolsztynska.pl/Korkuja-miasto--bo-nie-potrafia-wjechac-na-petle-indukcyjne,70458>
- [5] <http://przeglad-its.pl/2012/10/16/wybrane-zagadnienia-pomiarow-parametrow-ruchu-drogowego-za-pomoca-wiroprowadowych-indukcyjnych-czujnikow-petlowych/>
- [6] <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/lodz-priorytet-dla-tramwajow-wladze-miasta-to-nie-takie-proste-55165.html>
- [7] http://zm.org.pl/?a=petle_indukcyjne-13b
- (8) źródło: ITS- Inteligentne Systemy transportowe
- [9] Stencel M.; „Analiza własności metrologicznych systemu z pojedynczym czujnikiem indukcyjnym zastosowanego do pomiaru parametrów ruchu”, praca doktorska, Akademia górniczo-Hutnicza

- [10] Turowski J. „Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych”, WNT Warszawa 1982.
- [11] <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/warszawa-zdm-krytykuje-sekundniki-przy-sygnalizacji-55373.html>
- [12] <http://www.gazetakrakowska.pl/motofakty/a/przyciski-dla-piesznych-znikna-ze-skrzyzowan,12429756/>
- [13] dr. mgr inż. Ruchaj Marcin „Sterowanie acykliczna sygnalizacją świetlną w zatłoczonej sieci miejskiej”, Politechnika Opolska, Opole 2012