

**Tomasz Szczepański \***

## **WPLYW REGULACJI RUCHU POJAZDÓW ZA POMOCĄ SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ NA DROGACH MIEJSKICH NA EKOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI TRANSPORTU SAMOCHODOWEGO**

Obecnie bardzo dużą wagę przykładana się do minimalizacji emisji zanieczyszczeń z samochodów. Producentów pojazdów obowiązują coraz bardziej rygorystyczne normy ekologiczne, tworzone są coraz nowsze testy homologacyjne oraz diagnostyczne do sprawdzania składu spalin w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistego ruchu drogowego. [7, 8]

Chociaż bardzo dużo uwagi poświęca się na ocenę ekologicznych właściwości silników spalinowych oraz całych pojazdów – warto zauważyć, że emisja zanieczyszczeń nie powinna być właściwością jedynie samochodu. Ilość zanieczyszczeń znajdujących się w spalinach, zależy od pracy silnika, a to z kolei zależy od warunków, w jakich silnik pracuje. Na warunki pracy silnika wpływają cechy samego samochodu (takie jak jego masa, opory jazdy, parametry silnika), właściwości paliwa (na przykład stopień jego zanieczyszczenia), parametry atmosferyczne (między innymi temperatura, wilgotność, ciśnienie) oraz właściwości drogi (pochylenie drogi, cechy nawierzchni, a także inne czynniki warunkujące jazdę samochodu). Dlatego właśnie tytuł niniejszego artykułu odnosi się do właściwości ekologicznych transportu – jako całości. [1, 2]

Powyższy wstęp prowadzi to do wniosku dość trywialnego, aczkolwiek często pomijanego, że emisja zanieczyszczeń z silników samochodowych w dużym stopniu zależy od przygotowania drogi.

### **Jakie właściwości drogi mają wpływ na ekologię transportu?**

Zazwyczaj skupia się uwagę na wpływie nawierzchni oraz pochylenia drogi na sposób pracy silnika napędzającego pojazd. Choć są to ważne

---

\* mgr inż. Tomasz Szczepański

Instytut Transportu Samochodowego – Zakład Procesów Diagnostyczno-Obsługowych  
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel.: (+48 22) 43 85 520

czynniki, koniecznie trzeba podkreślić, że istnieją również inne właściwości drogi, które mają olbrzymie znaczenie. [1, 2, 3, 4]

Z pewnością należy wśród nich wymienić prędkość osiąganą na danej drodze. Istotna jest nie tylko górna wartość przedziału dopuszczalnych prędkości, ale także minimalna prędkość, jaką w pewien sposób wymusza strumień jadących samochodów. Warto wspomnieć także o wszelkiego rodzaju zakłóceniach ruchu, które wymuszają określone zachowanie się pojazdów – jak skrzyżowania, przejścia dla pieszych, zmiany szerokości drogi i liczba pasów ruchu. Wszystkie te czynniki w sposób pośredni, ale bardzo znaczący wpływają na właściwości ekologiczne transportu samochodowego. [1, 2, 3, 4]

W ostatnich latach coraz częściej stosuje się regulację ruchu pojazdów za pomocą sygnalizacji świetlnej. Dotyczy to obecnie nie tylko skrzyżowań głównych dróg, na których inna regulacja spowodowałaby paraliż, ale także dróg o znacznie mniejszej przepustowości. Tego typu sygnalizacja świetlna ustawiana jest nieraz nawet na drobnych skrzyżowaniach oraz na rzadko uczęszczanych przejściach dla pieszych. Kwestie zmiany warunków bezpieczeństwa na drodze nie będą podejmowane w niniejszej pracy. Warto jednak przyjrzeć się bliżej samemu problemowi ekologii, na który w oczywisty sposób wpływają powyższe zabiegi. [10]

### **Wpływ sygnalizacji świetlnej na poruszanie się samochodu**

Jak wiadomo, sygnalizacja świetlna okresowo zatrzymuje ruch pojazdów. W odniesieniu do sposobu poruszania się samochodu – można wyróżnić dwa przypadki: wpływ sygnalizacji w przypadku dużego nasilenia ruchu i jej wpływ w przypadku niewielkiego nasilenia. [10] W dalszej części pracy rozpatrywany będzie wpływ sygnalizacji świetlnej w przypadku małego nasilenia ruchu.

Przy niewielkim nasileniu ruchu w pewnym uproszczeniu można założyć, że inne pojazdy wpływają w pomijalnie małym stopniu na poruszanie się samochodu, którego właściwości ekologiczne są rozpatrywane. Można więc sporządzić prosty model ruchu samochodu, który zostaje zatrzymany przez sygnalizację świetlną oraz model samochodu, który przejeżdża bez zatrzymania. Porównując te dwa modele, można zobaczyć, jaki wpływ na wybrane właściwości ekologiczne ma sygnalizacja świetlna.

Poniżej przedstawiono procedurę obliczeniową. Należy zaznaczyć, że ma ona charakter przybliżony, mający uzasadnienie jedynie w dużej grupie

statystycznej, a nie można jej odnosić do pojedynczego pojazdu w celu wyznaczenia jego właściwości ekologicznych.

### Procedura obliczeniowa

Proces ruchu samochodu został podzielony na trzy etapy: zatrzymywanie pojazdu przed światłami, postój pojazdu oraz przyspieszenie samochodu do prędkości początkowej.

### Zatrzymanie samochodu [2]

Za początkową prędkość jazdy ( $V$ ) przyjęto 50 km/h (14 m/s), jako że jest to maksymalna prędkość dopuszczalna na większości dróg miejskich. Założono, że samochód będzie poruszał się ruchem jednostajnie opóźnionym z opóźnieniem ( $a$ ) równym 2 m/s<sup>2</sup>. Można wówczas wyznaczyć drogę ( $s$ ) i czas ( $t$ ) hamowania, odpowiednio ze wzorów:

$$s = \frac{V^2}{2 \cdot a}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} \quad (1), (2)$$

Obliczono, że droga hamowania wynosi 48 m i samochód pokonuje ją w ciągu 7 s. Zużycie paliwa w czasie hamowania silnikiem może być równe 0 dm<sup>3</sup>/100 km. Jednak nie cały proces hamowania odbywa się w ten sposób. Do obliczeń przyjęto, że połowę z 7 sekund samochód będzie poruszał się przy rozłączonym napędzie, a więc silnik będzie pracował na biegu jałowym. W tym czasie zużycie paliwa ( $p$ ) będzie takie, jak na postoju i wyniesie 2 dm<sup>3</sup>/h (0,00056 dm<sup>3</sup>/s). Objętość zużytego paliwa ( $v$ ) można obliczyć ze wzoru (3):

$$v = p \cdot t \quad (3)$$

gdzie:  $t = 3,5$  s. W ten sposób wyznaczono  $v=0,0019$  dm<sup>3</sup>.

### Postój samochodu

W czasie postoju samochód również zużywa paliwo, a jego objętość można wyznaczyć ze wzoru (3). Należy jednak wyznaczyć czas postoju. Dla często spotykanego podziału faz sygnalizacji świetlnej na małych skrzyżowaniach czas trwania światła czerwonego wynosi 30 s. Ze statystycznego punktu

widzenia jednak samochód będzie stał średnio połowę tego czasu, a więc 15 s. Objętość zużytego paliwa wynosi wówczas 0,0083 dm<sup>3</sup>.

### Przyspieszanie samochodu [3]

W tej sytuacji zużycie paliwa będzie wynikało z dwóch zjawisk: pokonywania sił oporów ruchu oraz z pokonywania sił bezwładności. Obliczono pracę mechaniczną, jaka musiała zostać wykonana przez silnik pojazdu.

Praca spożytkowana na pokonanie sił bezwładności jest równa energii kinetycznej (E) samochodu, jaką ostatecznie osiągnie i wynosi ona:

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2 \cdot \eta} \quad (4)$$

gdzie:  $m$  – masa samochodu (1200 kg),  $V$  – prędkość końcowa samochodu (14 m/s),  
 $\eta$  – sprawność układu przeniesienia napędu (0,91). Energia ta wynosi 127188 J.

Opory ruchu samochodu są oporami powietrza ( $F_p$ ) oraz toczenia ( $F_t$ ), które obliczono ze wzorów:

$$F_t = f_0 \cdot (1 + f_1 \cdot V^2) \cdot m \cdot g \quad (5)$$

$$F_p = 0,47 \cdot c_x \cdot A \cdot V^2 \quad (6)$$

gdzie:  $f_0$  – podstawowy współczynnik oporów toczenia (0,012),  
 $f_1$  – dodatkowy współczynnik oporów toczenia (0,00005),  
 $V$  – prędkość samochodu (w km/h),  $m$  – masa samochodu (1200 kg),  
 $g$  – przyspieszenie grawitacyjne (9,81 m/s<sup>2</sup>),  $c_x$  – współczynnik oporów powietrza (0,4),  $A$  – powierzchnia czołowa samochodu (1,9 m<sup>2</sup>).

Praca wynikająca z pokonywania tych sił jest w ogólności całką z sumy sił oporów ruchu liczoną po drodze przebywanej przez samochód, gdzie droga jest funkcją jego prędkości zgodnie ze wzorem (1). Ponieważ jednak siły oporów wynikają głównie z oporów toczenia i w przedziale prędkości: 0-50 km/h są niemal stałe, zużyta energia (E) została obliczona dla stałej siły

oporów ruchu, równej 2/3 ich wartości maksymalnej. Wykorzystano do tego wzór (7):

$$E = \frac{2}{3} \cdot (F_p + F_t) \cdot s \cdot \frac{1}{\eta} \quad (7)$$

gdzie:  $s$  – droga przebyta w procesie przyspieszania (obliczona ze wzoru (1) i równa 48 m),  
 $\eta$  – sprawność układu przeniesienia napędu (0,91).

Ostatecznie energia ta wynosi 8770 J, a więc jest znacznie mniejsza od energii wynikającej z pokonywania sił bezwładności.

Suma energii mechanicznej zużytej w wyniku zwiększania prędkości wynosi zatem 135957 J. Można ją przeliczyć na objętość paliwa ( $v$ ), znając wartość opałową paliwa ( $w$ ) oraz sprawność całkowitą silnika ( $\mu$ ). Dla benzyny wartość opałowa wynosi 21 MJ/dm<sup>3</sup>. [5] Sprawność silnika jest natomiast kwestią dość problematyczną, ponieważ zazwyczaj podaje się jej wartość maksymalną, która występuje tylko w przypadku jednego, idealnego stanu pracy silnika. W pozostałych stanach pracy sprawność jest natomiast znacznie niższa. [6] W prezentowanych obliczeniach przyjęto tę wartość na poziomie 0,15.

$$v = \frac{E}{w \cdot \mu} \quad (8)$$

Wykorzystując wzór (8) obliczono więc objętość paliwa zużytą w wyniku przyspieszania, równą 0,0432 dm<sup>3</sup>.

### Jazda samochodu ze stałą prędkością [2, 3]

Powyższe zużycie paliwa należy porównać z objętością paliwa spożytkowaną podczas przejazdu samochodu tej samej drogi ze stałą prędkością (reprezentującej przypadek braku sygnalizacji świetlnej).

W tym celu wyznaczono energię ( $E$ ) potrzebną do pokonania sił oporów ruchu, korzystając ze wzoru:

$$E = (F_p + F_t) \cdot s \cdot \frac{1}{\eta} \quad (9)$$

gdzie:  $F_p$  i  $F_t$  zostały wyznaczone ze wzorów (5) i (6), dla prędkości  $V=50$  km/h, a droga ( $s$ ) jest sumą drogi hamowania i przyspieszania (równą  $48+48=96$  m), ponieważ rozpatrywany jest przypadek przejazdu samochodu na tym samym odcinku drogi, ale w innych warunkach. Energia ta wynosi 26309 J.

Po przeliczeniu jej na objętość zużytego paliwa, zgodnie ze wzorem (8) otrzymano wartość  $v=0,0084$  dm<sup>3</sup>.

### Różnica zużycia paliwa ( $\Delta v$ )

Mając obliczone objętości paliwa zużyte w poszczególnych przypadkach, można obliczyć, o ile więcej paliwa zużył samochód w przypadku przejazdu przez światła (z zatrzymaniem) w porównaniu z przejazdem bez zatrzymania. Wykorzystano do tego wzór (10):

$$\Delta v = (v_1 + v_2 + v_3) - v_0 \quad (11)$$

gdzie:  $v_1$  – paliwo zużyte podczas hamowania,  $v_2$  – paliwo zużyte podczas postoju,  $v_3$  – paliwo zużyte podczas przyspieszania,  $v_0$  – paliwo zużyte podczas przejazdu ze stałą prędkością. Wyznaczona w ten sposób różnica zużycia paliwa wynosi 0,0451 dm<sup>3</sup>.

Oznacza to, że każde zatrzymanie samochodu na światłach powoduje średnio stratę paliwa we wspomnianej ilości. Jak zostało zaznaczone, są to obliczenia przybliżone i nie można ich odnosić ściśle do jednego samochodu. Można natomiast na ich podstawie pokusić się o oszacowanie, jakie skutki ekologiczne będą się z tym wiązały w skali wielu przejazdów – odnoszonych do doby lub do roku. W tym celu zostaną założone warunki panujące na drodze.

### Warunki na drodze i ich wpływ na zużycie paliwa [10]

Do celów obliczeń zostanie przyjęte bardzo małe natężenie ruchu na drodze, które wynosi 5 samochodów w ciągu minuty w każdym kierunku. Oznacza to, że w obydwu kierunkach co minutę przejedzie tamtędy średnio 10 pojazdów. Założono ponadto, że ruch odbywa się jedynie przez 16 godzin w ciągu doby, a przez 8 godzin nocnych jest znikomo mały. Oznacza to, że każdego dnia przejedzie rozpatrywaną drogą 9600 samochodów.

Założono następnie, że na tej drodze zostanie zamontowana sygnalizacja świetlna w  $n$  miejscach. Liczba  $n$  wynosi w prezentowanych rozważaniach 9, wzorując się na jednej z ulic w stolicy o niewielkiej przepustowości, stanowiącej jednak ważny przejazd dla kierowców chcących wydostać się z miasta w danym kierunku (ul. Jana Kasprówicza). Jeżeli na ulicy znajduje się 9 świateł, prawdopodobieństwo zatrzymania przez każde światła wynosi 0,5 (światła nie są zsynchronizowane) i dziennie przez całą długość tej ulicy przejeżdża 9500 – wówczas można obliczyć, że każdego dnia ma tam miejsce średnio 43200 zatrzymań samochodów na światłach. W skali roku daje to liczbę 15768000 zatrzymań.

Jeżeli znamy średnią stratę paliwa przypadającą na jedno zatrzymanie, możemy obliczyć, że każdej doby w wyniku funkcjonowania świateł zużywa się dodatkowo niemal  $2 \text{ m}^3$  paliwa. W skali roku jest to niemal  $711 \text{ m}^3$  paliwa.

### Skutki ekologiczne [9]

Przy oszacowaniu skutków ekologicznych przyjęto nieco na wyrost, że wszystkie rozważane samochody spełniają normę Euro V. W praktyce, jak wiadomo, badania homologacyjne prowadzone są na nowych pojazdach, których właściwości użytkowe (w tym ekologiczne) zmieniają się w miarę eksploatacji. Jednak z braku bardziej szczegółowych informacji odnośnie do emisji zanieczyszczeń z samochodów przyjęto, że rozważane pojazdy emitują średnio: 1 gram tlenku węgla, 0,1 grama węglowodorów oraz 0,06 grama tlenków azotu na każdy przejechany kilometr. Jeśli taki modelowy samochód zużywa  $10 \text{ dm}^3$  paliwa na 100 km, łatwo obliczyć, że na każdy zużyty  $\text{dm}^3$  paliwa przypada 16,7 gramów tlenku węgla, 1,7 grama węglowodorów oraz 1 gram tlenków azotu.

Powyższe informacje łatwo przeliczyć na objętość paliwa zużywaną dodatkowo w wyniku istnienia sygnalizacji świetlnej. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1**

	<b>kg na dobę</b>	<b>kg na rok</b>
<b>tlenek węgla</b>	32,5	11845
<b>węglowodory</b>	3,2	1184
<b>tlenki azotu</b>	1,9	711

Jak widać, są to bardzo duże ilości substancji toksycznych. Wartości są podane w kilogramach, choć w skali roku mogą być one mierzone w tonach.

### Skutki ekonomiczne

Warto choć przez chwilę wspomnieć także o skutkach ekonomicznych. Dodatkowo zużyte paliwo w ciągu roku, według ceny benzyny równej 5,60 zł kosztuje niemal 4 miliony zł. Gdyby w skali kilkunastu lat tę samą kwotę przeznaczyć na modyfikację drogi, aby ruch pojazdów i pieszych nie odbywał się w sposób kolizyjny – można by w przyszłości zaoszczędzić duże kwoty pieniędzy.

### **Podsumowanie**

Z pewnością przedstawione rozważania nie wyczerpują tematu wpływu sygnalizacji świetlnej na drogach miejskich na właściwości ekologiczne transportu samochodowego. Przedstawione obliczenia mają charakter bardzo ogólny, jedynie szacunkowy. Dają jednak pewne wyobrażenie o skali problemu.

W powyższych rozważaniach nie przedstawiono również zagadnienia wpływu sygnalizacji świetlnej w przypadku dużego nasilenia ruchu. Tworzące się wówczas zatory na drodze znacznie komplikują omawiane zjawiska, sprawiając, że wpływ rozwiązań drogowych wykorzystujących ruch kolizyjny, regulowany sygnalizacją świetlną, może być nawet kilkukrotnie większy.

### **LITERATURA**

- [1] Arczyński Stanisław: Mechanika ruchu samochodu WNT, Warszawa 1993,
- [2] Mitschke Manfred: Teoria Samochodu. Dynamika samochodu. Napęd i hamowanie, Tom 1, WKŁ, Warszawa 1987,
- [3] Jaśkiewicz Zbigniew: Projektowanie układów napędowych pojazdów samochodowych, WKŁ, Warszawa 1982,
- [4] Lanzendoerfer J., Szczepaniak C.: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980,
- [5] Zdzisław Chłopek: Paliwa alternatywne do silników spalinowych a emisja dwutlenku węgla kopalnego, Instytut Transportu Samochodowego,

- [6] Stefan Postrzednik, Grzegorz Przybyła, Zbigniew Żmudka: Wpływ obciążenia silnika spalinowego na efektywność konwersji energii w układzie, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008,
- [7] Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego, *Mechanics and Mechanical Engineering* 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. 43–68,
- [8] Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza statystyczna nateżeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne, *Archiwum Motoryzacji*, Wydawnictwo Naukowe PTNM, 2005,
- [9] Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów,
- [10] Dziennik Ustaw Nr 220, Pozycja 2181.

