

Model makroskopowy zapotrzebowania na energię do pokonania oporów wzniesienia w ruchu pojazdu

BARTŁOMIEJ OHDE¹, GRZEGORZ ŚLASKI²,

Politechnika Poznańska

Streszczenie

Artykuł omawia problematykę modelowania zapotrzebowania na energię potrzebną do pokonania oporów wzniesienia w ruchu pojazdów w ujęciu makroskopowym. Omówiono w nim sposoby modelowania tego zapotrzebowania z wykorzystaniem modeli układu napędowego typu *forward* i *backward facing* w modelowaniu mikroskopowym. Zdefiniowano problem ograniczonej danych dla modeli makroskopowych w postaci bardzo rzadkiej informacji o zmianie wysokości drogi ograniczonej tylko do węzłów pomiędzy odcinkami o długościach od kilkudziesięciu do kilkuset metrów. Zaproponowano wykorzystanie zmian energii potencjalnej jako podstawowego przybliżenia zapotrzebowania na energię mechaniczną do pokonania oporów wzniesienia oraz oszacowano wpływ uwzględnienia uśrednionej sprawności silnika wraz z falownikiem na zapotrzebowanie energii elektrycznej dla pokonania oporów wzniesienia. Zaproponowano udokładnienie opisu odcinka ograniczonego do podania wysokości początku i końca o dodanie informacji o hipotetycznym przewyższeniu. Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji dla przykładowego przejazdu wykazano istotną poprawę oszacowania zużycia energii na podstawie tego trójparametrowego opisu zmian wysokości na odcinku przejazdu.

Słowa kluczowe: makroskopowe modele ruchu, makroskopowe modelowanie zużycia energii, opory wzniesienia

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Bartłomiej.Ohde@put.poznan.pl, tel. 616652 2709

² Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Grzegorz.Ślaski@put.poznan.pl, tel. 616652 2222

1 Wstęp

Wartość energii zużywanej przez pojazd na przejechanie danego odcinka drogi zależy od zapotrzebowania na energię mechaniczną na kołach pojazdu oraz sprawności układu napędowego. O zapotrzebowaniu na energię mechaniczną decyduje zmienne w czasie zapotrzebowanie na moc niezbędną do pokonania sił oporów ruchu i czas w jakim to zapotrzebowanie występuje. Przy stałym poziomie tego zapotrzebowania jest to iloczyn wartości zapotrzebowanej mocy i czasu dla którego określamy zapotrzebowanie na energię. Wartości sił oporów ruchu można oszacować na podstawie relatywnie prostych zależności przedstawianych w wielu podręcznikach dotyczących mechaniki ruchu samochodów i ich dynamiki wzdłużnej [5,7,13,14,19]. Jest to jednak zadanie proste tylko przy założeniu stałości warunków ruchu pojazdu. W rzeczywistości parametry występujące w tych zależnościach ulegają ciągłym zmianom i ich określenie staje się właściwym problemem. Najbardziej zmieniającymi się wielkościami są prędkość pojazdu, nachylenie drogi, prędkość powietrza i jego kierunek. Zmianom ulegać może także masa pojazdu lub np. parametry opisujące wpływ na opory powietrza a także sposób sterowania parametrami układu napędowego – np. zmiana przełożenia.

Dlatego w celu oszacowania rzeczywistego zapotrzebowania na energię znać trzeba zmienność:

- prędkości opisaną profilem prędkości, która wpływ przede wszystkim na wartość oporów powietrza, ale intensywność jej zmian na opory bezwładności,
- nachylenia drogi, definiującego siłę oporów wzniesienia.

Taka sama zmienność profili prędkości i nachylenia drogi dla dwóch takich samych samochodów powinna dać to samo zużycie energii. Gdy sprawność przetwarzania energii przez układ napędowy jest różna to uzyskiwany wynik może być różny, za każdym razem jednak ilość energii wykorzystywanej do zasilenia układu napędowego jest większa niż ta wynikająca z zapotrzebowania na energię mechaniczną niezbędną do pokonania oporów ruchu. Zapotrzebowanie na energię mechaniczną jest podstawowym czynnikiem decydującym o zużyciu energii zasilającej układ napędowy pojazdu i wyznacza minimalny poziom jej zużycia.

Rzeczywiste profile jezdne realizowane przez pojazdy mają charakter losowy co wynika z losowości czynników wpływających na uzyskiwaną przez pojazd prędkość. Można je odnaleźć w losowym charakterze ograniczeń zewnętrznych (np. prędkość pojazdu poprzedzającego, zdarzenia w ruchu drogowym, sygnalizacja świetlna) jak i wewnętrznych (sposób doboru i sterowania prędkością, właściwości dynamiczne samochodu). Można jednak wśród dużej liczby możliwych profili jezdnych odnaleźć grupy profili o zbliżonych pewnych cechach – np. średniej prędkości, energochłonności, długości, zakresie uzyskiwanych przyspieszeń, itp. Na podstawie takiego podobieństwa daje się zaproponować profile jezdne będące reprezentantami dla określonych warunków/miejsc użytkowania samochodu. To podejście jest wykorzystywane do oceny zużycia paliwa/energii przez pojazdy, które bada się podczas realizacji wybranych cykli jezdnych w warunkach laboratoryjnych [2].

2 Modelowanie zapotrzebowania na energię

Możliwe jest również symulacyjne badanie zużycia energii przy wykorzystaniu modeli układu napędowego oraz modeli sił oporów ruchu. Dla modelowania sił oporów ruchu istotne jest definiowanie zarówno profilu prędkości jak i profilu wzdłużnego nachylenia drogi – stosuje się różne rozdzielczości informacji o profilu prędkości (np. 0,1 lub 1 s) czy też profilu nachylenia

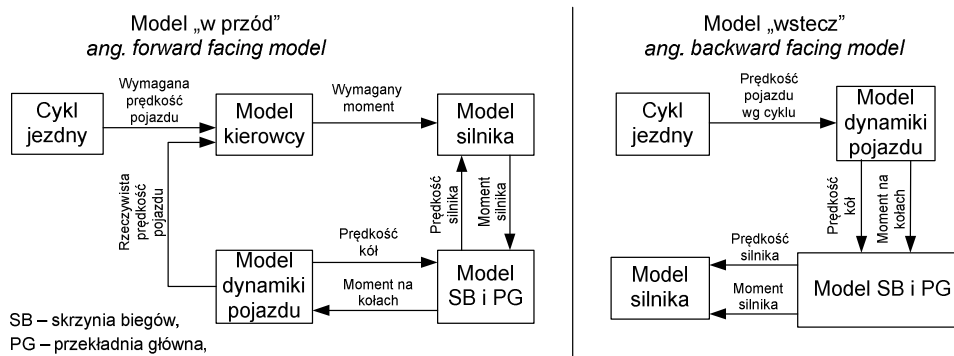
drogi (np. co 1, 10, 50, 100 m lub co odległość wynikającą z rejestracji co 1 s aktualnej wysokości przy określonej prędkości).

Dla modeli układu napędowego istotna jest struktura tego układu jak i charakterystyki poszczególnych podzespołów a czasami także algorytmy sterujące poszczególnymi podzespołami lub całym układem napędowym. Są to dane specyficzne dla danego rodzaju napędu, jego struktury, systemów sterujących lub nawet sterowania manualnego realizowanego przez kierowcę. Dlatego w tym przypadku trudniej o modele o charakterze uniwersalnym – można je budować na pewnym stopniu uogólnienia, np. dotyczącym struktury, ale często specyficzne rozwiązania wymagają znajomości szczegółowych parametrów danego rozwiązania technicznego (przełożeń, wartości strat wewnętrznych, charakterystyk silników spalinowych czy też elektrycznych, algorytmów sterujących). Często ze względu na złożoność techniczną stosowanych rozwiązań część z tych parametrów bądź charakterystyk wyznaczana musi być metodami eksperymentalnymi.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na energochłonność eksploatacji (nie tylko ruchu) jest zużycie energii związane z pracą wyposażenia pojazdu nie związanego bezpośrednio z ruchem pojazdu, ale wykorzystywanego podczas ruchu i krótkotrwałego postoju pojazdu. Najważniejszymi z nich są dodatkowe odbiorniki energii elektrycznej lub mechanicznej – układy wspomagania, klimatyzacji, oświetlenia. W przypadku pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi istotna jest praca na biegu jałowym a w przypadku pojazdów elektrycznych istotnym odbiornikiem jest ogrzewanie, które w pojazdach spalinowych realizowane jest z wykorzystaniem rozpraszanej do otoczenia energii cieplnej a w elektrycznych energię tę trzeba pozyskać często także z akumulatora trakcyjnego [1].

W literaturze i istniejącym oprogramowaniu spotkać można dwie metody symulacyjnego obliczania zużycia energii [10, 11] – rys. 1:

1. w przód (ang. forward-facing) – w której, wejściem do modelu układu napędowego jest sygnał sterowania jego mocą i profil wzdłużny drogi a zużycie energii i osiągnięta dynamika zależy od parametrów układu napędowego i całego pojazdu; aby w tym sposobie modelowania uzyskać informację o zużyciu energii dla danego cyklu jezdny konieczne jest zamodelowanie kierowcy jako regulatora realizującego zadany profil prędkości,
2. wstecz (ang. backward-facing) – w której, wejściem do modelu jest profil wzdłużny drogi i zrealizowany cykl jezdny, którym muszą odpowiadać określone prędkości obrotowe i momenty obliczane kolejno poczynając od kół na wale korbowym silnika kończąc; w tym podejściu nie ma potrzeby modelowania kierowcy.



Rys. 1. Schematy modeli typu “forward” i “backward facing models” (na podstawie [11])

Oba podejścia są wykorzystywane w symulacjach, dla których stosuje się krok symulacji odpowiadający rozdzielczości z jaką zdefiniowano cykl jezdny – jest to najczęściej 1 sekunda, ale może być też np. 0,1 s. Symulacje tego typu realizowane są dla oceny zużycia energii przez pojedynczy pojazd, np. podczas projektowania układów sterowania zarządzaniem energią i punktem odniesienia dla uzyskiwanych wyników mogą być wyniki zużycia energii przez modelowany pojazd w teście realizowanym eksperymentalnie.

Innego podejścia do modelowania zużycia energii wymagają symulacje ruchu drogowego, które nie skupiają się na analizie pojedynczych pojazdów ale ruchu ich dużej liczby. W modelowaniu ruchu drogowego wykorzystuje się modele, które dzieli się na mikroskopowe, mezoskopowe i makroskopowe [9]. Modele mikroskopowe umożliwiają symulację na najwyższym poziomie szczegółowości – w odniesieniu do pojedynczego pojazdu, modele makroskopowe służą do modelowania ruchu w odniesieniu do fragmentów sieci drogowej.

Podobnym do poziomu szczegółowości ruchu muszą się charakteryzować modele zużycia energii. W pracach [3, 18] przedstawiono klasyfikację zarówno modeli ruchu drogowego jak i modeli zużycia paliwa oraz emisji szkodliwych składników spalin. Modele mikroskopowe zużycia paliwa to modele bazujące na parametrach profilu prędkości (speed – profile models) lub modele bazujące na stanie pracy silnika i szczegółowym profilu prędkości (modal emission model) – wykorzystywana jest wiedza o punkcie pracy silnika (wymagany moment i prędkość obrotowa silnika). W modelach makroskopowych ruchu krok symulacji wyznaczają np. odcinki wyznaczone punktami związanymi z możliwością realizacji pewnych zdarzeń, np. zmiany kierunku ruchu. Oznacza to, że pojedyncze analizowane odcinki to odległości pomiędzy kolejnymi skrzyżowaniami i fragmenty czasu odpowiadające czasowi przebywania na pojedynczym odcinku drogi. Dla takich odcinków wiedza o profilu prędkości ogranicza się do znajomości średniej prędkości a wiedza o profilu drogi do wiedzy o różnicy wysokości w dwóch kolejnych węzłach sieci drogowej. W pracy [18] wyróżniono wśród modeli makroskopowych następujące modele:

- modele obszarowe (ang. area-wide model),
- modele dla średnich prędkości (ang. average speed models),
- modele dla różnych typów ruchu (ang. traffic situation models),
- modele dla różnych zmiennych opisujących ruch (ang. traffic variable models).

3 Założenia i cele budowy modelu makroskopowego dla profilu wzdłużnego drogi

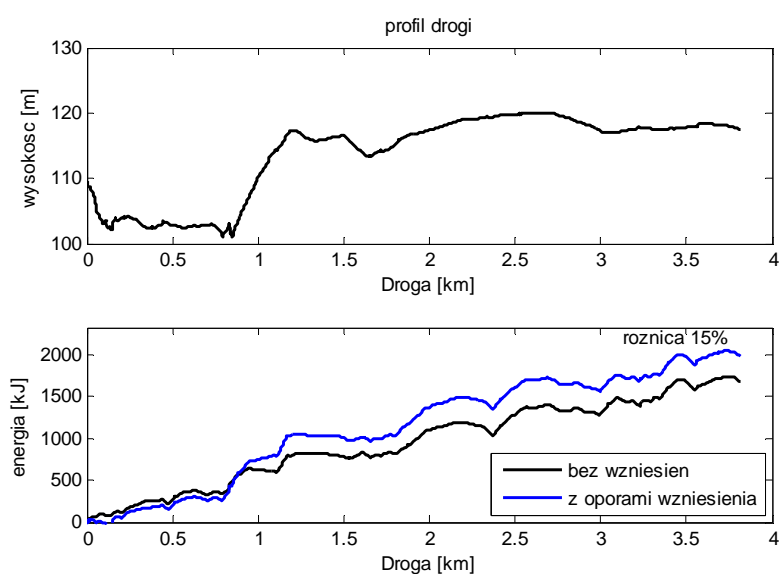
Autorzy we wcześniejszych swoich pracach opracowali model makroskopowy zużycia energii bazujący na średniej prędkości pojazdu. Wyraża on relację pomiędzy średnią prędkością a zużyciem energii. Model ten zbudowano w oparciu o wyniki badań profilu prędkości realizowanego w rzeczywistym ruchu miejskim i obliczenia odpowiadającego im zużycia energii w oparciu o model mikroskopowy bazujący na wykorzystaniu punktu pracy silnika elektrycznego do oceny jego sprawności i zapotrzebowania na energię elektryczną. Przykładowy podział na odcinki i uzyskiwane średnie prędkości podczas tworzenia modelu przedstawiono na rysunku 2.

Opracowany model makroskopowy nie uwzględniał zróżnicowania wysokości lub profilu wzdłużnego drogi. W prowadzonych badaniach symulacyjnych [12] stwierdzono jednak, że ze względu na przyjętą długość odcinków rzędu kilkudziesięciu do kilkuset metrów, możliwe jest powstawanie niedokładności w oszacowaniu zużycia energii nawet rzędu około 15% - rys. 3.

Błąd ten może przyjmować wartość dodatnią lub ujemną w zależności od kierunku przejazdu trasy, co wynika z raz dodatniego a raz ujemnego wzdłużnego nachylenia przejeżdżanej drogi.

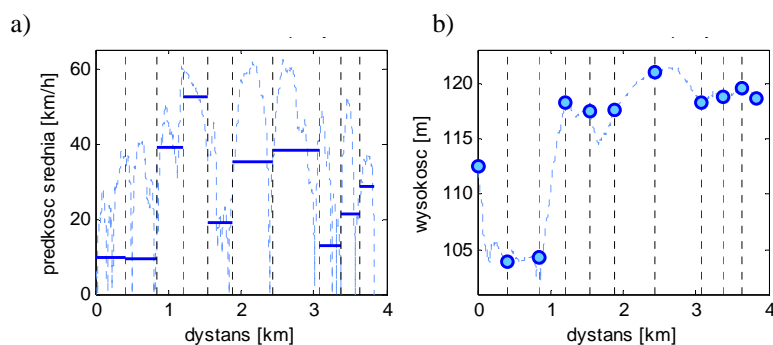


Rys. 2. Podział trasy na odcinki i zestawienie liczności odcinków wg ich długości podczas budowy modelu makroskopowego [16]



Rys. 3. Przykładowy profil wysokości drogi i różnica w zużyciu energii dla przejazdu z uwzględnieniem tego profilu i przejazdu bez uwzględnienia profilu wysokości

Charakter danych wejściowych do modelu makroskopowego na tle danych wykorzystywanych w modelu makroskopowym przedstawiono na rys. 4. Dane te to średnie prędkości jazdy na kolejnych odcinkach oraz wysokości w kolejnych węzłach.



Rys. 4. Dane wejściowe w modelu makroskopowym – średnie prędkości na odcinku i wysokości drogi w węzłach.

Średnie prędkości można w praktyce obliczyć na podstawie znajomości długości odcinka i czasu przebywania na nim. Na wykresie na rys. 4a oprócz wartości średnich policzonych po czasie przedstawiono także dane rejestrowane w sposób ciągły z rozdzielczością 1 s – profil prędkości w funkcji przejechanego dystansu. Na rys. 4 b przedstawiono z kolei informację o wysokościach drogi w węzłach, punktach wyznaczających końce i początki kolejnych odcinków, a na ich tle informację o zmienności wysokości drogi podaną rozdzielczością w metrach zależną od aktualnej prędkości i rozdzielczości wektora czasu równego 1 s.

Ograniczoność informacji dotyczących zarówno profilu prędkości i profilu nachylenia wzdłużnego drogi powoduje, że pojawia się pytanie w jaki sposób ta ograniczoność wpływa na możliwość oszacowania zużycia energii związanej z pokonaniem oporów ruchu. Opracowanie modelu dla oporów bezwładności, toczenia i powietrza przedstawiono we wcześniejszej publikacji autorów [16].

W niniejszej publikacji przedstawiono badania służące ocenie możliwości makroskopowego modelowania zapotrzebowanie energii mechanicznej koniecznej do pokonania oporów wzniesienia. Szczegółowe zagadnienia objęte badaniami to:

- analiza specyfiki zapotrzebowania energii na pokonanie oporów wzniesienia dla różnych profili zmian wysokości drogi,
- zależność pomiędzy wartościami końcowymi zapotrzebowania energii na pokonanie oporów wzniesienia dla całego odcinka drogi wynikającego z rozdzielczości modelu makroskopowego,
- sformułowanie modelu makroskopowego szacującego zapotrzebowania energii na pokonanie oporów wzniesienia na końcu odcinka, wynikającego z rozdzielczości modelu makroskopowego, na podstawie znajomości tylko wybranych parametrów odcinka a nie jego szczegółowego profilu,
- porównanie oszacowania zapotrzebowania energii na pokonanie oporów wzniesienia przez model makroskopowy z wynikiem z modelu mikroskopowego traktowanego jako źródło wartości wzorcowej dla modelu makroskopowego.

4 Analiza uwzględnienia oporów wzniesienia w modelach makroskopowych opisanych w literaturze

Problem analizowany w niniejszej pracy był już poruszany przez innych badaczy. Na podstawie analizy wybranych publikacji [4,6,17] można stwierdzić, że możliwe są następujące

podejścia do uwzględniania oporów wzniesienia w szacowaniu zapotrzebowania na energię do ich pokonania:

1. uwzględnianie informacji o średnim nachyleniu z rzadszą niż w modelach mikroskopowych rozdzielczością – np. co 100 m,
2. oszacowanie zapotrzebowania na energię do pokonania oporów wzniesienia na postawie zmian energii potencjalnej pomiędzy punktami skrajnymi odcinka,
3. uwzględnienie współczynnika przeliczeniowego obliczonego na podstawie wpływu nachylenia na wzrost oporów ruchu.

Podejście pierwsze zaprezentowano np. w publikacji [4]. Autor w zaprezentowanym przykładzie przejazdu 50 km odcinka autostrady uzyskał w szacowanym zapotrzebowaniu na energię bez uwzględnienia wzdłużnego nachylenia drogi prawie o 30% mniejsze oszacowanie niż przy uwzględnieniu wzniesień. W artykule zaproponował metodę uwzględnienia oporów wzniesienia polegającą na obliczeniu wartości mocy napędowej z uwzględnieniem oporów wzniesienia wynikających ze znanego nachylenia drogi na podstawie analizy profilu wysokości drogi opisującego wysokość w punktach oddalonych o 100 m. Nachylenie ujemne (zjazd w dół i wynikająca z tego rekuperacja energii) były ignorowane w celu zwiększenia zapasu bezpieczeństwa wyznaczenia potrzebnej energii przez model.

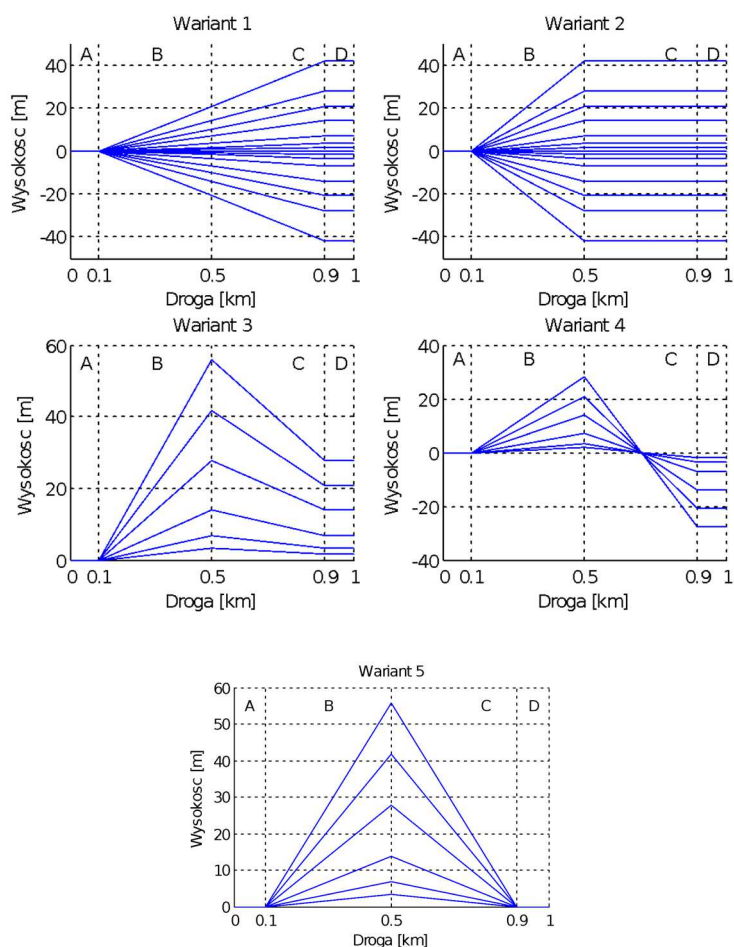
Podejście drugie – dla braku informacji o dokładnym profilu wysokości drogi opisano w pracy [17]. Do szacowania energii potrzebnej na pokonanie oporów wzniesienia wykorzystano wartość zmiany energii potencjalnej między punktami charakterystycznymi trasy przejazdu. W opisanym metodzie obliczono zapotrzebowanie na energię wynikające z różnych czynników (prędkość średnia, ilość zatrzymań, wykorzystanie wyposażenia pojazdu etc.), w tym również zmian energii potencjalnej pojazdu.

Trzecie, inne od wcześniej przedstawionych podejście zostało opisane w pracy [6] jako metoda szacowania emisji szkodliwych składników spalin emitowanych przez flotę pojazdów. Metoda ta opiera się na obliczeniu emisji pojazdu poruszającego się po płaskim terenie, następnie pomnożenia otrzymanej wartości przez odpowiedni współczynnik. Wartość tego współczynnika zależy od kategorii nachylenia drogi i średniej prędkości pojazdu co oznacza, że współczynnik ten uwzględnia oba czynniki jednocześnie.

5 Badania specyfiki zapotrzebowania na energię do pokonania oporów wzniesienia dla różnych konfiguracji zmienności nachylenia

Badania symulacyjne przeprowadzono dla oceny zmian zapotrzebowania na energię potrzebną do pokonania oporów wzniesienia analizując z wykorzystaniem modelu mikroskopowego jej zmiany w trakcie przejazdu 1 km odcinka testowego oraz dokonując oceny możliwości oszacowania tego zapotrzebowania z wykorzystaniem szacowania w oparciu o wykorzystanie różnicy energii potencjalnej. Przetestowano także wpływ różnych konfiguracji zmienności nachylenia na zmienność ilości energii elektrycznej wymaganej dla pracy silnika trakcyjnego. Zrealizowano to z wykorzystaniem informacji o sprawności silnika elektrycznego dla pracy silnikowej i prądnicowej. Nie analizowano wpływu dalszych elementów elektrycznego układu napędowego co oznacza, że wyniku nie należy traktować bezpośrednio jako zużycia energii elektrycznej przez samochód o napędzie elektrycznym.

Do badań zdefiniowano 5 wariantów odcinka testowego skonstruowanego z 4 fragmentów, dwóch zawsze poziomych odcinków A i D o długościach równych 10% całkowitej długości odcinka testowego i zmienianych co do nachylenia w kolejnych wariantach dwóch odcinków B i C o długościach 40% całkowitej długości odcinka testowego - rys. 5.



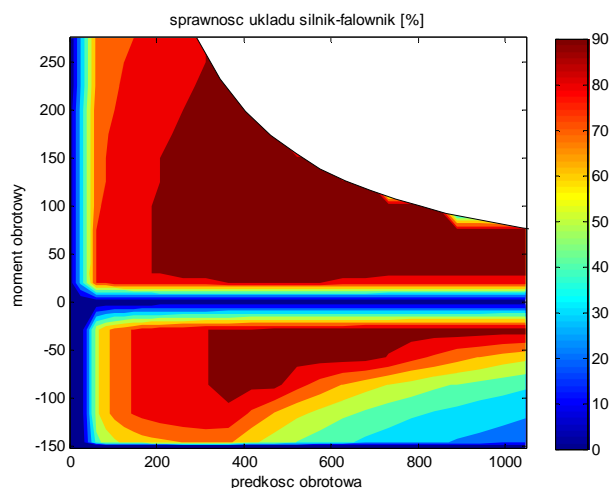
Rys. 2. Zastosowane profile wysokości drogi w eksperymencie badawczym dla wariantów 1-5

Kolejne warianty dla odcinków B i C dobrano tak, aby przeanalizować zarówno wpływ pojedynczej zmiany wysokości pomiędzy początkiem i końcem odcinka jak i wpływ nachylenia drogi nie wynikający bezpośrednio z różnicy wysokości między punktem początkowym i końcowym:

1. wariant 1 – zmiana wysokości odbywa się jednostajnie wzdłuż całej długości B i C,
2. wariant 2 – nachylenie drogi występuje tylko w części B odcinka badawczego, zmiana wysokości osiągnięta jest przy większym nachyleniu niż w wariacie 1, odcinek C jest poziomy,
3. wariant 3 – na odcinku B występuje podjazd, a na odcinku C zjazd o różnym nachyleniu, punkt końcowy jest powyżej początkowego,
4. wariant 4 – na odcinku występuje podjazd i zjazd o różnym nachyleniu, punkt końcowy jest poniżej początkowego,
5. wariant 5 – punkt początkowy i końcowy są na tej samej wysokości, nachylenia odcinka C są tej samej wartości ale przeciwnego znaku jak odcinka B.

Dla wariantów 1 – 4 wartości kątowne pochylenia odcinków dobrano tak, aby uzyskać odcinki o takim samym średnim nachyleniu, ale różnym profilu drogi. Średnie nachylenie jest rozumiane jako stosunek różnicy wysokości punktu początkowego i końcowego do odległości między tymi punktami wyrażony w procentach.

W eksperymencie badawczym symulowano zapotrzebowanie energii mechanicznej potrzebnej do pokonania oporów wzniesienia, dlatego w pierwszej kolejności wykonano symulacje z pominięciem pozostałych oporów. Aby uprościć interpretację wyników symulacji z uwzględnieniem pozostałych oporów ruchu zdecydowano się na przejazdy o stałej prędkości 40 i 60 km/h. W symulacji oszacowano także zapotrzebowanie na energię elektryczną silnika trakcyjnego z wykorzystaniem informacji o charakterystyce sprawności silnika trakcyjnego wraz z falownikiem samochodu Nissan Leaf (rys. 6) i przełożeniu w układzie napędowym [3,8,15].



Rys. 6. Sprawność układu silnik-falownik wykorzystana w modelu mikroskopowym

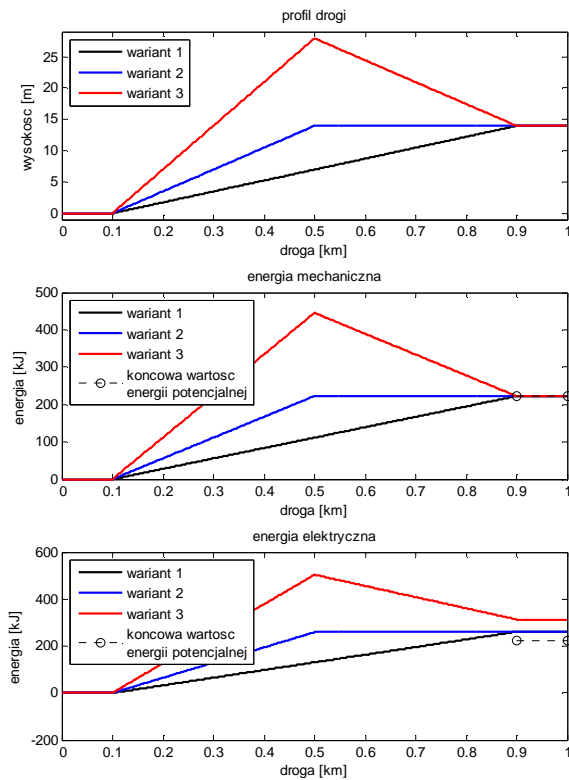
W **pierwszym eksperymencie** badawczym analizowano trzy przejazdy o takiej samej wartości średniego nachylenia drogi (różnicy wysokości między punktem początkowym i końcowym), wynoszącego 1,4%, ale różnych profilach wysokości drogi na odcinkach B i C:

- przejazd 1 – nachylenie odcinka B i C = 1° ,
- przejazd 2 – nachylenie odcinka B = 2° , C = 0,
- przejazd 3 – nachylenie odcinka B = 4° , C = -2° .

Na wykresie (rys. 7) przedstawiono porównanie wyników symulacji dla tego eksperymentu. Podobieństwo kształtu wykresów dla zmian wysokości oraz zmian zapotrzebowania energii mechanicznej do pokonania oporów wzniesienia wynika z powiązania zmiany energii potencjalnej pojazdu i zmiany wysokości na jakiej się on znajduje. Ponadto zmiana wartości tej energii zależy tylko od zmiany wysokości, a nie od drogi po której zmiana przebiega. Oznacza to, że energia mechaniczna potrzebna na pokonanie oporów wzniesienia jest równa zmianie energii potencjalnej pojazdu. Z tego powodu końcowa wartość energii mechanicznej potrzebnej na pokonanie oporów wzniesienia dla trzech przedstawionych wariantów jest taka sama.

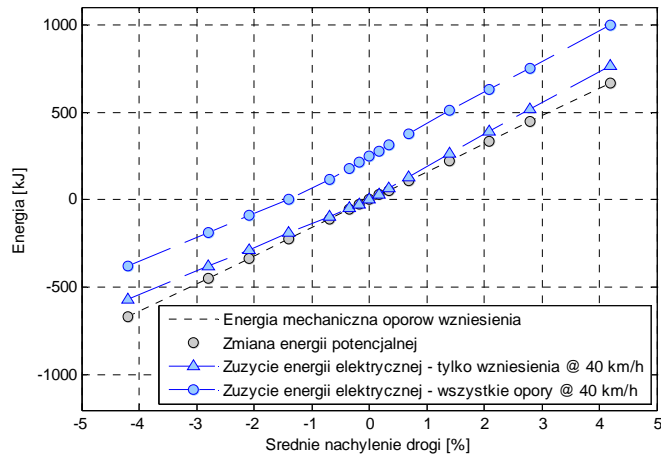
Dla wyników szacowania wartości zapotrzebowana na energię elektryczną silnika trakcyjnego w przypadkach, gdy nachylenie drogi ma taki sam znak na całej długości odcinka (np. tylko podjazd – wariant 1 i 2) to zachodzi podobna zależność jak w przypadku

zapotrzebowania energii mechanicznej, tj. zapotrzebowanie na energię wynika ze zmiany wysokości, a nie drogi po jakiej ta zmiana została wykonana. Wynika to ze zbliżonych wartości sprawności układu napędowego w szerokim zakresie obciążeń. Jeżeli natomiast na danym odcinku występuje zarówno podjazd, jak i zjazd należy uwzględnić sprawność konwersji energii w obu kierunkach: energii elektrycznej na mechaniczną, i energii mechanicznej na elektryczną (rekuperacja energii podczas jazdy w dół). Powoduje to ogólne zwiększenie zapotrzebowania energii lub zmniejszenie ilości odzyskanej energii. Dla podjazdu energia elektryczna pobrana z zasobnika energii (akumulatora) musi być większa niż energia mechaniczna dostarczona do kół, dla zjazdu energia dostarczona do akumulatora jest mniejsza niż odzyskana energia mechaniczna.



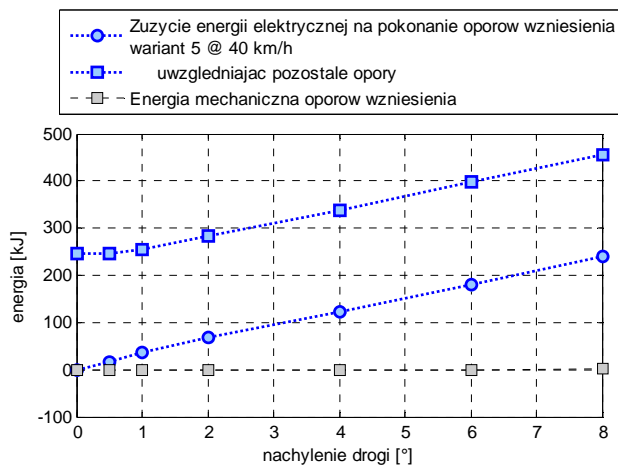
Rys. 3. Porównanie zapotrzebowania na energię mechaniczną (energia oporów ruchu) i wynikającego zapotrzebowania na energię elektryczną (dostarczona do falownika silnika trakcyjnego) tylko dla oporów wzniesienia z pominięciem pozostałych oporów ruchu

W eksperymencie drugim przeanalizowano wpływ uwzględnienia nachylenia wg wariantu I o różnej wartości (od -4,2 do 4,2 %) na zapotrzebowania na energię mechaniczną i elektryczną na poziomie silnika trakcyjnego i jego falownika przy stałej prędkości jazdy 40 km/h. Wyniki prezentuje rys. 8. Ilustruje on zależność energii elektrycznej w zależności od średniego nachylenia drogi dla wariantu I. Średnie zapotrzebowanie na energię mechaniczną i elektryczną po uwzględnieniu pozostałych oporów ruchu (toczenia i powietrza) ma podobny przebieg jak uwzględniając tylko opory wzniesienia, ale przesunięty w górę o energię potrzebną na pokonanie dodatkowych oporów ruchu.



Rys. 8. Zużycie energii elektrycznej na pokonanie odcinka testowego w zależności od średniego nachylenia drogi

Eksperyment trzeci przeprowadzono dla sytuacji, w której średnie nachylenie drogi wynosi 0 – punkt początkowy i końcowy odcinka znajdują się na takiej samej wysokości, czyli profil drogi odpowiada wariantowi 5. W tym przypadku zapotrzebowanie na energię mechaniczną dla pokonania oporów wzniesienia teoretycznie nie zależy od profilu drogi, sumaryczna energia oporów wzniesienia wynosi 0. Jednak wynik symulacji zapotrzebowania na energię elektryczną wskazuje na zależność tego zapotrzebowania od profilu wzdłużnego nachylenia drogi – rys. 9.



Rys. 9. Wpływ nachylenia drogi odcinka testowego o zerowym średnim nachyleniu na zapotrzebowanie na energię elektryczną

Zapotrzebowanie na energię elektryczną dla silnika trakcyjnego wraz z falownikiem dla analizowanego scenariusza eksperymentu zmienia się wraz ze zwiększaniem nachylenia drogi. Wynika to ze zróżnicowanych strat konwersji energii w obu kierunkach, opisanych we wcześniejszej części artykułu. Taki profil drogi wyraźnie pokazuje, że informacja tylko

o całkowitej zmianie wysokości (i w konsekwencji energii potencjalnej) na odcinku jest niewystarczająca aby dokładnie określić zużycie energii wynikające z oporów wzniesienia.

6 Model makroskopowy wpływu wzniesień na energochłonność ruchu

W wyniku analizy opisaney w poprzedniej części artykułu, autorzy zaproponowali model wpływu wzniesień na energochłonność ruchu pojazdu elektrycznego przeznaczony do wykorzystania w symulacjach makroskopowych. Model ten opiera się na założeniu, że energia E_i potrzebna na pokonanie odcinka między dwoma punktami jest równa sumie energii E_{Vi} potrzebnej na pokonanie oporów ruchu wynikających z profilu prędkości (powietrza i bezwładności) oraz toczenia (model opisany w publikacji [11]) i energii E_{hi} potrzebnej na pokonanie oporów wzniesienia (wynikającej z profilu drogi):

$$E_i = E_{Vi} + E_{hi} \quad (1)$$

Proponowany model zapotrzebowania na energię mechaniczną potrzebną do pokonania oporów wzniesienia zakłada równoważność tej energii zmianie energii potencjalnej pojazdu wynikającej ze zmiany wysokości punktu początkowego h_i i końcowego h_{i+1} .

$$E_{hi} = mg(h_{i+1} - h_i) \quad (2)$$

W najprostszej wersji informację wejściową stanowi informacja o zmianie wysokości drogi pomiędzy końcowymi punktami pojedynczego odcinka wynikającego z rozdzielczości modelu makroskopowego. Jest to pewnym sensie profil drogi podany z niewielką rozdzielczością – informacja znana jest co kilkanaście do kilkuset metrów długości trasy.

W przypadku szacowania zapotrzebowania na energię elektryczną przez silnik trakcyjny wraz z falownikiem model musi być uzupełniony o uwzględnienie zróżnicowanej sprawności silnika wraz z falownikiem. W zależności od kierunku przepływu energii wykorzystywane są punkty pracy na charakterystyce sprawności o różnych jej wartościach. Znając wysokość położenia punktu początkowego h_i i końcowego h_{i+1} , masę pojazdu m oraz sprawność konwersji energii elektrycznej na mechaniczną $\eta_{E \rightarrow M}$ (silnik napędza pojazd) i mechanicznej na elektryczną $\eta_{M \rightarrow E}$ (silnik pracuje jako generator i hamuje ruch pojazdu), zużycie energii elektrycznej wynikające z nachylenia drogi na danym odcinku można obliczyć korzystając ze wzoru:

$$E_{hi} = \begin{cases} mg(h_{i+1} - h_i)\eta_{M \rightarrow E} & \text{jeżeli } h_{i+1} < h_i \\ mg(h_{i+1} - h_i)\frac{1}{\eta_{E \rightarrow M}} & \text{jeżeli } h_{i+1} > h_i \end{cases} \quad (3)$$

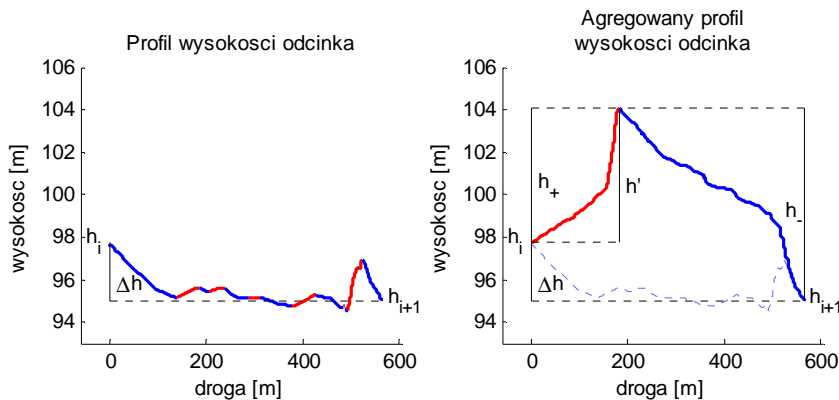
Ponieważ w obliczeniach rozpatrywany jest odcinek jako całość, przyjęte wartości sprawności mają charakter wartości uśrednionej dla całego odcinka. Należy zwrócić uwagę na to, że wynikiem obliczeń jest energia elektryczna. Dla obliczeń dla jazdy w górę ($h_{i+1} > h_i$) zastosowana jest odwrotność wartości sprawności $\eta_{E \rightarrow M}$, ponieważ jej wartości na charakterystyce są wyznaczone dla zamiany energii elektrycznej na mechaniczną.

W celu właściwego uśrednienia konieczna jest znajomość udziału nachylenia dodatniego i ujemnego na odcinku. Aby dokonać odpowiedniego uśrednienia autorzy proponują w obliczeniach wykorzystać sumaryczną wysokość podjazdów h_+ i sumaryczną wysokość zjazdów h_- na odcinku. Takie podejście polega na potraktowaniu odcinka jakby składał się

z części na której pojazd tylko podjeżdżał w górę i następnie po osiągnięciu punktu szczytowego tylko zjeżdżał w dół (rys. 10). Pozwala to uwzględnić wpływ sprawności na przepływ energii w obu kierunkach. Energię potrzebną na pokonanie oporów wzniesienia można wtedy obliczyć ze wzoru:

$$E_{hi} = mgh_+ \frac{1}{\eta_{EM}} + mgh_- \eta_{ME} \quad (4)$$

Aby ograniczyć ilość dodatkowych parametrów potrzebnych do opisu profilu drogi autorzy proponują dodanie pojedynczego parametru do informacji o wysokości położenia początku i końca każdego odcinka drogi – hipotetycznego przewyższenia drogi h' . Jest to parametr opisujący wysokość względem wyższego końca odcinka na jaką wjechał by pojazd gdyby z odcinka wyeliminować fragmenty na których pojazd porusza się w dół (rys. 10).



Rys. 10. Idea obliczania hipotetycznego przewyższenia drogi h'

Zaletą takiego rozwiązania jest ograniczenie dodatkowych parametrów opisujących odcinek drogi do pojedynczego parametru. Jednocześnie pozwalającego na obliczenie wysokości podjazdu i zjazdu na odcinku dla obu kierunków poruszania się po odcinku. Wymaga ono jednak większego nakładu pracy i większej ilości danych do przygotowania informacji wejściowych – zmniejszenie kosztów obliczeniowych występuje tylko w fazie obliczeń wartości zużycia energii.

Do obliczenia sumarycznego podjazdu i zjazdu na odcinku można posłużyć się równaniami:

$$\text{dla } \Delta h > 0 \begin{cases} h_+ = \Delta h + h' \\ h_- = h' \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{dla } \Delta h < 0 \begin{cases} h_+ = h' \\ h_- = \Delta h + h' \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{dla } \Delta h = 0 \begin{cases} h_+ = h' \\ h_- = h' \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

Δh – różnica wysokości między punktem początkowym i końcowym odcinka,

h' – przewyższenie odcinka,

h_+ – sumaryczna wysokość podjazdu na odcinku,

h_- – sumaryczna wysokość zjazdu na odcinku.

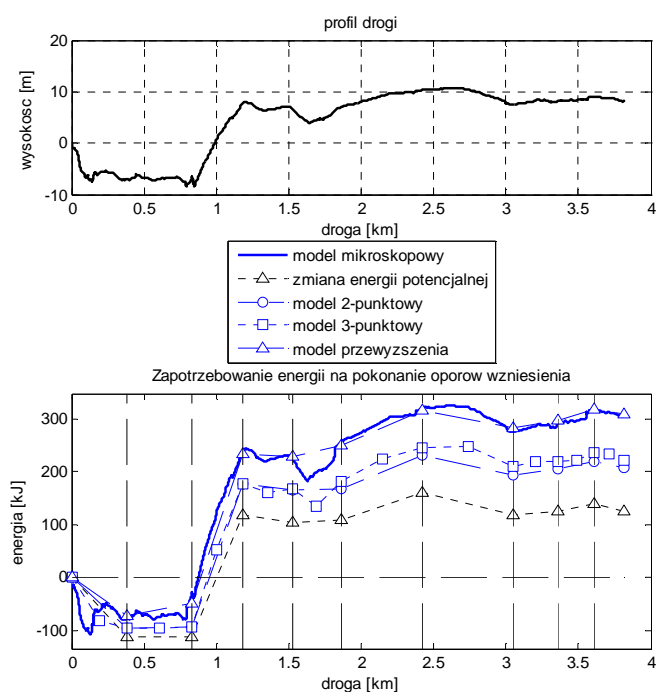
6.1 Weryfikacja modelu makroskopowego

W celu oceny jakości szacowania zapotrzebowania na energię mechaniczną oraz zapotrzebowania na energię elektryczną dla silnika wraz z falownikiem dla pokonania oporów wzniesienia zrealizowano badania symulacyjne, w których porównano wyniki oszacowań modelem makroskopowym zapotrzebowania na energię mechaniczną oraz zapotrzebowania na energię elektryczną silnika wraz z falownikiem trzema wariantami modelu makroskopowego z wynikami oszacowania zapotrzebowania na energię elektryczną silnika wraz z falownikiem modelem mikroskopowym o rozdzielczości informacji o wysokości na odcinku drogi wynikającej z prędkości i 1 sekundowej rozdzielczości wektora czasu.

Wykorzystano trzy warianty modelu makroskopowego dla szacowania zapotrzebowania na energię elektryczną silnika z falownikiem:

1. model 2-punktowy bazujący na informacji o wysokości początku i końca odcinka,
2. model 3-punktowy bazujący na informacji o wysokości początku, środka i końca odcinka,
3. model przewyższenia bazujący na informacji o wysokości początku i końca odcinka oraz teoretycznego przewyższenia.

Wykresy na rys. 11 ilustrują uzyskane wyniki i umożliwiają ich porównanie. Dla celów badawczych założono, że wynik szacowania w oparciu o model mikroskopowy jest dokładny i służy jako punkt odniesienia dla zastosowanych modeli makroskopowych, co wynika z faktu, że zasadniczą różnicą modeli makroskopowych jest posługiwanie się cząstkową lub zagregowaną informacją o zmianach profilu wzdłużnego drogi.



Rys. 11. Porównanie wyników szacowania wpływu oporów wzniesienia na zapotrzebowanie energii elektrycznej

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że bezpośrednio wykorzystanie wyliczenia zmiany energii potencjalnej do uwzględnienia oporów wzniesienia pozwala na oszacowanie zapotrzebowania na energię mechaniczną do pokonania wzniesienia i pozwala oszacować również większą część energii elektrycznej potrzebnej do pokonania wzniesienia – analiza sprawności silnika wraz falownikiem wskazuje, że może to być rząd 80-90% w przypadku w miarę jednostajnego przyrostu wysokości. W przypadku bardziej złożonych profili ta dokładność może być mniejsza i dla jej poprawy korzystne jest zastosowanie dodatkowej informacji o zmianach profilu jaką może być informacja o wysokości w środku odcinka lub informacja o teoretycznym przewyższeniu na odcinku. Jest to jednak metoda wymagająca przygotowania informacji makroskopowej o odcinku drogi (informacja o wysokości w początkowym i końcowym odcinku drogi) uzupełnionej o informację o przewyższeniach. To oznacza, że na etapie przygotowywania tych danych konieczna jest dokładna znajomość profilu wysokości drogi i na jego podstawie odpowiednie przygotowanie danych przed uruchomieniem symulacji. Takie opracowanie profilu wysokości jest konieczne jeden raz i służyć może wielu profilom prędkości. Pozwala to w efekcie na zmniejszenie kosztów obliczeniowych podczas realizacji symulacji i ograniczenie wymaganych parametrów opisujących każdy odcinek drogi, co jest istotne w przypadku symulacji makroskopowych dla całych flot pojazdów.

7 Podsumowanie

Zaproponowany model makroskopowy pozwalający uwzględnić wpływ oporów wzniesienia w ruchu pojazdów może zostać wykorzystany do zwiększenia dokładności makroskopowej symulacji zapotrzebowania na energię. Wraz z modelem rozładowania akumulatora i sterowania procesem ładowania może zwiększyć dokładność wyników uzyskiwanych w makroskopowych modelach ruchu w obszarach prognozowania zasięgu, harmonogramowania ładowania czy też wyboru optymalnej pod względem zużycia energii trasy przejazdu. Przy znacznie ułatwionym dostępie do danych topograficznych, dostępnych w wersjach cyfrowych, opracowanie makroskopowego modelu trasy w postaci informacji o wysokościach na początku i końcu odcinka wraz z hipotetycznym przewyższeniem trasy, jest kwestią opracowania odpowiedniego narzędzia informatycznego. Obliczenie przewyższeń jest konieczne jeden raz (przy założeniu stałego podziału na odcinki) i służyć może wielu profilom prędkości.

Warto podkreślić, że już uwzględnienie samych zmian energii potencjalnej pozwala w znacznym stopniu uwzględnić wpływ wzniesień podczas szacowania zapotrzebowania na energię. Należy jednocześnie pamiętać, że celem takich modeli jest połączyć ich prostotę i efektywność obliczeniową z jak najlepszym, w sensie statystycznym, oszacowaniem zużycia energii. Z zasady więc tego typu modele nie są w stanie dorównać dokładnością modelom mikroskopowym i porównaniom zużycia energii przez konkretny pojazd z wynikami modelowania. O ich poprawności świadczyć będzie dopiero wynik analizy statystycznej większej grupy pojazdów lub dłuższej eksploatacji pojedynczego pojazdu, w której możliwe będzie uwzględnienie skumulowanego wpływu uwzględnienia w modelowaniu oporów wzniesienia.

O celowości wykorzystania tego typu modelowania świadczyć może zrealizowany podczas badań przykład, w którym różnica w wartości szacowanego zużycia energii dla braku uwzględnienia i uwzględnienia wzniesień wynosiła aż 15% przy średnim nachyleniu na poziomie ok. 0,5% (różnica wysokości 19,2 m) dla całej trasy o długości 3,8 km.

8 Literatura

- [1] Allen M. Real-world range ramifications: heating and air conditioning, website of FleetCarma company, electronic source access 22.01.2014: <http://www.fleetcarma.com/>.
- [2] Barlow T J, Latham S, McCrae I S, Boulter P G. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, version 3, TRL Limited, 2009.
- [3] Burress T. Benchmarking State-of-the-Art Technologies - 2013 U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, 14.05 2013.
- [4] Chew K W, Ken L C, Goi B M. Contour Data Acquisition System for Electric Vehicle Distance Estimation Method, Applied Mechanics and Materials, Vols. 479-480.
- [5] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems – Introduction to Modeling and Optimization, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] Hickman J, Hassel D, Joumard R, Samaras Z, Sorenson S. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, 1999.
- [7] Jazar R N. Vehicle Dynamics: Theory and Application, Springer Science and Business Media, New York 2008.
- [8] Lohse-Busch H, Duoba M, Rask E, Meyer M. Advanced Powertrain Research Facility AVTA Nissan Leaf testing and analysis, Argonne National Laboratory, 2012.
- [9] Luin B. Petelin S. Impact of road geometry on vehicle energy consumption, Transport Problems. VOLUME 12 , ISSUE 2 , June 2017.
- [10] Mashadi B, Crolla D. Vehicle powertrain systems, John Willey and Sons, Ltd, 2012
- [11] Mohan G, Assadian F, Longo S. Comparative analysis of forward-facing models vs backwardfacing models in powertrain component sizing, IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC: 2013).
- [12] Ohde B, Korzeniowski D, Ślaski G. Methodology for determination of particular resistance contributions in mechanical energy demand using simulation and real word velocity profiles, Journal of Mechanical and Transport Engineering, vol. 68 No. 2, 2016.
- [13] Prochowski L. Mechanika ruchu, WKiŁ, Warszawa, 2008.
- [14] Siłka W. Teoria ruchu samochodu, WNT, Warszawa 2002.
- [15] Ślaski G., Ohde B., Pikosz H., Modelowanie energochłonności eksploatacji samochodu elektrycznego w warunkach ruchu miejskiego dla potrzeb symulacji zużycia energii przez flotę taksówek, Logistyka, No. 4, 2014.
- [16] Ślaski G, Ohde B, Maciejewski M. Makroskopowy model zużycia energii i jego walidacja dla testowych cykli jezdnych; LOGISTYKA - Dodatek Nauka, 2015, nr 4.
- [17] Tannahill V R, Muttaqi K M, Sutanto D. Driver alerting system using range estimation of electric vehicles in real time under dynamically varying environmental conditions, IET Electrical Systems in Transportation, Volume 6, Issue 2, June 2016.
- [18] Treiber M, Kestling A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- [19] Ubysz A. Poszanowanie energii w pojazdach samochodowych część 1 obliczanie zużycia paliwa w pojeździe w ruchu rzeczywistym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011.