

Dobór silnika elektrycznego dla pojazdu hybrydowego przeznaczony do poruszania się w ruchu miejskim

Andrzej Sikora, Adam Zielonka

Wstęp

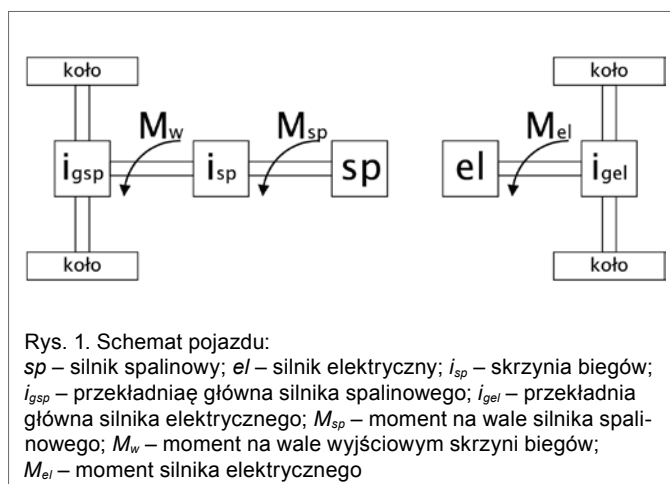
Warunki ruchu drogowego w aglomeracjach miejskich powodują, że pojazd z napędem spalinowym pracuje w zakresie niewielkich obciążeń, a w czasie częstych postojów pracuje na biegu jałowym. W takich warunkach pracy napęd z silnikiem spalinowym cechuje się niską sprawnością przetwarzania energii, a co za tym idzie, dużą emisją spalin. Ciągły wzrost zagęszczenia ruchu w aglomeracjach miejskich jest przyczyną powstawania smogu. W obrębie aglomeracji miejskich korzystne jest zastosowanie napędu z silnikiem elektrycznym, jednak ze względu na ograniczenia możliwości magazynowania energii elektrycznej zasięg pojazdu elektrycznego jest znacznie mniejszy niż w przypadku pojazdu z napędem spalinowym. Kompromisowym rozwiązaniem będzie zatem zastosowanie napędu hybrydowego – zawierającego dwa silniki: elektryczny i spalinowy. W artykule przedstawiony zostanie sposób określenia parametrów trakcyjnych pojazdu z napędem spalinowym w celu doboru silnika elektrycznego, który miałby stanowić dodatkowy napęd elektryczny pojazdu.

Układ napędowy pojazdu

W pojeździe przeznaczonym do poruszania się w mieście proponuje się zastosowanie napędu dwusilnikowego, wyposażonego w silnik spalinowy (*sp*) oraz silnik elektryczny (*el*). Napęd taki może być zrealizowany wg koncepcji przedstawionej na rys. 1, która zakłada, że silnik spalinowy napędza jedną oś, zaś silnik elektryczny napędza lub hamuje odzyskowo drugą oś pojazdu. W przypadku pojazdów z napędem na cztery koła silnik elektryczny można umieścić w miejscu wału napędowego pod podwoziem samochodu i połączyć z tylnym mostem napędowym. Dla takiego pojazdu przekładnia główna silnika spalinowego (i_{gsp}) i przekładnia główna silnika elektrycznego (i_{gel}) będą takie same. Rozwiązanie takie nie wymaga zmian konstrukcji zawieszenia pojazdu, a jedynie niewielkiej ingerencji w układ napędowy pojazdu.

Kierując się chęcią zmiany układu napędowego seryjnie produkowanego pojazdu do postaci zaproponowanej na rys. 1, przy zachowaniu jego parametrów trakcyjnych podczas pracy wyłącznie z silnikiem elektrycznym (przeznaczonym do poruszania się w mieście), należy pozyskać parametry pracy napędu na trasie przejazdu zlokalizowanej w aglomeracji miejskiej. Ponadto, dobierając silnik elektryczny zapewniający zachowanie parametrów trakcyjnych w mieście, należy uwzględnić możliwość jego chwilowego przeciążenia. Stąd celem pomiarów jest pozyskanie informacji o mocy i momencie napędowym na wale wyjściowym skrzyni biegów, tak aby dobrać możliwie mały silnik elektryczny, który podoła zapotrzebowaniu na moc

Abstract: Under traffic conditions existing in city agglomerations the ICE vehicles are usually only slightly loaded and during frequent stops the engines run idle. Under such circumstances, the ICE drive is characterized by low energy transformation efficiency and high exhaust gases emission. The increasing traffic in city agglomerations causes smog. The electrical motor drive would be advantageous for city agglomerations, but due to limits set by possibilities of energy accumulation its range is much lower than in case of ICE vehicle. A compromise might be reached by using a hybrid drive, combining two engines, ICE and electric motor. The paper presents a method for determining traction parameters of ICE vehicle in order to select electric motor for additional electric drive.



i moment. Dodatkowo postanowiono określić, na jakiej części trasy zapotrzebowanie na moment napędowy jest powtarzalne. Oprócz tego wyznaczone zostaną wartości średnie i maksymalne prędkości pojazdu, momentu obrotowego rozwijanego przez silnik spalinowy, momentu obrotowego na wale wyjściowym skrzyni biegów oraz mocy rozwijanej przez silnik spalinowy.

Sposób pozyskania parametrów trakcyjnych pojazdu

Chcąc pozyskać parametry trakcyjne pojazdu, należy wyznaczyć siłę na obwodzie kół napędowych i prędkość pojazdu w poszczególnych miejscach trasy. Ze względu na chwilową zmienność ruchu badania te należy wykonać wielokrotnie na tych samych odcinkach trasy, celem zaobserwowania powtarzalności wyznaczanych parametrów układu napędowego.

Tabela 1. Procentowy udział odcinków tras, dla których zapotrzebowanie na moment obrotowy należy do zadanego zakresu, oraz procentowy udział trasy, na której moment obrotowy wszystkich przejazdów należy do tego samego zakresu

Zakresy	0–50 Nm	50–100 Nm	50–200 Nm
Przejazd 1	72,51%	22,86%	4,63%
Przejazd 2	62,67%	30,26%	7,07%
Przejazd 3	61,92%	27,46%	10,62%
Część wspólna	40,30%	5,95%	0,13%

Tabela 2. Procentowy udział odcinków tras, dla których zapotrzebowanie na moc przez układ napędowy należy do zadanego zakresu, oraz procentowy udział trasy, na której zapotrzebowanie na moc przez układ napędowy dla wszystkich przejazdów należy do tego samego zakresu

Zakresy	0–5 kW	5–10 kW	10–15 kW	15–30 kW
Przejazd 1	60,06%	20,87%	12,20%	6,87%
Przejazd 2	59,75%	21,17%	12,23%	6,85%
Przejazd 3	59,79%	21,04%	11,95%	7,22%
Część wspólna	47,98%	9,54%	5,72%	3,72%

W przypadku silnika benzynowego siłę napędową można wyznaczyć metodą pośrednią przez pomiar podciśnienia w układzie dolotowym i określenie aktualnego przełożenia skrzyni biegów, które wyznaczone będzie na podstawie pomiaru prędkości pojazdu i prędkości obrotowej silnika (w przypadku silnika o zapłonie samoczynnym informacje o momencie należy wyznaczyć w inny sposób). Pomiaru te można wykonać za pomocą rejestratora podłączonego do złącza OBDII systemu diagnostycznego. Przy takim podejściu można przyjąć liniową zależność pomiędzy momentem obrotowym rozwijanym przez silnik a podciśnieniem w kolektorze dolotowym. Pozwala to na przeprowadzenie rejestracji podciśnienia w kolektorze dolotowym dla szerokiej gamy pojazdów z silnikiem benzynowym bez konieczności ich modyfikacji, przy wystarczającej (ze względu na rozważane zadanie) dokładności pomiarów wyznaczanych parametrów. Ponadto, żeby zapewnić przypisanie wyznaczonych parametrów do poszczególnych odcinków trasy, można użyć rejestratora GPS [1]. Wspólnym parametrem rejestracji położenia i parametrów napędu jest czas, który posłuży do synchronizacji wykonanych pomiarów. Przykładowe wyniki rejestracji położenia za pomocą technologii GPS i rejestracji parametrów napędu przedstawia rysunek 2.

Chcąc zaobserwować powtarzalność wyznaczanych parametrów trakcyjnych na badanej trasie, należy przeprowadzić analizę zarejestrowanych parametrów pochodzących z kilku przejazdów. Ze względu na nieprzewidziane sytuacje, np. chwilowy brak sygnału GPS, różnice w ruchu wynikające z przejazdu odcinkiem zastępczym trasy, np. objazd, należy wyznaczyć wspólne części trasy dla wszystkich przejazdów i analizę prowadzić tylko dla wspólnej części trasy, aby możliwe było przedstawienie parametrów trakcyjnych w funkcji przebytej drogi. W tym celu stworzono program komputerowy, który pozwala na porównanie przeprowadzonych rejestracji w ramach tej samej trasy. Program ten wyznacza część wspólną tras i synchronizuje zarejestrowane parametry układu napędowego pojazdu z odpowiadającymi im punktami trasy. Parametrem pozwalającym na synchronizację jest czas, gdyż każdy pomiar położenia GPS

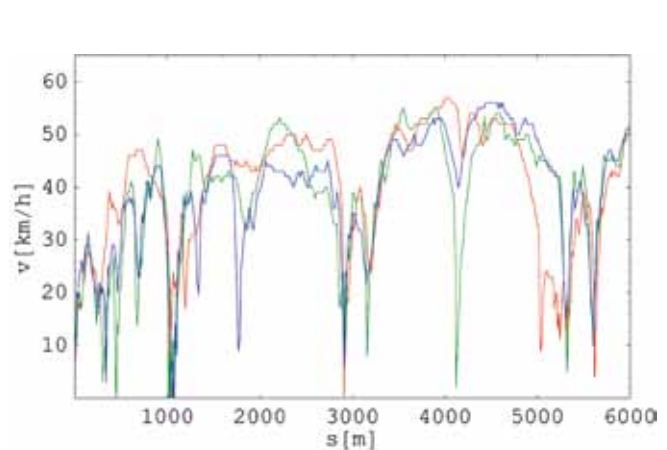
```

$GPGGA,162421.000,5016.9978,N,01906.5159,E,1,09,0.9,232.8,M,42.1,M,0000*59
$GPGSA,A,3,24,32,31,20,23,13,04,11,17,,,,,2.0,0.9,1.7*39
$GPRSV,3,1,11,20,79,082,28,23,65,215,37,32,49,088,22,31,32,058,29*7E
$GPGSV,3,2,11,24,31,156,24,13,31,222,32,11,27,174,30,17,25,258,41*74
$GPRSV,3,3,11,04,21,311,40,25,03,017,,30,00,079,*46
$GPRMC,162421.000,A,5016.9978,N,01906.5159,E,0.00,,231210,,*17
$GPGGA,162422.000,5016.9978,N,01906.5159,E,1,09,0.9,232.8,M,42.1,M,0000*5A
$GPGSA,A,3,24,32,31,20,23,13,04,11,17,,,,,2.0,0.9,1.7*39
$GPRMC,162422.000,A,5016.9978,N,01906.5159,E,0.00,,231210,,*14
$GPGGA,162423.000,5016.9978,N,01906.5159,E,1,08,1.0,232.8,M,42.1,M,0000*52
$GPGSA,A,3,24,32,31,23,13,04,11,17,,,,,2.5,1.0,2.3*31
$GPRMC,162423.000,A,5016.9978,N,01906.5159,E,0.00,,231210,,*15
$GPGGA,162424.000,5016.9978,N,01906.5159,E,1,08,1.0,232.8,M,42.1,M,0000*55
$GPGSA,A,3,24,32,31,23,13,04,11,17,,,,,2.5,1.0,2.3*31
    
```

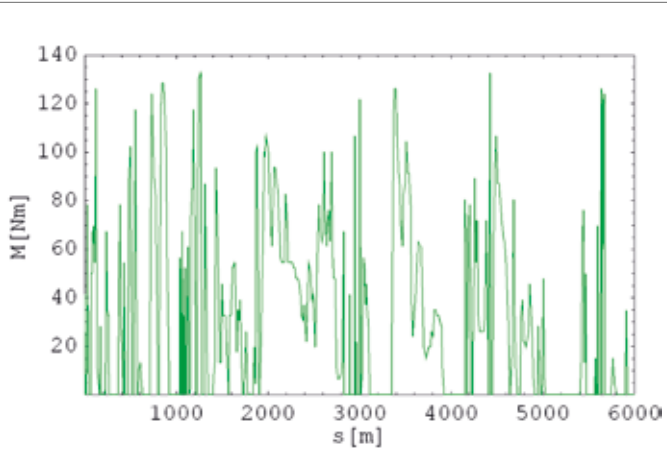
```

Czwartek, 23 Grudzień, 2010, 17:25:43
OBD ----
Znacznik, CZAS, PID A - 011, CZAS, PID B -
, ZAPISU, Ciśnienie w kolektorze dolotowy
, 0.19, 33, 0.44, 770, 0.69, 0, 0.93, 0.715
, 1.17, 33, 1.42, 751, 1.67, 0, 1.91, 0.460
, 2.15, 34, 2.40, 753, 2.64, 0, 2.89, 0.115
, 3.14, 34, 3.38, 756, 3.62, 0, 3.87, 0.470
, 4.13, 34, 4.38, 765, 4.63, 0, 4.88, 0.635
, 5.13, 34, 5.38, 748, 5.63, 0, 5.89, 0.145
, 6.13, 34, 6.38, 759, 6.63, 0, 6.88, 0.080
, 7.13, 40, 7.38, 775, 7.63, 0, 7.89, 0.800
, 8.14, 33, 8.40, 759, 8.65, 0, 8.89, 0.080
, 9.15, 51, 9.40, 1160, 9.65, 0, 9.89, 0.780
    
```

Rys. 2. Zrzut ekranu fragmentu przykładowego pliku zawierającego dane GPS (u góry) oraz pliku zawierającego pomiary parametrów napędu z gniazda OBDII (u dołu)



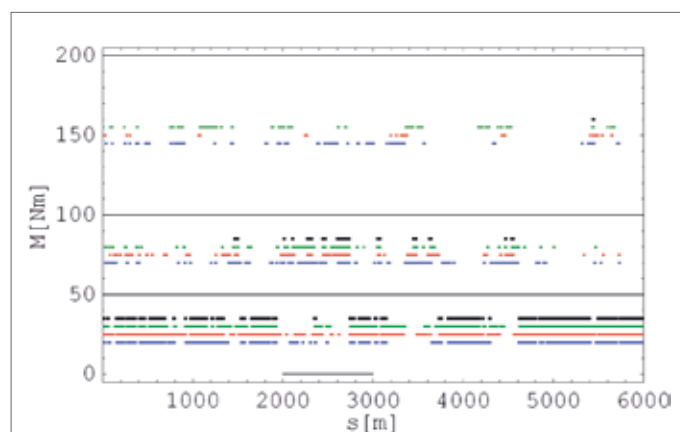
Rys. 3. Porównanie przebiegów prędkości — przejazd pierwszy; — przejazd drugi; — przejazd trzeci na wybranym fragmencie trasy



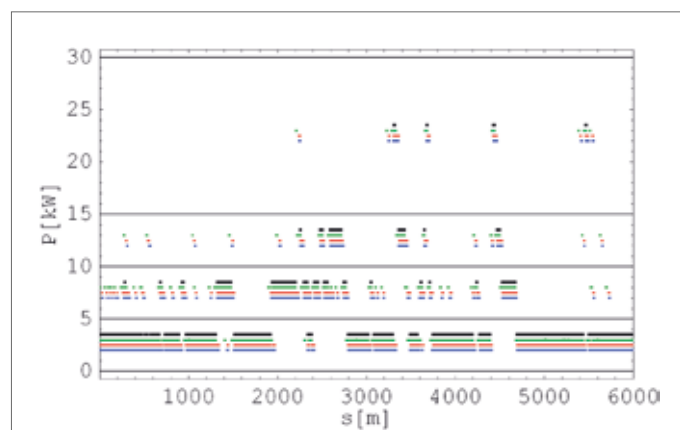
Rys. 4. Wykres momentu obrotowego na wale wyjściowym skrzyni biegów w funkcji przebytej drogi dla jednego z przejazdów na fragmencie badanej trasy

Tabela 3. Zestawienie wartości maksymalnych (indeks Max) oraz średnich (indeks Avg) parametrów pracy napędu: V – prędkość; M_{sp} – moment obrotowy silnika spalinowego; M_w – moment obrotowy na wyjściu skrzyni biegów; P – moc rozwijana przez silnik dla każdego z przejazdów

Przejazd	V_{Max} [km/h]	V_{Avg} [km/h]	M_{spMax} [Nm]	M_{spAvg} [Nm]	M_{wMax} [Nm]	M_{wAvg} [Nm]	P_{Max} [kW]	P_{Avg} [kW]
1	71	48,46	137,18	26,07	346,21	30,71	28,41	4,91
2	68	47,78	132,82	33,25	346,21	41,70	30,00	6,03
3	67	45,45	137,18	35,81	385,67	42,86	27,57	6,02



Rys. 5. Porównanie zdyskretyzowanych wartości momentu obrotowego na wale wyjściowym skrzyni biegów:
 — przejazd pierwszy; — przejazd drugi; — przejazd trzeci;
 — miejsca trasy, w których dla wszystkich przejazdów wartości momentu obrotowego należała do tego samego zakresu



Rys. 6. Porównanie zdyskretyzowanych wartości mocy silnika:
 — przejazd pierwszy; — przejazd drugi; — przejazd trzeci;
 — miejsca trasy, w których dla wszystkich przejazdów moc silnika należała do tego samego zakresu

zawiera czas (uniwersalny) rejestracji, zaś dane pozyskiwane przez rejestrator parametrów zapisywane są jako funkcje czasu, począwszy od czasu rozpoczęcia rejestracji. Ważne jest, aby czas systemu operacyjnego komputera, do którego podłączony jest rejestrator, był zsynchronizowany z czasem uniwersalnym, gdyż rejestrator parametrów układu napędowego pojazdu pobiera czas z systemu operacyjnego.

Wykorzystując stworzony program komputerowy, składający się z dwóch modułów: synchronizacji danych i porównania tras przejazdu, otrzymano zestawy danych, które mogą zostać poddane dalszej analizie. Na rysunku 3 porównano przebiegi prędkości na wybranym fragmencie trasy przejazdu.

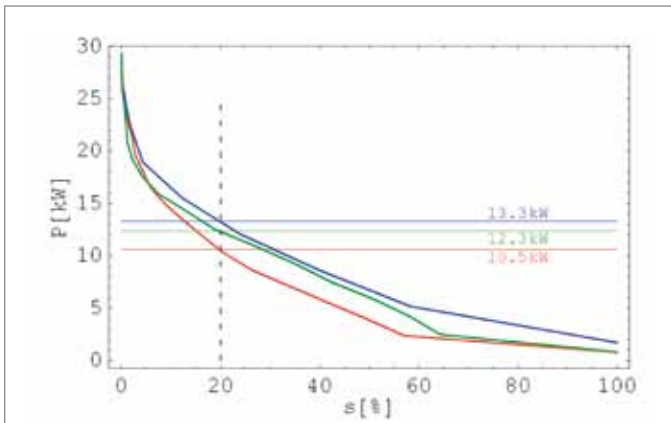
Na podstawie zsynchronizowanych danych wyznaczono moment obrotowy rozwijany przez silnik spalinowy na trasie dla każdego z przejazdów. Ponadto, w oparciu o zarejestrowaną i przypisaną do trasy prędkość i obroty silnika, określono przełożenie skrzyni biegów wyrażone jako funkcja przebytej drogi. Dzięki tak uzyskanym danym wyznaczono napędowy moment obrotowy na wale wyjściowym skrzyni biegów (przed przekładnią główną). Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4 (ze względu na dużą zmienność wyznaczonych danych nie zestawiono ich dla różnych przejazdów na jednym rysunku).

Ze względu na zmienność ruchu drogowego przebiegi momentu obrotowego na wale wyjściowym skrzyni biegów nie pokrywają się dla różnych przejazdów, dlatego wartość momentu obrotowego potraktowano jako wartości należące do jednego z zakresów: 0–50 Nm, 50–100 Nm, 100–200 Nm. Dane te zostały przedstawione na rysunku 5. Na tym rysunku, w każdym ze wspomnianych przedziałów, dane dla kolejnych przejazdów zaznaczono liniami koloru niebieskiego, czerwonego i zielonego, zaś linią czarną zaznaczono miejsca, w których jednocześnie dla wszystkich przejazdów wartość momentu obrotowego należała do tego samego przedziału.

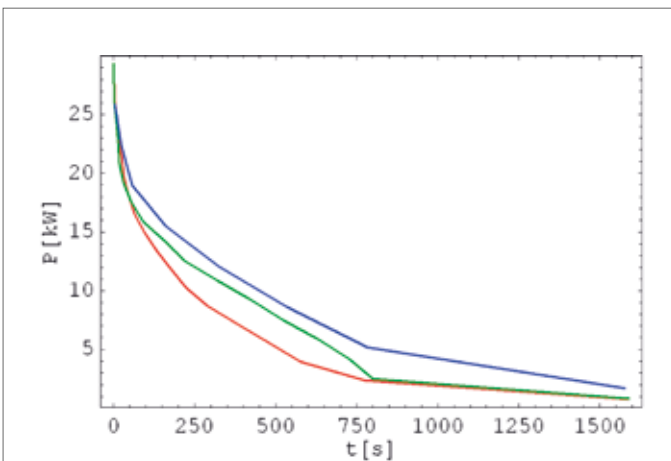
Przedstawione na rysunkach 3–5 dane dotyczą początkowych sześciu kilometrów trasy. Na rysunku 5 można zauważyć, że moment obrotowy w pewnych miejscach zaznaczono w dwóch zakresach, co jest wynikiem braku rozdzielczości dla przyjętej skali rysunku. Przedstawione na rysunku 5 zestawienie danych pokazuje, że w znaczącej części trasy obciążenie jest powtarzalne i wynika głównie z profilu trasy i prędkości jazdy, zaś w innych miejscach zapotrzebowanie na moment obrotowy ma charakter zmienny, zależny od innych nieprzewidywalnych czynników. W tabeli 1 przedstawiono, przez jaką część trasy zapotrzebowanie na moment obrotowy należało do poszczególnych zakresów oraz jaką część trasy stanowiły odcinki, w których dla wszystkich trzech przejazdów zapotrzebowanie na moment obrotowy było z tego samego zakresu.

W analogiczny sposób zestawiono dane dla mocy rozwijanej przez silnik spalinowy pojazdu i przedstawiono je na rysunku 6 i w tabeli 2, w której wydzielono zakresy 0–5 kW, 5–10 kW, 10–15 kW, 15–30 kW.

Następnie wyznaczone dane dotyczące mocy rozwijanej przez silnik spalinowy dla każdego z przejazdów uporządkowano malejąco i przedstawiono na rysunku 7 jako wykres przebytej drogi oraz na rysunku 8 jako wykres czasu przejazdu. Na rysunku 7 można zauważyć, że zapotrzebowanie na moc dla



Rys. 7. Uporządkowany wykres mocy rozwijanej przez silnik w funkcji przebytej drogi: — przejazd pierwszy; — przejazd drugi; — przejazd trzeci,



Rys. 8. Uporządkowany wykres mocy rozwijanej przez silnik w funkcji czasu przejazdu: — przejazd pierwszy; — przejazd drugi; — przejazd trzeci,

80% trasy nie przekracza połowy maksymalnego zapotrzebowania na moc, co jest istotną informacją przy doborze silnika elektrycznego.

Z pozyskanych danych wyznaczono również wartości maksymalne oraz średnie parametrów pracy napędu, co zostało zestawione w tabeli 3.

Dyskusja otrzymanych wyników

Przeprowadzone pomiary, a następnie wykonane analizy danych w oparciu o stworzone i opisane wcześniej narzędzia pozwalają określić miejsca na trasie przejazdu cechujące się powtarzalnymi parametrami trakcyjnymi. W szczególności dla badanej trasy stwierdzono powtarzalność zapotrzebowania na moc w ponad 60% jej długości, zaś powtarzalność zapotrzebowania na moment napędowy dla badanej trasy wynosiła 45%. Wykonane pomiary na obszarze aglomeracji miejskiej pokazują dużą zmienność obciążenia na trasie przejazdu. Przedstawione w tabeli 3 wyniki pokazują, że wartości średnie na trasie przejazdu są znacznie mniejsze niż wartości maksymal-

ne, co świadczy o małym stopniu wykorzystania silnika spalinowego. Z uporządkowanego wykresu mocy (rys. 7) wynika, że na 80% trasy zapotrzebowanie na moc układu napędowego jest mniejsze od połowy maksymalnej mocy rozwijanej przez silnik spalinowy. Ponadto uzyskane zestawienia potwierdzają powtarzalność zapotrzebowania na moc i moment w różnych przejazdach tą samą trasą.

Wnioski

Przedstawione wyniki badań pokazują, że zapotrzebowanie na moc pojazdu poruszającego się w mieście jest znacznie mniejsze niż maksymalna moc rozwijana przez silnik spalinowy typowego współczesnego pojazdu oraz że tylko w krótkich chwilach pojazd posiada zapotrzebowanie na moc istotnie większą od średniego. Na podstawie powyższego można wywnioskować, że silnik elektryczny należy dobrać w taki sposób, aby zapewnił pokrycie zapotrzebowania na moc i moment napędowy w większości trasy, oczywiście przy jak najmniejszej jego wielkości. Zatem na podstawie przeprowadzonych badań i analiz dla tego typu pojazdu zaleca się dobór silnika elektrycznego o mocy 10–15 kW. Silnik taki zapewni możliwość poruszania się po około 80% badanej trasy. Na pozostałym fragmencie trasy, gdzie obciążenie jest już znaczne, uzasadnione jest wykorzystanie napędu z silnikiem spalinowym.

Literatura:

- [1] SIKORA A., ZIELONKA A.: *Wyznaczanie profilu poprzecznego i podłużnego trasy w oparciu o technologię GPS oraz dane numeryczne SRTM*. XIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i V Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2010.
- [2] WOLNIK T., GLINKA T.: *Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym*, „Napędy i Sterowanie” 12/2011, s. 50–54.
- [3] SZYMAŃSKI Z.: *Sterowanie wielopoziomowe układu napędowego trakcyjnego pojazdu kołowego z napędem elektrycznym lub hybrydowym*. Czasopismo Techniczne. „Elektrotechnika”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Z1-E/2007, s. 213–224.
- [4] KULESZ B., FICE M., SETLAK R.: *Modułowy hybrydowy układ napędowy samochodu*, „Napędy i Sterowanie” 3/2011, s. 80–84.
- [5] GLINKA T.: *Electric motors with permanent magnets*. „Przegląd Elektrotechniczny”, PL ISSN 0033-2097, 7/2008, s. 1–7.

Artykuł jest fragmentem grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 326637.

Andrzej Sikora – Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,
e-mail: Andrzej.Sikora@polsl.pl
Adam Zielonka – Politechnika Śląska, Wydział Matematyki
Stosowanej,
e-mail: Adam.Zielonka@polsl.pl