

**Tomasz Rudnicki**  
**Politechnika Śląska, Gliwice**

## POJAZDY Z SILNIKAMI ELEKTRYCZNYMI

### MOTOR VEHICLES WITH ELECTRIC MOTOR

**Abstract:** The paper presents advantages and disadvantages of motor vehicles with electric motor. The paper discusses kind of electric motors and shows the methods of regulation circuits of electric motors. Estimate range and travel expenses of vehicles with electric motor are also presented in the paper. Traveling costs are compared for the internal-combustion engine and electric motor. The paper also discusses control method and shows the troubles of regulation circuits of electric motors.

#### 1. Wprowadzenie

Samochody elektryczne wykorzystywane do jazdy w miastach (osobowe, dostawcze), a także autobusy elektryczne, mogą rozwiązać szereg problemów cywilizacyjnych i ekologicznych: zmniejszenie zużycia paliwa, zmniejszenie emisji gazów CO<sub>2</sub>, N<sub>x</sub>, znaczące obniżenie poziomu hałasu. Barię ograniczającą postęp w wprowadzaniu napędów elektrycznych jest magazynowanie energii. Tradycyjne akumulatory mają małą gęstość energii, ogniwa paliwowe, mimo 100-letniej historii, nie mają takiego poziomu technicznego, który umożliwiłby ich masową produkcję i zastosowanie. Dlatego produkcja samochodów elektrycznych przez koncerny samochodowe jest niewielka, tylko w Stanach Zjednoczonych, prawa Stanowe zmuszają, a dopłaty zachęcają, użytkowników do kupowania samochodów elektrycznych. Koncerny samochodowe większą uwagę zwracają na napędy hybrydowe, spalinowo – elektryczne, które umożliwiają zmniejszenie zużycia paliwa od 20% do 30%. Jako przykład można wymienić Toyotę Prius.

#### 2. Cechy pojazdów elektrycznych

Pojazdy mechaniczne z napędem elektrycznym są pojazdami prawie idealnymi do wykorzystania w warunkach miejskich. Główne ich zalety przedstawiają się następująco:

- niezależność od ropy naftowej oraz od jej cen na rynkach światowych;
- zmniejszenie kosztów zużycia energii przez pojazd nawet o 80%;
- sprawność przetwarzania energii w elektrycznych układach napędowych wynosi ok. 70-80%, podczas gdy pojazdów spalających paliwo ok. 15-20%;

- dysponowanie większym momentem obrotowym niż pojazdy spalinowe;
- niska emisja hałasu w porównaniu do pojazdów z silnikami spalinowymi;
- brak szkodliwych toksyn, które są zawarte w spalinach pojazdów spalinowych;
- około cztery razy niższe koszty eksploatacji w porównaniu do pojazdów z silnikami spalinowymi;
- w razie wypadku małe ryzyko detonacji pojazdu, poparzenia lub spalania się osób podróżujących;

Te zalety pojazdów z napędem elektrycznym powodują, że cieszą się one coraz większym uznaniem lecz nie są one pozbawione wad. Głównymi wadami pojazdów mechanicznych z silnikami elektrycznymi są:

- ograniczony zasięg i długi czas ładowania baterii akumulatorów;
- duża masa i wysoka cena baterii akumulatorów;
- ograniczona żywotność akumulatorów;
- emisja zakłóceń elektromagnetycznych;
- wrażliwość na warunki atmosferyczne;

Zoptymalizowane mechatroniczne układy napędowe pojazdów mechanicznych mogą przyczynić się do znacznego upowszechnienia samochodów elektrycznych, co przyczyni się do zmniejszenia emisji spalin w mieście. Odpowiednia konstrukcja pojazdu elektrycznego i inteligentne jego sterowanie pozwoli wykorzystać energię hamowania do ładowania akumulatorów. To spowoduje wydłużenie zasięgu pojazdu [2].

### 3. Silniki w pojazdach elektrycznych

Do budowy pojazdów elektrycznych stosuje się zarówno silniki prądu stałego jak i silniki prądu zmiennego [5].

Wykorzystuje się następujące silniki prądu stałego:

- komutatorowe ze wzbudzeniem elektromagnetycznym;
- komutatorowe ze wzbudzeniem magnesami trwałymi;

Jeżeli chodzi o silniki prądu zmiennego to są one następujące:

- asynchroniczne klatkowe;
- synchroniczne z trapezoidalnym kształtem siły elektromotorycznej;
- synchroniczne z sinusoidalnym kształtem siły elektromotorycznej;
- synchroniczne reluktancyjne przełączalne;

Do realizacji pojazdu elektrycznego nadaje się każdy z wymienionych silników. Warunkiem jest odpowiedni dobór mocy, prędkości i momentu obrotowego silnika. Dobór silnika będzie decydował o osiągnięciach pojazdu. Silniki prądu stałego oraz prądu zmiennego mają swoje właściwości, które mają wpływ na ich zastosowanie zarówno pod kątem osiągnięci jak i sterowania [5].

Silniki prądu stałego nie wymagają przetwornicy energoelektronicznej, a więc można zasilac je bezpośrednio z przełączalnych akumulatorów lub stosując oporniki rozruchowe. To rozwiązanie jest jednak mało praktyczne i uniemożliwiające późniejsze kształtowanie parametrów napędu. Silniki z magnesami trwałymi mają większą sprawność od silników bez magnesów, ale tylko w zakresie prędkości od zera do prędkości znamionowej. W takim zakresie prędkości nie muszą pobierać prądu z akumulatorów na wzbudzenie silnika. Niestety, jeśli chce się uzyskać prędkość obrotową silnika wyższą od znamionowej to sprawność silnika z magnesami trwałymi maleje.

Każdy z silników prądu zmiennego wymaga przetwornicy energoelektronicznej. W praktyce powinna być to przetwornica sterowana mikroprocesorowo, bo tylko wtedy jest możliwość dowolnego kształtowania parametrów napędu elektrycznego pojazdu elektrycznego. Silniki prądu zmiennego mają wyższą sprawność niż silniki prądu stałego (np. silnik o mocy 40kW ma sprawność o 8% wyższą od silnika prądu stałego). W danym gabarycie mają największą moc w stosunku do silników prądu stałego (na-

wet o 70%) [4]. Znakomicie nadają się do pojazdów mechanicznych, bo są lekkie w stosunku do innych silników. Silniki prądu zmiennego charakteryzują się dużą przeciążalnością momentem obrotowym. Chwilowy moment obciążenia może być kilkakrotnie większy od momentu znamionowego (wartość momentu maksymalnego determinuje energoelektronika, która nie może być przeciążana). Przeciążalność momentem decyduje o dynamice działania napędu [3].

### 4. Szacowanie zasięgu pojazdu elektrycznego

Zasięg pojazdu elektrycznego jest uzależniony od wielu czynników i nie można udzielić jednoznacznej odpowiedzi na ten temat. Można jednak wykonać obliczenia, które pozwolą na oszacowanie maksymalnego zasięgu pojazdu w przyjętych niżej założeniach. Poniżej przedstawiono przykład obliczenia zasięgu średniej wielkości osobowego samochodu elektrycznego, którego źródłem napędu jest silnik PMKESM.

Założenia:

- prędkość jazdy  $V=50\text{km/h}=13.9\text{m/s}$ ;
- masa pojazdu łącznie z akumulatorami  $m_1=1000\text{kg}$ ;
- masa dwóch pasażerów z bagażem  $m_2=200\text{kg}$ ;
- wysokość pojazdu  $h=1.4\text{m}$ ;
- szerokość pojazdu  $w=1.5\text{m}$ ;
- współczynnik oporu aerodynamicznego  $C_x=0.31$ ;
- sprawność przekładni (silnik napędza koła przez przekładnię główną)  $\text{SPR}_p=0.9$ ;
- współczynnik tarcia drogi  $\mu=0.013$ ;
- gęstość powietrza  $\rho_p=1.205\text{kg/m}^3$ ;
- sprawność silnika  $\text{SPR}_s=0.78$ ;
- napięcie znamionowe baterii akumulatorów  $U_{ak}=84\text{V}$ ;
- pojemność baterii akumulatorów  $Q_{ak}=180\text{Ah}$  ( $T=20^\circ\text{C}$ );
- temperatura powietrza  $T=20^\circ\text{C}$ ;
- pojazd porusza się po płaskiej drodze czyli kąt nachylenia drogi  $\alpha=0$  [deg];
- nie ma wiatru;
- pominięcie strat energii w komutatorze elektronicznym zasilającym silnik - straty te są znacznie mniejsze od strat w silniku;
- charakterystyka mechaniczna silnika jest taka, że przy zasilaniu napięciem  $U_{ak}$  ma

prędkość obrotową odpowiadającą prędkości pojazdu  $V$ ;

Siła oporu toczenia:

$$F_n = \mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g = 153N \quad (1)$$

Współczynnik powierzchni czołowej samochodu osobowego:

$$A_t = 0.9 \cdot h \cdot w = 1.89 \quad (2)$$

Siła oporu powietrza:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot C_x \cdot A_t \cdot V^2 = 68N \quad (3)$$

Moc na kołach potrzebna do poruszania pojazdu:

$$P_k = (F_n + F_p) \cdot V = 3072W \quad (4)$$

Moc potrzebna na poruszanie pojazdu przeliczona na wał silnika:

$$P_s = \frac{P_k}{SPR_p} = 3413W \quad (5)$$

Moc pobierana przez silnik z akumulatorów:

$$P_{ak} = \frac{P_s}{SPR_s} = 4376W \quad (6)$$

Pobór prądu z akumulatorów:

$$I_a = \frac{P_{ak}}{U_{ak}} = 52A \quad (7)$$

Czas jazdy samochodu elektrycznego przy prędkości  $V$ :

$$t = \frac{Q_{ak}}{I_a} = 3,5h \quad (8)$$

Zasięg jazdy pojazdu elektrycznego:

$$s = V \cdot t = 175km \quad (9)$$

Rzeczywisty zasięg jazdy samochodu elektrycznego w podanych warunkach będzie mniejszy, ponieważ rzeczywista pojemność akumulatorów będzie mniejsza, a pobór prądu większy niż obliczony. Przy obciążeniu akumulatorów napięcie na nich jest mniejsze od znamionowego i aby silnik mógł wytworzyć pożądaną moc na wale przy niższym napięciu zasilania musi pobrać więcej prądu. Trzeba pamiętać też o tym, że nie zna się najczęściej sprawności silnika, gdyż ta, która podawana jest na tabliczce znamionowej silnika jest największą sprawnością, która jest tylko przy obciążeniu znamionowym silnika. Przy mniejszym ob-

ciążeniu silnika sprawność silnika jest mniejsza, co należałoby uwzględnić w obliczeniach. Jak można zauważyć duży wpływ na zasięg samochodu ma także współczynnik tarcia  $\mu$ , masa pojazdu  $m_1$  oraz współczynnik oporu aerodynamicznego  $C_x$ . Współczynnik tarcia  $\mu$  zależy nie tylko od jakości drogi, ale także od kół pojazdu. Zwiększenie ciśnienia w ogumieniu oraz zastosowanie węższych opon zmniejszy ten współczynnik, a tym samym wydłuży zasięg pojazdu. Zmniejszenie masy pojazdu  $m_1$  oraz zmniejszenie współczynnika  $C_x$  również pomoże w wydłużeniu zasięgu jazdy. Jednak praktycznie zarówno masę pojazdu  $m_1$  jak i współczynnik  $C_x$  można zmienić tylko na etapie projektowania pojazdu.

## 5. Koszt jazdy pojazdem elektrycznym

Biorąc pod uwagę pojazd o parametrach podanych w poprzednim punkcie można dokonać przybliżonych obliczeń kosztu eksploatacji samochodu elektrycznego.

Założenia:

- cena energii elektrycznej 0.3682 PLN/kWh
- jako zasilanie zastosowano kwasowe akumulatory trakcyjne

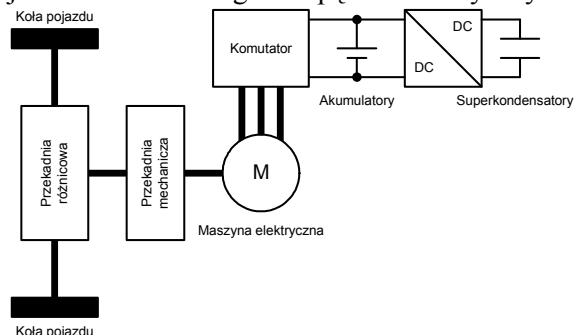
Ładowanie akumulatorów kwasowych trakcyjnych w pełni rozładowanych trwa 12-14 godzin. Przez większość czasu ładowane są prądem 10 godzinnym, czyli dla naszego pojazdu będzie to 18A. Akumulator ma jednak sprawność mniejszą od 100% czyli więcej energii należy dostarczyć do akumulatora przy ładowaniu niż można z niego uzyskać przy rozładowywaniu. Wynika z tego, że proces całkowitego naładowania akumulatora kwasowego trwa dłużej niż 10h. Napięcie ładowania baterii akumulatorów o napięciu znamionowym 84V wynosi 100V, co daje moc przekazywaną przy ładowaniu do akumulatorów 1800W. Moc ta dostarczana jest do akumulatorów przez ładowarkę. Jeśli zastosowano dobrej jakości ładowarkę z transformatorem impulsowym to sprawność takiego urządzenia wynosi 90%. Zatem moc pobrana z sieci elektrycznej będzie wynosiła około 2000W. Taka moc będzie pobierana przez ładowarkę tylko przez jakiś czas, później prąd ładowania spada. Do szacunkowych obliczeń można przyjąć, że pełna moc pobierana jest przy ładowaniu akumulatorów z sieci elektrycznej przez 8h, co da zużycie energii elektrycznej 16kWh. Taka ilość zużytej energii elektrycznej będzie kosztowała 5.9 PLN. Jak obliczono wcześniej zasięg takiego pojazdu

wyniesie 175km, więc koszt przejechania 100km wyniesie 3.4PLN. Jeżeli do ładowania akumulatorów pojazdu wykorzystać prąd w taryfie nocnej w przypadku posiadania licznika dwutaryfowego, przy którym cena jednostkowa energii wynosi 0.2336PLN/kWh to wówczas koszt przejechania 100km pojazdem elektrycznym będzie mniejszy i wyniesie zaledwie 2.14PLN.

Dobrej jakości akumulatory trakcyjne utrzymują swoją pojemność przez 500 cykli pracy. Cena jednego dobrej jakości akumulatora trakcyjnego o pojemności 180Ah i napięciu 6V wynosi 370PLN. Takich akumulatorów o napięciu 6V musi być 14, aby uzyskać napięcie 84V. Daje to koszt zakupu akumulatorów 5180PLN. Na jednym cyklu pracy akumulatorów samochód elektryczny powinien przejechać 175km, więc przez 500 cykli pracy powinien przejechać 87500km. Zatem koszt amortyzacji akumulatorów w przeliczeniu na 100km wyniesie 5.92PLN. Uwzględniając koszt zużycia energii elektrycznej w taryfie nocnej (2.14PLN za 100km) oraz koszt amortyzacji akumulatorów, to otrzyma się koszt przejechania 100km wynoszący 8.06PLN. Przy założeniu, że cena benzyny wynosi 4,25PLN/l, to odpowiada to użytkowaniu samochodu spalinowego o zużyciu paliwa 1.9l/100km. Przy samochodzie spalinowym dochodzą jednak jeszcze przynajmniej koszty wymiany oleju silnikowego i przeglądów silnika spalinowego. Stanowi to o znaczącej konkurencji samochodu elektrycznego w stosunku do samochodu spalinowego.

## 6. Sterowanie silnikiem elektrycznym pojazdu mechanicznego

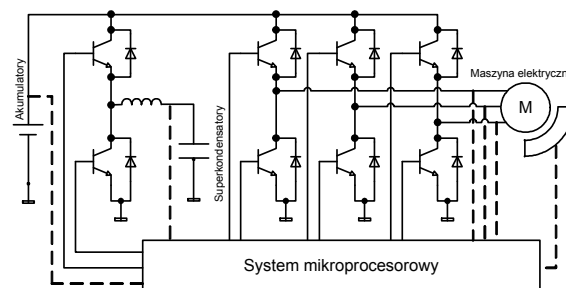
Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy pojazdu mechanicznego z napędem elektrycznym.



Rys. 1. Schemat blokowy pojazdu mechanicznego z napędem elektrycznym

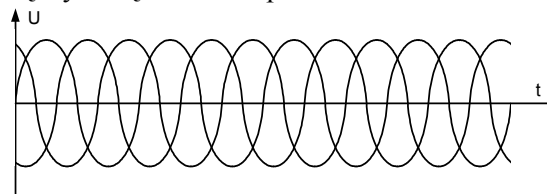
Mechatroniczny układ napędowy tego pojazdu obejmuje: silnik elektryczny, magazyny energii

(akumulatory i superkondensatory), układ energoelektroniczny i mikroprocesorowy system sterowania (rys. 2.). Głównym zadaniem systemu mikroprocesorowego jest sterowanie kluczami tranzystorowymi układu energoelektronicznego na podstawie pomiaru prądu pobieranego (linie przerywane) przez poszczególne fazy silnika oraz na podstawie położenia wirnika względem stojana.



Rys. 2. Układ mechatroniczny pojazdu z napędem elektrycznym

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe przebiegi napięcia sterującego silnik przy sterowaniu sinusoidalnym. Napięcia fazowe są przesunięte między sobą co 120 stopni.



Rys. 3. Przebiegi napięć na poszczególnych fazach silnika przy sterowaniu sinusoidalnym

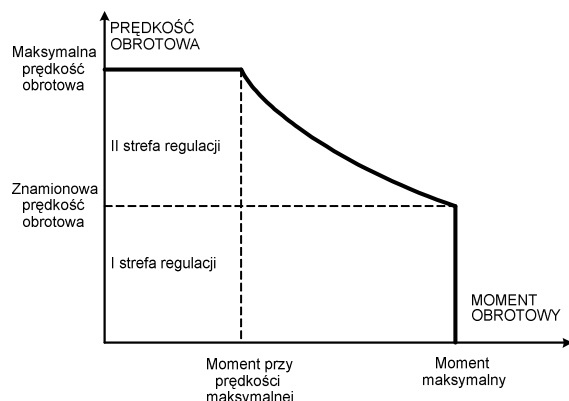
Dodatkowym zadaniem systemu mikroprocesorowego jest odpowiednie sterowanie akumulatorem i baterią superkondensatorów w zależności od drogi przebywanej przez pojazd. Odzyskiwanie energii (ładowanie baterii akumulatorów i superkondensatorów) możliwe jest jedynie podczas swobodnego toczenia pojazdu (np. ze wzniesienia).

## 7. Strefy regulacji silnika pojazdu elektrycznego

Silnik pojazdu elektrycznego powinien mieć możliwość pracy w dwóch strefach regulacji (rys.4.) [1].

Aktualny punkt pracy silnika wynika z zadanej prędkości pojazdu oraz z aktualnego momentu oporowego, czyli oporu jaki napotyka pojazd. Przy prędkości obrotowej mniejszej od znamionowej (I strefa regulacji) punkt pracy silnika elektrycznego na charakterystyce mechanicznej ograniczony jest maksymalnym momentem sil-

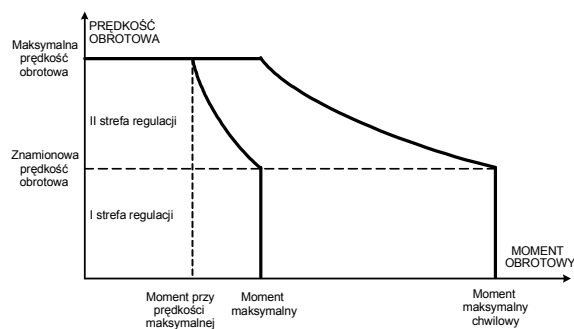
nika - tzw. obszar pracy ze stałym maksymalnym momentem obrotowym.



Rys. 4. Strefy regulacji silnika pojazdu elektrycznego

Przy prędkości obrotowej wyższej od znamionowej (II strefa regulacji) punkt pracy silnika ograniczony jest maksymalną mocą silnika i na charakterystyce mechanicznej ograniczony jest krzywą opisaną wzorem  $M=P/\omega$ , gdzie  $\omega$  to prędkość silnika przy stałej mocy  $P=const$ . Rozpatrując dopuszczalny obszar pracy silnika trzeba uwzględnić to, że może zaistnieć potrzeba nagłego uzyskania chwilowego momentu obrotowego większego od momentu maksymalnego. Silniki elektryczne wychodzą temu naprzeciw, gdyż mogą być na pewien czas przeciążane. Przykładowo silnik indukcyjny klatkowy można przeciążyć do wartości momentu maksymalnego, który jest większy 2 do 3 razy od momentu znamionowego. Znacznie większe przeciążenia można uzyskać stosując silniki wzbudzone magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym (PMKE).

Na rys. 5 przedstawiono zmianę obszaru stref regulacji silnika PMKE przy sterowaniu sinusoidalnym (silnik synchroniczny PMKESM).



Rys. 5. Strefy regulacji przeciążonego silnika synchronicznego pojazdu elektrycznego

Oczywiście przeciążenie silnika może być tylko chwilowe, gdyż w przeciwnym wypadku

uzwojenia mogą ulec przegrzaniu. Przeciążony silnik dostarcza kilkakrotnie większy moment obrotowy aby pokonać przeszkody terenowe np. wjazd na krawężnik, gwałtowne przyśpieszenie, podjazd pod duże wzniesienie. Przeciążenie silnika jest wymagane w całym zakresie prędkości obrotowej. Należy jednak zaznaczyć, że moment maksymalny silnika PMKESM jest determinowany także mocą źródła napięcia i dopuszczalną obciążalnością komutatora energoelektronicznego.

## 8. Problemy związane z projektowaniem sterownika silnika pojazdu elektrycznego

W celu zaprojektowania sterownika silnika elektrycznego pojazdu mechanicznego należy rozwiązać następujące zagadnienia:

- wybranie struktury mechatronicznego układu napędowego i dobranie podzespołów układu dla założonych parametrów pojazdu mechanicznego;
- opracowanie modelu matematycznego układu mechatronicznego pojazdu z jednym i dwoma silnikami elektrycznymi;
- opracowanie efektywnych algorytmów sterowania pracą maszyn elektrycznych według kryterium optymalnego wykorzystania mocy i z odzyskiem energii hamowania;
- badania symulacyjne i porównanie charakterystyk układu napędowego w zależności od systemu sterowania i struktury układu;
- weryfikacja opracowanego modelu matematycznego układu mechatronicznego i systemu sterowania w oparciu o przeprowadzone badania symulacyjne;
- wykonanie analizy ekonomicznej dla samochodów z napędem elektrycznym, uzasadniającej stosowanie tego typu napędów w jeździe miejskiej;

Jednym z kluczowych problemów jest pomiar kąta położenia wirnika silnika elektrycznego. W zależności od zastosowanego silnika należałoby uwzględnić:

- pomiar ciągły, co jest warunkiem koniecznym do sterowania sinusoidalnego;
- pomiar punktowy wykorzystywany przy sterowaniu prądu stałego;

Występuje tutaj problem odpowiedniego zaprojektowania silnika, który powinien być wyposażony w odpowiednie elementy pozwalające na pomiar położenia wirnika. Należałoby uwzględnić enkodery hallotronowe i dodatkowe ceweczki pomiarowe nawinięte w żłobkach

stojana. Enkoder powinien być tani, a warunek taki spełniają tylko ceweczki pomiarowe umieszczone w żłobkach twornika. Ich wadą jest to, że nie dają one informacji o kącie położenia wirnika przy prędkości równej zero. Kolejny problem to odpowiedni dobór akumulatorów i superkondensatorów oraz algorytmów sterowania, co pozwoli na zoptymalizowanie zużycia energii zgromadzonej w akumulatorach. Odpowiednie rozwiązanie tego problemu przyczyni się do zwiększenia zasięgu pojazdu elektrycznego.

W celu uzyskania dużej sprawności pojazdu, układ mechatroniczny powinien być zbudowany na podzespołach o najwyższej sprawności energetycznej. Jeżeli chodzi o silniki to najwyższą sprawność i największy moment obrotowy mają silniki z magnesami trwałymi NdFeB umieszczonymi na wirniku. Dodatkowo cechują się przy tym najmniejszą masą [4].

Odnosnie napięcia zasilania silnika to każdy silnik można uzwoić tak, aby dopasować go do poziomu napięcia zasilania z akumulatorów. Jednak najtańszym rozwiązaniem jest użycie silnika na standardowe napięcie zasilania. Wydaje się, że ze względów bezpieczeństwa nie powinno się stosować napięcia akumulatorów większego od 144V. Dodatkowo zbyt wysokie napięcie podraża układ falownika. Można także wykorzystać standardowy falownik z tranzystorami IGBT do zasilania silnika. Falownik zasilający silnik powinien być czterokwadrantowy, to znaczy, że charakterystyka mechaniczna napędu (prędkość obrotowa w funkcji momentu obciążenia) powinna obejmować cztery ćwiartki układu współrzędnych. Taką pracę falownika musi zapewnić mikroprocesorowy układ sterowania.

Przechodzenie w II strefę regulacji (rys. 4.) komplikuje dodatkowo układ sterowania (ze względu na zwiększony pobór prądu). Rezygnacja z zakresu dużych prędkości obrotowych (II strefy regulacji) upraszcza sterownik, ale powoduje to, że silnik zastosowany w pojeździe będzie dodatkowo przewymiarowany tj. za duży i co za tym idzie za ciężki. Konstruując pojazd wykorzystywany do jazdy typowo miejskiej należy pamiętać, że prędkość jazdy pojazdu miejskiego jest ograniczona przepisami ruchu drogowego do 50km/h. Zakres ten spokojnie powinna pokrywać I strefa regulacji prędkości obrotowej. Tak więc praca napędu w II strefie regulacji byłaby sporadyczna i w bilansie

całkowitego zużycia energii nie powinna odgrywać istotnej roli.

## 9. Literatura

- [1]. Szumanowski A.: *Hybrid electric Vehicle Drives Design*. Institute for Sustainable Technologies, 2006
- [2]. Szumanowski A.: *Teoria samochodu, akumulacja energii w pojazdach*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1984
- [3]. Glinka T., Fice M., Setlak R.: *Hybrydowy napęd pojazdu miejskiego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 75, 2006, wyd. BOBRME Komel, s. 95-100
- [4]. Glinka T.: *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1995
- [5]. <http://www.pg.gda.pl/~jarguz/e-pojazdy.htm>

## Autorzy

Tomasz Rudnicki  
 Politechnika Śląska  
 Instytut Elektroniki  
 e-mail: tomasz.rudnicki@polsl.pl