

DYNAMICZNE PROCESY W NAPĘDZIE SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO W RUCHU MIEJSKIM¹

ZDZISŁAW TRZASKA

prof. dr hab. inż., Wyższa Szkoła
Ekologii i Zarządzania
Wydział Zarządzania i Inżynierii
Produkcji, ul. Wawelska 14,
02-061 Warszawa,
e-mail: zdzislaw.trzaska@
netlandia.pl

Streszczenie. Zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery o 80% do roku 2050 będzie wymagało 95% dekarbonizacji sektora transportu drogowego. Osiągnięcie tego celu możliwe jest poprzez odpowiednie finansowanie strategii zwiększających wykorzystanie elektrycznych pojazdów oraz wdrożenie pilotażowych programów elektromobilności w miastach. Samochód elektryczny umożliwia zróżnicowanie prędkości jazdy i zmiany obciążenia podczas ruchu w mieście i w obszarach pozamiejskich. Rozwój elektrycznych układów napędowych zapewnia osiągnięcie wysokiej efektywności przemiany energii i jej transferu między różnymi rodzajami wtórnych źródeł energii, co jest bardzo istotne ze względu na potrzebę dbałości o minimalizację emisji gazów cieplarnianych i niekorzystnego wpływu transportu miejskiego na środowisko naturalne. W modelu napędu samochodu elektrycznego uwzględniono standardowy przebieg jego prędkości w ruchu miejskim i wprowadzono oddziaływanie układu transmisyjnego na przebieg napięcia indukcyjnego w uzwojeniu silnika magnetoelektrycznego. Rozpatrzone zostały rozwinięte struktury zarówno baterii elektrochemicznej, jak i silnika elektrycznego połączonego za pomocą układu transmisyjnego z zespołem jezdnym. Wyznaczone zostały przebiegi napięć i prądów w układzie oraz mocy na zaciskach baterii zasilającej w energię silnik elektryczny. Ustalono bardzo szybkie zmiany prądu w baterii, których przebieg jest podobny do krótkotrwałych impulsów. Działanie baterii w takich warunkach może prowadzić do bardzo szybkiego jej zużycia a nawet do jej uszkodzeń w krótkim czasie eksploatacji. Poprawa może być uzyskana przez dołączenie superkondensatora na zaciski baterii.

Słowa kluczowe: samochód elektryczny, bateria elektrochemiczna, transport miejski, stany dynamiczne, model obwodowy

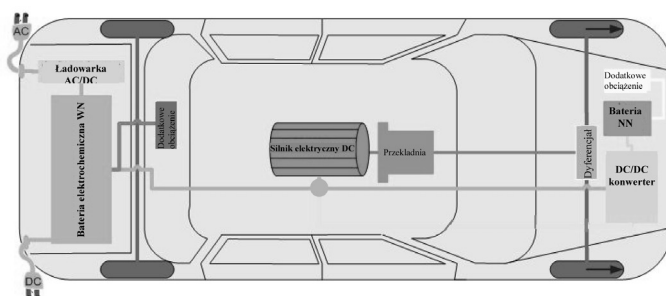
Wprowadzenie

Zgodnie z dyrektywą Unii Europejskiej, promującą intensyfikację działań, których celem jest poprawa sytuacji ekonomicznej oraz wzmocnienie ochrony środowiska naturalnego we wszystkich krajach członkowskich, opracowana została i ogłoszona w listopadzie 2009 roku *Polityka Energetyczna Polski do 2030 r. (PEP'2030)* [1]. W dokumencie tym unormowane są narzędzia wspierające wdrażanie ustaleń Pakietu 3x20, który zakłada, że do 2020 nastąpi redukcja emisji gazów cieplarnianych o 20% przy jednoczesnym wzroście efektywności energetycznej o 20% i z równoczesnym udziałem odnawialnych źródeł energii (OZE) w ogólnej produkcji energii na poziomie 20%. W kolejnym etapie zakłada się zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery o 80% do roku 2050, co będzie wymagało 95% dekarbonizacji sektora transportu drogowego. Istnieje wiele opcji dla osią-

gnięcia takiego poziomu dekarbonizacji, ale może nie być to łatwe zadanie na drodze oczekiwanych ulepszeń w tradycyjnym silniku spalinowym i nawet przez zastosowanie paliw alternatywnych do ich zasilania energetycznego. Z tego powodu w wielu krajach europejskich, regionach i miastach władze lokalne finansują strategie mające na celu zwiększenie wykorzystania elektrycznych pojazdów oraz wdrożenie pilotażowych programów elektromobilności.

Niemniej jednak można stwierdzić, że wymienione powyżej substancje zanieczyszczające mają wpływ lokalny i dlatego stosowanie pojazdów elektrycznych w środowisku miejskim przyczyni się do drastycznego zmniejszenia tych zanieczyszczeń w naturalnym środowisku. Jedną z głównych korzyści z pojazdów elektrycznych to „przesunięcie” szkodliwych zanieczyszczeń powietrza z instalacji komunalnych na obszary wiejskie, gdzie narażenie ludności na negatywny wpływ transportu jest niższe. Poziom hałasu jest również niższy, szczególnie w warunkach jazdy miejskiej [2]. Realny zasięg samochodów elektrycznych wynosi około 200 kilometrów, i to przy założeniu ekonomicznej jazdy w umiarkowanej temperaturze (bez klimatyzacji lub ogrzewania). Odległości pokonywane przez pojazdy elektryczne w dużej mierze zależą od typu baterii elektrochemicznej, jej stanu (nowa lub używana), obciążenia pojazdu i sposobu jazdy [3]. Dlatego wielu producentów samochodów na rynku pojazdów elektrycznych oferuje je jako „pojazdy codziennego użytku”, nadające się do pokonywania tras po mieście oraz do innych krótkich przejazdów. Reprezentatywny schemat energetyczny samochodu elektrycznego jest przedstawiony na rysunku 1

Systemy transportu stają się obecnie podstawą integracji żywotnych sfer działalności w miastach i całych regionach, a dogłębne rozpoznanie elementów systemu transportu jest istotne dla analizy, planowania, projektowania



Rys. 1. Reprezentatywna struktura elementów energetycznych w samochodach elektrycznych

¹ © Transport Miejski i Regionalny, 2013.

i operacyjnego funkcjonowania miasta oraz regionu. Sektor transportu jest odpowiedzialny za 21% emisji gazów cieplarnianych w całej Unii Europejskiej. Średnia emisja CO₂ na poziomie 130g/km dla wszystkich samochodów, z kompletem pasażerów, w Unii Europejskiej ma zostać osiągnięta w roku 2015. Kolejne kroki to 95g/km jako cel dla 2020 roku oraz 80g/km jest planowane na rok 2030. Można to osiągnąć tylko poprzez wprowadzenie nowych technologii, głównie przez wdrożenie do praktyki ogólnych systemów opartych na pojazdach z napędem elektrycznym [4], [5].

Aktualnie produkcja i eksploatacja pojazdów elektrycznych przy wykorzystaniu zintegrowanych a efektywnych źródeł energii jawi się jako istotny czynnik w zapewnieniu realizacji gospodarki niskoemisyjnej. Stąd też wspieranie rozwoju zaawansowanych pojazdów z elektrycznym napędem postrzegane jest jako siła sprawcza przebudowy bilansu paliwowo-energetycznego i bilansu emisji CO₂, przede wszystkim w obszarach wysoko zurbanizowanych. Samochód elektryczny stał się już technologią, która na światowym rynku skutecznie przebija się przez bastiony dotąd opanowane przez pojazdy napędzane tradycyjnymi silnikami spalinowymi [6], [7], [8].

Globalny projekt zamiany spalinowego silnika do napędu samochodu na silnik elektryczny można w dużym uproszczeniu porównać ze zrealizowanym w przeszłości projektem elektryfikacji kolei, kiedy to nastąpiła zamiana parowozu na elektrowóz. Jednakże znaczenie energetyczne wdrożenia samochodu elektrycznego do transportu drogowego jest znacznie donioślejsze niż elektryfikacja kolei. Może się wydawać, że tempo tego wdrożenia budzi jeszcze wiele wątpliwości, ale wkrótce może ono zaskoczyć świat, gdyż według prognozy Instytutu Rolanda Bergera już w 2015 roku samochody elektryczne będą mieć 25% udział w rynku samochodów na świecie [9]. Według prognoz japońskich, udział samochodów elektrycznych w całym rynku samochodowym wyniesie 20% w 2020 roku, a będzie to już 40% w roku 2030. Decydującym czynnikiem jawi się tu fakt, że w przypadku ładowania baterii elektrochemicznych samochodów elektrycznych z wykorzystaniem energii elektrycznej wytwarzanej w procesach kogeneracyjnych przy użyciu wysokosprawnych turbin gazowych ujawnia się wiele niewątpliwych zalet samochodów elektrycznych. Wynika to między innymi z tego, że odniesione do przebiegu 100 kilometrów zużycie zakumulowanej w gazie ziemnym energii pierwotnej przez samochód elektryczny stanowi tylko połowę zużycia energii pierwotnej (zakumulowanej w benzynie) przez samochód spalinowy. Ponadto emisja CO₂ w takim przypadku jest 2,5 razy mniejsza. Efektywność energetyczna, od wydobycia surowca energetycznego po wykorzystanie energii przez pojazd w czasie jazdy (ang. Well-to-Wheel), nie przekracza dla pojazdów z silnikami spalinowymi 30%, podczas gdy w przypadku silnika elektrycznego już w najbliższej przyszłości można się spodziewać 60%. Oszczędza się energię także dzięki temu, że silnik samochodu elektrycznego nie pracuje, gdy samochód stoi, a także dlatego, że odzyskuje się energię podczas hamowania i kumuluje ją w akumulatorze. Daje to szczegól-

nie duże dodatkowe efekty przy poruszaniu się w mieście, kiedy bardzo często się hamuje na światłach lub w korkach. To oznacza znacznie tańszą eksploatację. W tej chwili przejechanie 100 kilometrów samochodem elektrycznym kosztuje kilka euro, a koszt ten może być jeszcze mniejszy dzięki możliwości ładowania akumulatorów wtedy, kiedy energia elektryczna jest najtańsza, np. w nocy [7], [10], [11].

Obecnie można już uznać, że tendencja do elektryfikacji transportu drogowego jest na etapie znacznej intensyfikacji i jest to proces nieodwracalny, a zorientowany szczególnie na ruch w miastach. Uzasadnieniem takiego stwierdzenia jest to, że każda duża firma motoryzacyjna posiada lub opracowuje obecnie modele elektryczne i że znaczna liczba krajów ustaliła doniosłe plany przyspieszenia rozwoju i wdrożenia pojazdów elektrycznych. Na obecnym etapie rozwoju technicznego zastosowanie samochodów elektrycznych jest przewidywane przede wszystkim do transportu drogowego na obszarach silnie zurbanizowanych [9].

Właściwości eksploatacyjne samochodu elektrycznego

Można przyjąć z pełną odpowiedzialnością, że głównym powodem wprowadzenia pojazdów elektrycznych na rynek pojazdów samochodowych jest możliwość zmniejszenia emisji zanieczyszczeń w środowisku miejskim oraz znaczne ograniczenie hałasu. Ponadto samochody elektryczne zapewniają:

- duży komfort jazdy i użytkowania pojazdu, a ważna jest też świadomość posiadania pojazdu przyjaznego środowisku;
- działanie silnika elektrycznego z wysoką sprawnością, a ich konstrukcja jest znacznie prostsza w porównaniu do tradycyjnych silników spalinowych;
- wysoki moment obrotowy w pełnym zakresie obrotów silnika, dzięki czemu samochód elektryczny przyspiesza z taką samą mocą, niezależnie od obrotów;
- wyeliminowanie niemal całkowite hałasu emitowanego przez pojazd (jednostki elektryczne są niemal bezgłośnie w porównaniu do silników spalinowych); to kolejna cecha ważna ze względu na przyjazność dla środowiska oraz komfort użytkowania;
- bezpieczeństwo ekonomiczne: zmiany cen energii elektrycznej są zdecydowanie bardziej przewidywalne od zmian cen ropy naftowej i znacznie mniej uzależnione od wydarzeń na arenie międzynarodowej (ten argument jest mniej ważny dla pojedynczego użytkownika, ale na pewno trafi do właściciela floty samochodów, korporacji taksówek itd.);
- dodatkowe przywileje dla użytkowników, np. darmowe ładowanie akumulatorów w Warszawie (dzięki współpracy z RWE w połowie 2011 roku działało już 10 darmowych punktów ładowania pojazdów elektrycznych).

Silnik elektryczny jest prostszy w konstrukcji i w związku z tym tańszy od spalinowego, bo na przykład nie wymaga systemu chłodzenia. Sama jego konstrukcja jest również znacznie mniej skomplikowana niż jednostki spalinowej. Nie ma w nim systemu dolotowego powietrza ani wydechowego

spalin, czy też zaworów, wałków rozrządu, a mniejsze jednostki nie wymagają nawet stosowania przekładni wielostopniowych. W silniku elektrycznym realizowany jest jedynie ruch obrotowy wału, natomiast w jednostce spalinowej ruch posuwisto-zwrotny tłoków jest zamieniany poprzez korbówkę na ruch obrotowy. Wszystkie te czynniki wpływają na znacznie mniejszą awaryjność i znacznie dłuższą żywotność silników elektrycznych. Ponadto nie wymaga on częstej obsługi. Dla swojego i-MiEV Mitsubishi zakłada przegląd po przebiegu 20 tysięcy kilometrów. Jedyne trzy elementy, które wymagają okresowej wymiany to: filtr przeciwpyłowy (wymieniany co 20 tysięcy kilometrów), płyn hamulcowy (co 40 tysięcy kilometrów) i olej w przekładni (co 100 tysięcy kilometrów).

Istotną właściwością samochodu elektrycznego jest to, że może on bez trudu przyspieszać do „setki” zaledwie w 4 sekundy i rozpędzać się do blisko 500 km/godz., ale utrzymanie dużej prędkości zależy jednak od pojemności zasobników energii elektrycznej, gdyż samochód rozwijający prędkość przeszło 200 km/godz. napotyka na dramatycznie rosnący opór powietrza, a co za tym idzie – znacznie zwiększa się zużycie energii napędowej (prądu w baterii elektrochemicznej). Wymusza to konieczność częstego zatrzymywania samochodu, żeby wymienić nowoczesne akumulatory litowo-jonowe. Mimo tego ocenia się obecnie, że wkrótce samochody elektryczne będą konkurować z najszybszymi samochodami o napędzie spalinowym. Przewiduje się, że niedługo na torach wyścigów samochodowych pojawią bezemisyjne i prawie bezgłośne pojazdy z napędem elektrycznym, które w mgnieniu oka będą rozpędzać się do ponad 300 km/godz. A przy tym będą one wymagały mniejszej obsługi niż skomplikowane samochody spalinowe [12], [13].

Zróznicowanie prędkości jazdy samochodu elektrycznego i zmiany obciążenia podczas eksperymentów w mieście i w obszarach pozamiejskich przedstawione są na rysunku 2. Te oraz inne właściwości, jak np. zwiększone pojemności zarówno baterii elektrochemicznych, jak i superkondensatorów powodują, że rynek samochodów elektrycznych na świecie dynamicznie rośnie. Z analiz wynika, że w najbliższych latach będzie niemal 6,5 miliona pojazdów o napędzie hybrydowym i elektrycznym. W ocenie tej zasadnicze znaczenie przywiązuje się do łącznej liczby samo-

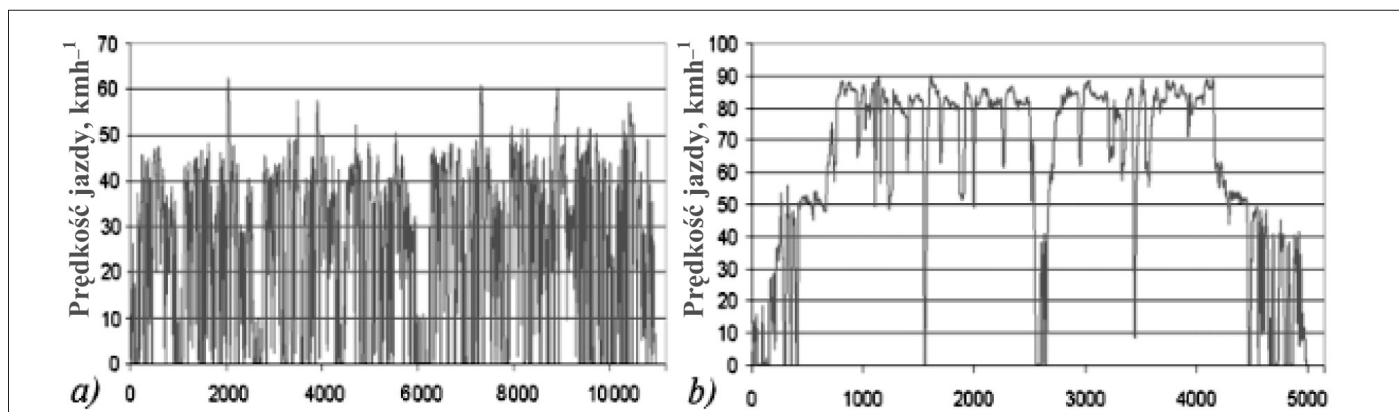
chodów oraz autobusów. Ma to związek z faktem, że rozwój rynku samochodów elektrycznych w największym stopniu wpłynie w kolejnych latach na gospodarkę energetyczną, zarówno dużych aglomeracji miejskich, jak i całego kraju. Będzie to wywierało znaczący wpływ przede wszystkim na całą strukturę bilansu paliwowo-energetycznego, bo rozwój rynku samochodów elektrycznych pociągnie za sobą zmiany we wszystkich segmentach energetycznych, w szczególności pobudzi rozwój energetyki odnawialnej oraz infrastruktury Smart Grid.

Jedną z głównych korzyści płynących z upowszechnienia pojazdów elektrycznych jest „przesunięcie” szkodliwych zanieczyszczeń powietrza z arterii komunalnych do obszarów wiejskich, gdzie narażenie ludności na uszczerbek zdrowia jest niższe. Dodatkowo, szczególnie w warunkach jazdy miejskiej, poziom hałasu generowanego przez pojazdy elektryczne jest tak niski, że często stwarza niebezpieczeństwo dla pieszych na ulicach.

Silniki elektryczne można łatwo wysterować do 15 tysięcy obrotów na minutę, podczas gdy typowe spalinowe silniki z trudem osiągają 8 tysięcy obrotów na minutę. Ponadto w układzie napędowym pojazdu elektrycznego, pomiędzy silnikiem elektrycznym a kołami, nie potrzeba tylu elementów pośrednich, ile musi ich być w tradycyjnym samochodzie z silnikiem spalinowym. To dlatego pojazdy z napędem elektrycznym są dużo bardziej efektywne energetycznie – zamieniają w ruch aż 90 procent energii zgromadzonej w akumulatorach; podczas gdy samochody spalinowe wykorzystują ledwie 35 procent energii zawartej w benzynie czy też w oleju napędowym.

Obwodowy model układu napędowego samochodu elektrycznego

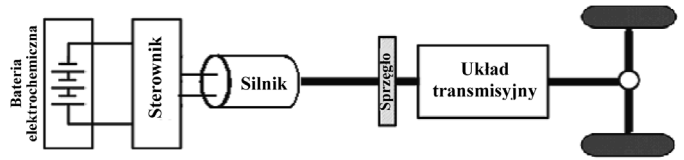
Metody modelowania i symulacji komputerowej są istotnymi elementami w zakresie projektowania i eksploatacji systemów transportowych. Kilka przyczyn uzasadnia badania symulacyjne, a mianowicie: koszty budowy samochodu mogą być zminimalizowane w oparciu o wyniki wcześniejszych symulacji, analizy jego działania mogą być wykonywane z minimalnym ryzykiem, dynamiczna analiza może być wykonana bez potrzeby budowy prototypu, analizy symulacyjne mogą być wykonane w fazie projektowania systemu za ułamek kosztu budowy.



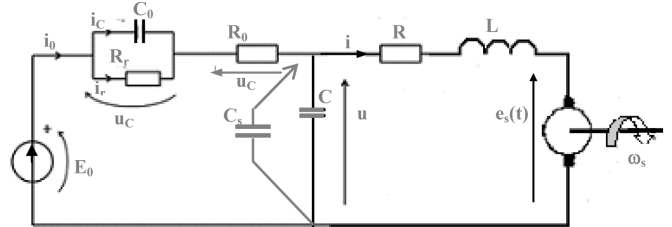
Rys. 2. Zmiany w czasie prędkości samochodów elektrycznych w warunkach miejskich: a) w centrum, b) na przedmieściu

Osiągnięcie wysokiej efektywności przemiany energii i jej transferu między różnymi rodzajami wtórnych źródeł energii jest bardzo istotne dla rozwoju elektrycznych układów napędowych. Ważne parametry eksploatacyjne, takie jak maksymalny zasięg pojazdu, zdolność pokonywania wzniesień, możliwość przyspieszenia, mają decydujący wpływ na wybór odpowiedniego rodzaju źródła energii w pojeździe elektrycznym. Warunki eksploatacji w znaczący sposób wpływają na efektywność konwencjonalnych źródeł energii, jakimi są baterie elektrochemiczne. W przypadku klasycznych akumulatorów (ołowiowo-kwasowych) liczba cykli pełnego ładowania/rozładowania baterii zmniejsza czas ich zdolności do energetycznego zasilania samochodu. Wpływ ten jest różny w poszczególnych przypadkach (w przypadku konwencjonalnych akumulatorów ołowiowych wpływ ten jest bardzo istotny, w przypadku zaawansowanych baterii litowo-jonowych może mieć mniejszą wagę).

Opracowanie i wytworzenie baterii litowo-jonowych, stanowiących obecnie podstawowy rodzaj akumulatorów energii używanych w pojazdach elektrycznych wpłynęło znacznie na postęp w technologii samochodów z napędem elektrycznym. Zasadnicza uwaga została zwrócona na to, że bateria powinna dostarczać wystarczającej ilości energii, która zapewni określony zasięg jazdy oraz umożliwi zarówno odpowiednie przyspieszanie, jak i hamowanie pojazdem. Uzyskanie oceny takich możliwości danej baterii możliwe jest w wyniku badań modelowych całego układu napędowego samochodu elektrycznego. Schemat układu napędowego samochodu elektrycznego jest przedstawiony na rysunku 3. Rozwój badań zrealizowanych w odniesieniu do samochodów elektrycznych wypromował kilka podstawowych struktur napędów samochodów elektrycznych, takie jak: od jednej do czterech maszyn elektrycznych, maszyny DC lub AC, ze sprzęgłami lub bez nich, niskonapięciowe lub wysokonapięciowe baterie elektrochemiczne, ładowanie jednofazowe lub trójfazowe itd. Analizując zużycie energii w samochodzie elektrycznym, ujawniają się jej odbiorniki, które nie biorą udziału w przemianach energetycznych w łańcuchu od sieci zasilającej aż do kół samochodu. Takimi elementami są: instalacja oświetleniowa, klimatyzacja, układy związane z bezpieczeństwem jazdy itp. Są to elementy dalszego planu z punktu widzenia procesów energetycznych w układzie napędowym i dlatego nie zostały uwzględnione w schemacie przedstawionym na rysunku 3. Ponieważ zasadniczym celem zrealizowanych badań nie była symulacja z uwzględnieniem wszystkich najdrobniejszych detali, ale globalne zachowanie się układu napędowego samochodu elektrycznego, to przyjęty został jego model o postaci przedstawionej na rysunku 4, który dla przedmiotowych badań jest wystarczająco dokładny. Został opracowany w celu przeprowadzenia badania skutków mobilności elektrycznej w obszarach miejskich. Model w postaci obwodu elektrycznego pozwala przewidywać stan dynamiczny układu takich elementów, jakimi są akumulator energii (jego stan naładowania i rozładowania), opór wewnętrzny, cykl przydatności i efektywność energetyczna, zarówno w czasie krótkim, jak i po dłuższym okresie eksploatacji samochodu.



Rys. 3. Schemat układu napędowego samochodu elektrycznego



Rys. 4. Model obwodowy układu napędowego samochodu elektrycznego

Przyjęte zostały następujące oznaczenia: $E_0 = const$ – napięcie baterii w stanie jałowym, $i = i(t)$ – prąd w uzwojeniu silnika, $u = u(t)$ – napięcie na zaciskach silnika, $u_c = u_c(t)$ – napięcie na R_r, C_0 gałęzi, $e_s = e_s(t)$ – napięcie indukowane w tworniku, $\omega_s = \omega_s(t)$ – prędkość kątowa wirnika. Przyjęte zostały parametry elementów pasywnych: R_r oraz C_0 – rezystancja oraz pojemność warstwy podwójnej baterii, R_0 – rezystancja wewnętrzna baterii odzwierciedlająca wewnętrzne straty energii (nagrzewanie się baterii), C , R oraz L – pojemność, rezystancja oraz indukcyjność uzwojenia twornika, k_e – stała elektromagnetyczna silnika, C_s – pojemność superkondensatora. Model został sprawdzony za pomocą testu według 20-minutowego nowego europejskiego cyklu jazdy, który wykazał kilkukrotne zmniejszenie się napięcia baterii elektrochemicznej w stosunku do napięcia w stanie jałowym.

Stosując prawa Kirchhoffa i relacje napięciowo-prądowe dla poszczególnych elementów, wyznaczamy równania opisujące stan dynamiczny badanego układu, które w związanym zapisie macierzowym przyjmują postać

$$\begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_c \\ i \\ u \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_r} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -R & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & -R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ i \\ u \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -k_e \omega_s \\ 0 \\ E_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie pojemność C przyjmuje małe wartości.

Przyjmując oznaczenia

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} u_c \\ i \\ u \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_r} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -R & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & -R_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -k_e \omega_s \\ 0 \\ E_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

dla odpowiednich macierzy i wektorów występujących w równaniu (1), możemy go przedstawić w związanej postaci zapisu, a mianowicie

$$\mathbf{M} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

W przypadku włączenia superkondensatora należy zastąpić pojemność C przez $C+C_s$. Ponieważ macierz \mathbf{M} , zwana macierzą mas, jest singularna ($\det \mathbf{M} \equiv 0$), to równanie (3) ma szczególną postać singularnego macierzowego równania różniczkowego zwanego równaniem różniczkowo-algebraicznym (RRA) lub równaniem semi-stanu, w którym $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ oznacza tzw. semi-wektor stanu. Składowe semi-wektora stanu, odzwierciedlają wszystkie ważne właściwości układu napędowego w czasie t , a zmieniają się pod wpływem pewnych zmiennych środowiskowych. Rozwiązanie równania (3) może być wyznaczone przez zastosowanie odpowiedniej metody z dziedziny RRA [14].

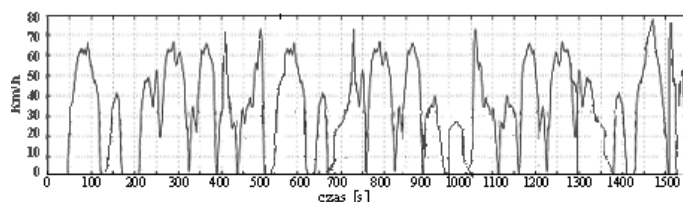
Przebiegi prądów i napięć w układzie napędowym

Rozwiązując równanie (3), określamy przebiegi prądów i napięć w badanym układzie. Ze względu na singularność układu równań (3) wyznaczanie ich rozwiązania opiera się w zasadniczej mierze na symulacji komputerowej z wykorzystaniem odpowiednich procedur numerycznych [15], [16]. Efektywność tego rodzaju podejścia uzależniona jest od możliwości ustalenia tzw. spójnych (zgodnych, ang. *consistent*) warunków początkowych, gdyż równanie algebraiczne (ostatnie równanie w «1») ustala zależność wartości początkowej szybkiej składowej i_0 wektora \mathbf{x} od wartości początkowych jego powolnych składowych u_i , i oraz u , a także zastosowanych wymuszeń (sterowań). Z postaci równania (3) wynika, że indeks tego RRA równa się 1, a rozwiązanie może być wyznaczone przy zastosowaniu procedury *ode15s* z pakietu programów Matlab w oparciu o postać „Mass” równania semi-stanu. Matlab jest idealnym środowiskiem dla tego rodzaju badań, nie tylko ze względu na jego wysoki poziom generowania rozwiązań numerycznych, ale i bogate możliwości obiektów graficznych. Programy zostały sformułowane tak zwięźle, jak to było możliwe, i są tak zaprojektowane, aby szybko działały [17].

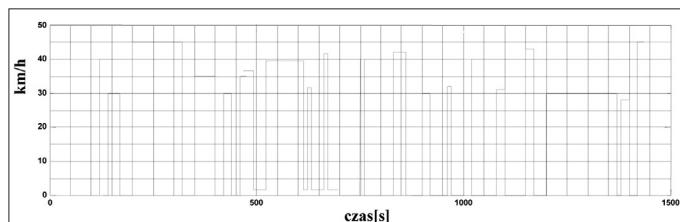
Odnosząc badania dynamiki układu napędowego samochodu elektrycznego do jego eksploatacji w obszarach silnie zurbanizowanych, istotnego znaczenia nabiera oddziaływanie środowiska, w którym samochód się porusza. Reprezentatywny przebieg prędkości samochodu elektrycznego w warunkach miejskich jest przedstawiony na rysunku 5. Odpowiada on typowemu testowi FTP-75 i obejmuje większość zdarzających się warunków ruchu samochodów osobowych w aglomeracjach zurbanizowanych. Różne sytuacje drogowe zostały rozważone według średniego ruchu w obszarach miejskich.

Symulacje komputerowe odniesione zostały do modelu przedstawionego na rysunku 4 w dwóch przypadkach zasilanie silnika: 1) tylko z baterii elektrochemicznej, 2) zarówno z baterii elektrochemicznej, jak i włączonego na jej zaciśki superkondensatora.

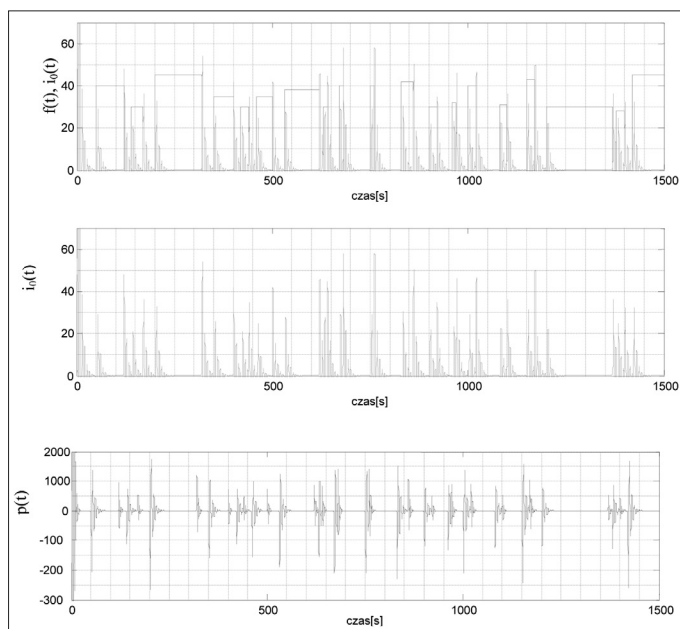
Baterie elektrochemiczne, które nadają się do stosowania w samochodach elektrycznych, są to kwasowo-olowiowe akumulatory, baterie niklowo-wodorkowe, akumulatory litowo-jonowe itp. Baterie elektrochemiczne charakteryzują się zwykle wysoką gęstością energii, ale mniejszą gęstością mocy w porównaniu do superkondensatorów. Superkondensatory mają bardzo dużą gęstość mocy, ale gromadzą bardzo mało energii. Hybrydowe magazynowa-



Rys. 5. Przebieg prędkości samochodu podczas ruchu w mieście odpowiadający testowi FTP-75



Rys. 6. Aproksymacja prostokątna przebiegu prędkości samochodu

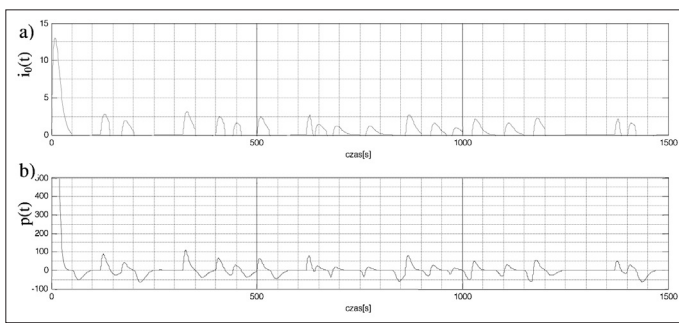


Rys. 7. Przebiegi prędkości samochodu i prądu w baterii: a) prędkość i prąd, b) prąd, c) moc baterii

nie energii, które łączy w sobie baterię elektrochemiczną oraz pakiet superkondensatorów zapewniają zarówno moc, jak i energię potrzebną samochodowi elektrycznemu. Do badań wybrano akumulator litowo-jonowy, jako ten, który obecnie jest najczęściej stosowany w samochodach elektrycznych.

Szczegółowe badania odniesione zostały do samochodu elektrycznego produkowanego przez General Motors z silnikiem 1996/98. Model ten został wybrany, ponieważ był szeroko stosowany w poprzednich badaniach. W zrealizowanych symulacjach komputerowych przyjęte zostały następujące parametry: $E_0=250\text{V}$; $R=0,1\Omega$; $L=0,5\text{H}$; $k_e=5,0$; $R_0=0,1\Omega$; $R_r=10000\Omega$; $C_0=1,5\text{F}$; $C=0,5\text{F}$; $C_s=150\text{F}$. Wprowadzenie tych wartości do modelu symulacyjnego układu napędowego samochodu elektrycznego pozwala obliczać zmiany w czasie takich wielkości jak prąd, napięcia, moc oraz temperatura zarówno dla baterii, jak i dla silnika (rys. 7). Zastosowanie opisanego modelu daje użytkownikowi sposób

na szybką i łatwą symulację podsystemu, który tworzą bateria z superkondensatorem w środowisku pojazdu. Należy zauważyć, że uruchomienie pojazdu z postoju związane jest ze znacznym prądem wytwarzanym w baterii, co wymaga dużych ilości energii i stosowania baterii o dużej pojemności. Wyniki uzyskane z symulacji pozwalają użytkownikowi obserwować korzyści wynikające z zastosowania superkondensatora w gospodarce energetycznej pojazdu, jak również ocenić korzyści dla samej baterii, a tym samym stanu jej naładowania, bardziej nawet czasu jej żywotności oraz ograniczanie szczytowych wartości prądu baterii, które mogą być zaakceptowane (rys. 8). To także pozwala na walidację układu napędowego, czy działa on dostatecznie skutecznie, jeśli rozmiary baterii zostały zmniejszone. Wreszcie użytkownik może zoptymalizować strategię kontroli podsystemu bateria/superkondensator (innymi słowy, jak zapotrzebowanie na moc będzie podzielone) bez konieczności wnikania w zawiłości projektowania elektroniki mocy, stanowiącej wrażliwy system sterowania. Dodatkowo cały układ napędowy może zostać zoptymalizowany, zanim zostanie on fizycznie wykonany, a koszt systemu i ewentualne oszczędności mogą być łatwo obliczone na wczesnym etapie projektowania.



Rys. 8. Przebiegi prądu i mocy baterii po włączeniu superkondensatora: a) prąd, b) moc

Podsumowanie

Wobec coraz bardziej rygorystycznych ograniczeń dotyczących zasobów energii i nasilających się wymagań w zakresie ochrony środowiska naturalnego samochodu elektryczne przyciągają coraz większą uwagę zarówno przemysłu motoryzacyjnego, jak i użytkowników oraz władz samorządowych. Choć dzisiaj ich udział w rynku jest wciąż nieznaczny, można przewidywać, że samochody elektryczne będą stopniowo zyskiwać popularność na rynku ze względu na doskonałą oszczędność energii i dobre właściwości w odniesieniu do środowiska naturalnego. Modelowanie i symulacja odgrywają ważną rolę w projektowaniu samochodu elektrycznego i jego upowszechnianiu.

Różnorodność czynników decydujących o właściwościach pojazdów elektrycznych oraz istniejące powiązania między nimi sprawiają, że obecne przewidywania, co do ich rynku, są bardzo trudne i niemożliwe jest zdefiniowanie jednego scenariusza o ich penetracji transportu drogowego w aglomeracjach miejskich. Z tego względu prowadzone są intensywne prace nie tylko nad technikami magazynowania energii, ale również nad lepszą infrastrukturą dla pojazdów elektrycznych. W praktyce oznacza to dążenie do

stworzenia sieci masowego ładowania baterii elektrochemicznych bądź stacji ich ekspresowej wymiany.

Zastosowanie przedstawionego modelu napędu samochodu elektrycznego umożliwi konstruktorowi szybką i łatwą symulację podsystemu, który w środowisku pojazdu tworzą bateria z superkondensatorem. To pozwala użytkownikowi obserwować korzyści wynikające z zastosowania superkondensatora w gospodarce energetycznej pojazdu, jak również ocenić korzyści dla samej baterii, a tym samym stanu jej naładowania, przewidywać jej żywotność oraz możliwości zmniejszanie szczytowych wartości prądu baterii, które mogą być zaakceptowane. Upowszechnienie się samochodów elektrycznych zarówno w miastach, jak i poza nimi będzie wymagać wytwarzania ogromnych ilości miedzi oraz aluminium, co wpłynie na rozwój technologii materiałów.

Literatura

1. *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*, Ministerstwo Gospodarki, Dokument przyjęty przez Radę Ministrów w dniu 10 listopada 2009 roku.
2. Blau S.K., *Noisy electric vehicles-but not too noisy*, „Physics Today”, 2013, nr 8.
3. Burke A.F., *Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, „Proceedings of the IEEE”, 2007, nr 4.
4. Chłopek Z., *Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście*, „Eksploatacja i Niezawodność”, 2013, nr 1.
5. Mapelli F.L., Tarsitano D., Stefano A., *Plug-in hybrid electrical commercial vehicle: Modeling and prototype realization*, IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012, Greenville 2012.
6. Cheli F., Mapelli F.L., Manigrasso R., Tarsitano D., *Full energetic model of a plug-in hybrid electrical vehicle*, SPEEDAM 2008 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia 2008.
7. Matthew-Wilson C., *A critique of the economic and environmental value of electric cars*, Londyn, The Dog & Lemon Guide, 2010.
8. Trzaska Z., *Perspective for growth of electricity consumption in metropolitan traffic of electric vehicles — the need for developments of charging stations*, Proceedings of the Conference on Equilibred Development of Cities, Warsaw-Paprotnia 2011.
9. Kneeshaw S., *Electric Vehicles in Urban Europe*, Baseline Report, <http://urbact.eu/en/projects/low-carbon-urban-environments/evue/homepage/>
10. Juda Z., *Advanced batteries and supercapacitors for electric vehicle propulsion systems with kinetic energy recovery*, „Journal of KONES Powertrain and Transport”, 2011, nr 4.
11. Yang S., Deng C., Tang T., Qian Y., *Electric vehicle's energy consumption of car-following models*, „Nonlinear Dynamics”, 2013, nr 1–2.
12. Gao D.W., Mi C., Emadi A., *Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles*, „Proceedings of the IEEE”, 2007, nr 4.
13. Zhu Z.Q., Howe D., *Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, „Proceedings of the IEEE”, 2007, nr 4.
14. Trzaska Z., *Differential Algebraic Models of Dynamical Systems. Properties and Applications*, Oficyna Wydawnicza WSEiZ, Warsaw 2013.
15. Chłopek Z., *The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications*, „Eksploatacja i Niezawodność”, 2009, nr 3.
16. Trzaska Z., *Analiza i projektowanie obwodów elektrycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
17. Higham D.J., Higham N.J., *MATLAB Guide*, Second Edition. SIAM, Cambridge University Press (UK), 2005.