

Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

Mgr inż. Wojciech Cieślik

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Wojciech.Cieslik@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej Szalek

Toyota Motor Poland
Konstruktorska 5, 02-673 Warszawa, Polska
E-mail: Andrzej.Szalek@toyota.pl

Eksplatacja elektrycznych układów napędowych pojazdów hybrydowych w zróżnicowanych warunkach ruchu

Streszczenie

Pojazdy z napędem hybrydowym dzięki swojej konstrukcji, pozwalają na zwiększenie sprawności układu napędowego. Jednym z takich czynników jest stosowanie zwiększonego napięcia zasilającego silniki elektryczne w stosunku do napięcia zasilającego akumulator wysokonapięciowy. Napięcie akumulatora zostaje zwiększone kilkukrotnie w układzie inwertera (boost) w celu zwiększenia końcowej mocy elektrycznej doprowadzonej do silnika elektrycznego. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania takiego wzmocnienia napięcia w warunkach jazdy miejskiej i pozamiejskiej. W badaniach wykorzystano najnowsze generacje układów napędu hybrydowego równoległego w pojazdach Lexus NX 300h oraz Toyota RAV4 hybrid. Wykazano, że układ wzmocnienia napięcia w warunkach miejskich wykorzystany jest w około 30–40% dystansu (do 20% czasu jazdy). Wzmocnienie napięcia zasilającego maszyny elektryczne obu pojazdów wykorzystane jest w całym zakresie prędkości obrotowej tych maszyn przy dużych wartościach momentu obrotowego. Badania wykazały, że maksymalne wzmocnienie napięcia – około trzykrotne (do wartości 650 V) – występuje w zakresie maksymalnego momentu obrotowego silników elektrycznych i pozwala na ponad 2-krotne zwiększenie generowanego momentu obrotowego układu napędowego.

Słowa kluczowe: silnik elektryczny, generator prądu, napęd hybrydowy, wzmocnienie napięcia, przepływ energii, akumulator wysokonapięciowy

1. Wstęp

Różnorodność napędów hybrydowych dostępnych u większości producentów pojazdów osobowych powoduje, że zainteresowanie przepływem energii w takich pojazdach jest bardzo duże. Napędy hybrydowe pojazdów zostały zdominowane przez układy równoległe o niezależnym napędzie przez silnik spalinowy lub elektryczny. Układów równoległych z silnikiem elektrycznym wspomagającym silnik spalinowy – mimo prostszej konstrukcji – jest zdecydowanie mniej. Wynika to z mniejszej uniwersalności takiego rozwiązania napędu hybrydowego w codziennej eksploatacji w ruchu miejskim i pozamiejskim [5].

Badania pojazdów zasilanych paliwami alternatywnymi lub napędami alternatywnymi prowadzi się w odniesieniu do emisji składników szkodliwych [6, 8, 9]. Coraz częściej badania takie dotyczą warunków przepływu energii w układach hybrydowych [12] lub elektrycznych [3]. Teoretyczną i drogową analizę możliwości zwiększenia odzyskiwania energii przez zastosowanie różnych strategii redukcji przełożenia w skrzyni przekładniowej opisano w publikacji [4]. Istnieje obecnie wiele modeli układów napędu hybrydowego [1, 2, 11, 13], jednak badania drogowe takich układów stanowią podstawę weryfikacji badań symulacyjnych.

Obecne rozwiązania napędu hybrydowego, mimo zastosowania w nich akumulatorów o napięciu znamionowym między 200 V a 250 V, pozwala na zasilanie silników elektrycznych napięciem do 650 V. Takie wzmocnienie napięcia wejściowego pozwala na uzyskanie 2,5–3-krotnego wzmocnienia wartości nominalnej. Konwertery napięcia opisano m.in. w pracach [7, 10].

Dotychczasowe badania nie poruszają problematyki zagadnienia dotyczącego wpływu zmian napięcia zasilania silnika elektrycznego na jego warunki eksploatacji. Biorąc to pod uwagę w badaniach własnych, autorzy dokonali podziału wzmocnienia napięcia na kilka przedziałów:

- a) $U < 300 \text{ V}$,
- b) $300 \text{ V} \leq U < 400 \text{ V}$,
- c) $400 \text{ V} \leq U < 500 \text{ V}$,
- d) $500 \text{ V} \leq U < 600 \text{ V}$,
- e) $U \geq 600 \text{ V}$.

2. Motywacja podjęcia tematu

Zróżnicowane rozwiązania pojazdów osobowych z układami napędu hybrydowego powodują, że porównanie ich charakterystyk mechanicznych czy elektrycznych nie jest skuteczne. Wykorzystanie jednakowych układów napędów hybrydowych pozwala na zwiększenie możliwości ich porównywania, tym bardziej gdy zamontowano je w dwóch podobnych pojazdach. Mechaniczne i elektryczne podobieństwa układów napędowych nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie podobieństwa charakterystyk tych pojazdów w warunkach zróżnicowanego ruchu pojazdów. Tak więc motywacją do podjęcia badań była analiza charakterystyk trakcyjnych pojazdów z układami napędu hybrydowego. Dodatkowo, uwzględniając zwiększenie napięcia zasilania dokonano analiz wykorzystania tego przyrostu napięcia i jego wpływu na przepływ energii w układach napędu hybrydowego pojazdów.

3. Metodyka badań

Prace badawcze dotyczyły analizy przepływu energii w pojazdach wyposażonych w jednakowy hybrydowy układ napędowy z uwzględnieniem:

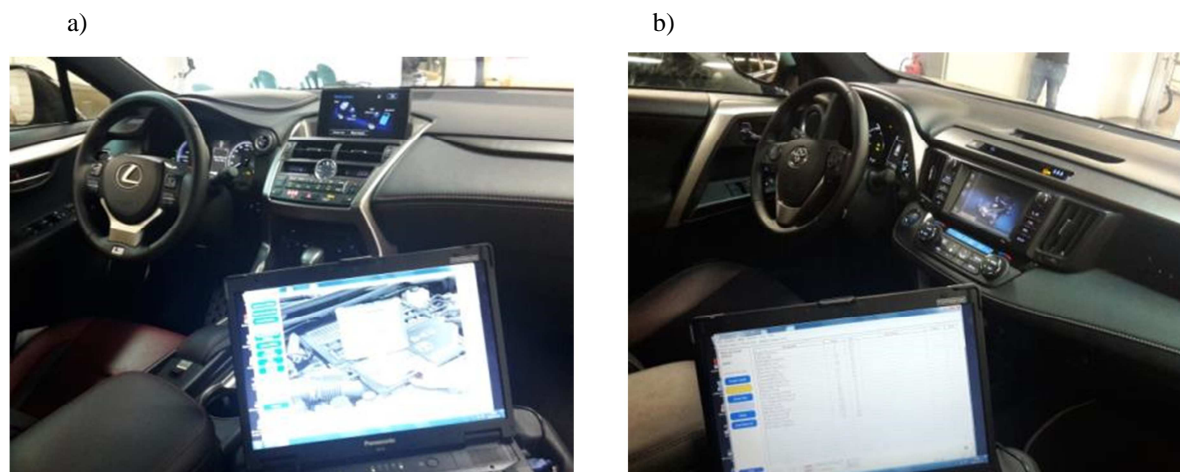
1. Analizy warunków pracy maszyn elektrycznych pojazdów podczas napędu i hamowania regeneracyjnego
2. Określenia warunków wykorzystania zwiększonej wartości napięcia zasilania maszyn elektrycznych
3. Określenia przepływu energii elektrycznej w pojeździe hybrydowym z uwzględnieniem zużycia i odzyskiwania energii w zróżnicowanych warunkach jazdy.

Analizę powyżej przedstawionych celów szczegółowych prowadzono z użyciem pojazdów z równoległym pełnym (*full hybrid*) układem napędu hybrydowego. W pojazdach tych zastosowano również dodatkowy układ napędu tylnej osi z użyciem silnika elektrycznego. Jediną wielkością różniącą obiekty badawcze była masa pojazdów (tab. 1).

Przedstawione powyżej cele badawcze, wymagały wykorzystania oprócz obiektów badawczych w postaci dwóch pojazdów również aparatury pozwalającej na pomiary głównych wielkości elektrycznych układów napędowych. Dokonano akwizycji danych pomiarowych z częstotliwością 16–38 Hz, co pozwoliło na dokładne oszacowanie zmian pracy układów napędowych. Badania prowadzono z użyciem dedykowanego systemu diagnostycznego TechStream do akwizycji danych pomiarowych z pojazdów firmy Toyota i Lexus (rys. 1).

Tablica 1. Dane techniczne badanych pojazdów

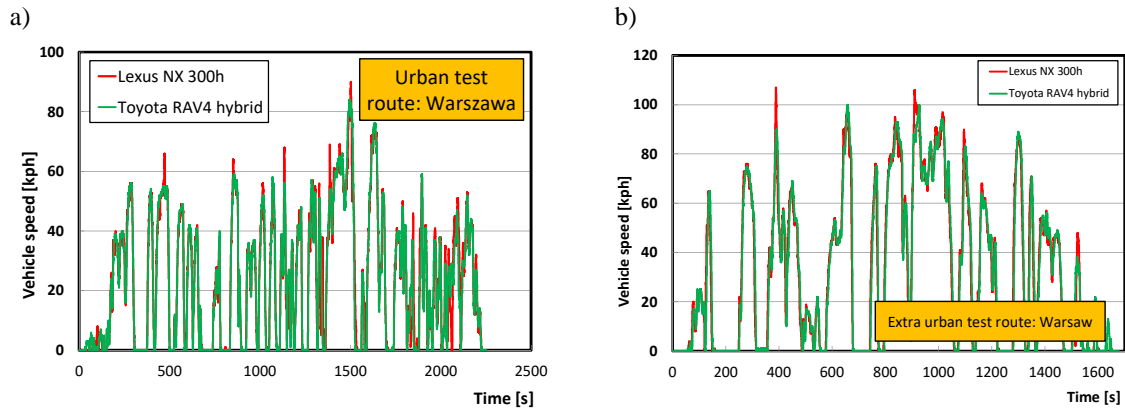
Parametr	Jednostka	Lexus NX 300h	Toyota RAV4 hybrid
Silnik spalinowy			
Pojemność	dm ³	2,494	←
Moment obrotowy	Nm przy obr/min	206 przy 4400–4800	←
Moc	kW przy obr/min	114 przy 5700	←
Układ napędu elektrycznego – przód			
Moment obrotowy	Nm @ obr/min	270 przy 0–1800	←
Moc silnika	kW @ obr/min	105 przy 4500	←
Układ napędu elektrycznego – tył			
Moment obrotowy	Mn	139	←
Moc silnika	kW	50	←
Układ gromadzenia energii			
Akumulator	–	NiMH	←
Pojemność	kW·h	1,59	←
Napięcie akumulatora	V	244,8	←
Max napięcie inwertera	V	650	←
Pojazd			
Masa własna	kg	1860	1735



Rys. 1. Warunki badań pojazdów z użyciem czytnika systemu diagnostyki pokładowej dedykowanego do analiz z pojazdów z układami napędu hybrydowego

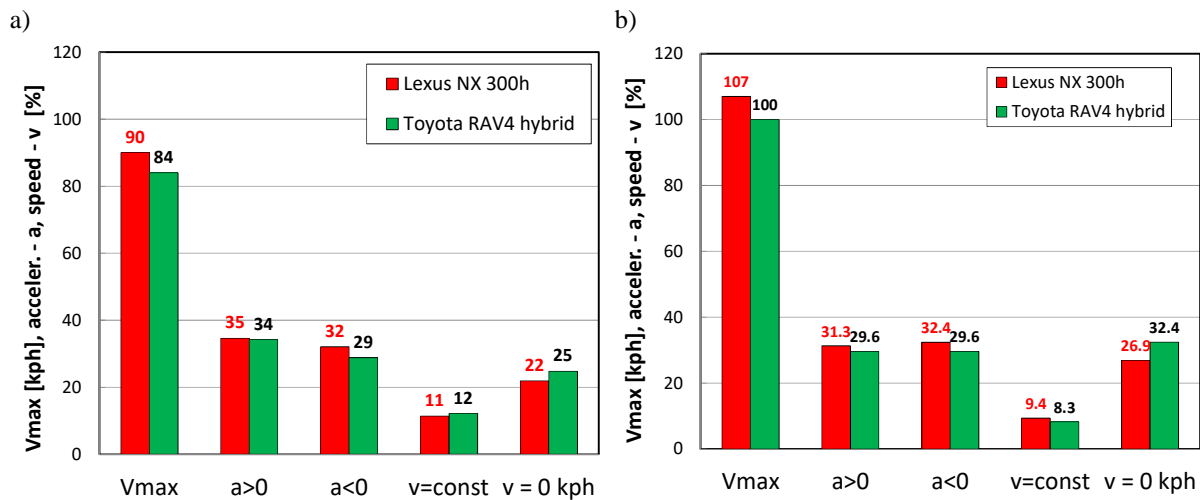
4. Warunki prowadzenia badań

Analiz układów napędowych dokonano wykorzystując przejazdy pojazdów w warunkach miejskich oraz pozamiejskich na terenie Warszawy i jej okolic. Wykorzystując technikę jazdy pojazdów jeden za drugim (tzw. jazdę za liderem) – rys. 2, stwierdzono, że oba przejazdy są do siebie podobne. Długość tras pomiarowych wynosiła: 14,8 km (około 2450 s) w warunkach jazdy miejskiej oraz 14,6 km (około 1770 s) w warunkach jazdy pozamiejskiej. W pierwszej z nich średnia prędkość wyniosła 24 km/h, natomiast w drugiej – 33 km/h.



Rys. 2. Porównanie prędkości badanych pojazdów: a) w warunkach jazdy miejskiej, b) w warunkach jazdy pozamiejskiej

Podobieństwo przejazdów potwierdzono dodatkowo w analizie wartości prędkości maksymalnych oraz udziałów przyspieszenia i jazdy ze stałą prędkością. W ruchu miejskim różnice prędkości maksymalnych wyniosły 7% (rys. 3a). Takie same wartości uzyskano w ruchu pozamiejskim (rys. 3b). Względny czas przyspieszenia wynosił w ruchu miejskim – około 35%, w ruchu pozamiejskim – około 30%. Różnice wynosiły około 5%. Względny czas hamowania wyniósł we wszystkich przejazdach około 30%. Czas jazdy ze stałą prędkością nie jest długi i wynosi około 10% – nieco większy podczas jazdy miejskiej. Względny czas postoju pojazdu wyniósł, w ruchu miejskim – 22–25%, w ruchu pozamiejskim – 27–32%.



Rys. 3. Charakterystyczne wielkości pomiarowe przejazdów: a) w warunkach jazdy miejskiej, b) w warunkach jazdy pozamiejskiej

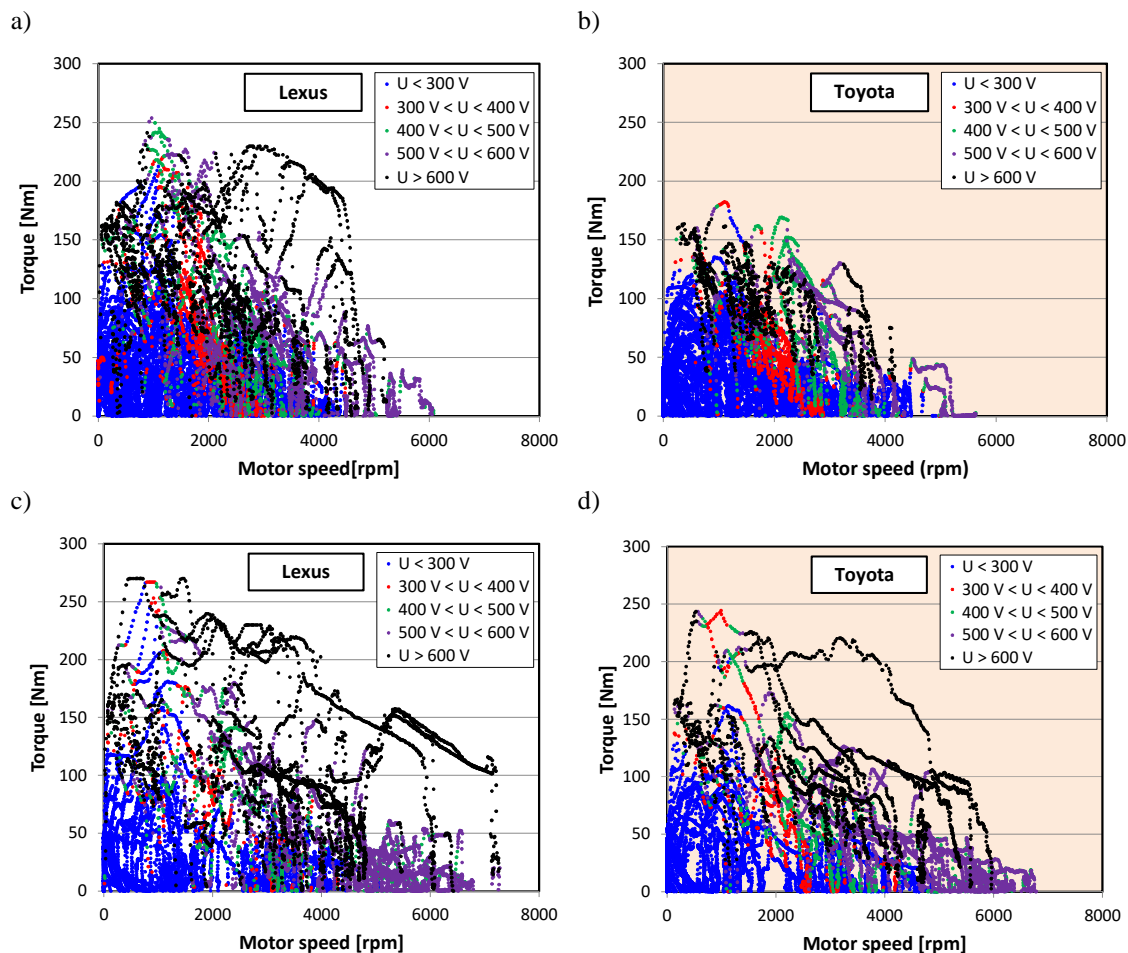
Analiza powyższych wielkości pozwala na stwierdzenie podobieństwa przejazdów. Jest to warunek niezbędny do dalszych analiz związanych z porównaniem warunków pracy dwóch napędów hybrydowych w warunkach jazdy miejskiej oraz pozamiejskiej. Analizę taką przeprowadzono w kolejnym rozdziale.

5. Eksploatacja silników elektrycznych w warunkach zmiennych wartości napięcia

5.1. Porównanie warunków pracy silników elektrycznych podczas napędu pojazdów

Analizę eksploatacji pojazdów z napędem hybrydowym prowadzono głównie w odniesieniu do układów elektrycznych napędu. Analizę pracy silników elektrycznych

proawdzono w aspekcie przedziałów napięcia zasilania silnika. Jak wynika z wcześniej przytoczonych danych, większe wartości napięcia zasilania powinny być użyte przy dużych wartościach momentu obrotowego. Analiza charakterystyki pracy silników elektrycznych badanych pojazdów wskazuje na wykorzystanie dużych wartości napięcia w zakresie dużych wartości momentu obrotowego przy średnim zakresie prędkości obrotowej (rys. 4 napięcie powyżej 600 V). Wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej silnika zwiększa się również wartość napięcia jego zasilania. Należy zwrócić uwagę, że w warunkach jazdy pozamiejskiej (większe prędkości jazdy) wykorzystuje się szersze pole użytkowe większych wartości napięcia zasilania. W warunkach jazdy miejskiej (rys. 4a i 4b) duże zagęszczenie pola pracy dotyczy momentu obrotowego do wartości 150 Nm i prędkości obrotowej do 6000 obr/min. Odnotowano większe wartości maksymalnego momentu obrotowego podczas przejazdu samochodem Lexus niż pojazdem firmy Toyota. Z analizy tej charakterystyki prędkościowej silnika elektrycznego wynika, że przy danej prędkości obrotowej możliwe jest zasilanie silnika różnymi wartościami napięcia. Napięcie to jest tym większe im większa jest wartość wymaganego momentu obrotowego. Zwiększenie napięcia zasilania pozwala na zwiększenie wartości mocy silnika.



Rys. 4. Charakterystyki silników elektrycznych badanych pojazdów: a–b) w warunkach jazdy miejskiej, c–d) w warunkach jazdy pozamiejskiej w odniesieniu do wartości napięcia zasilającego

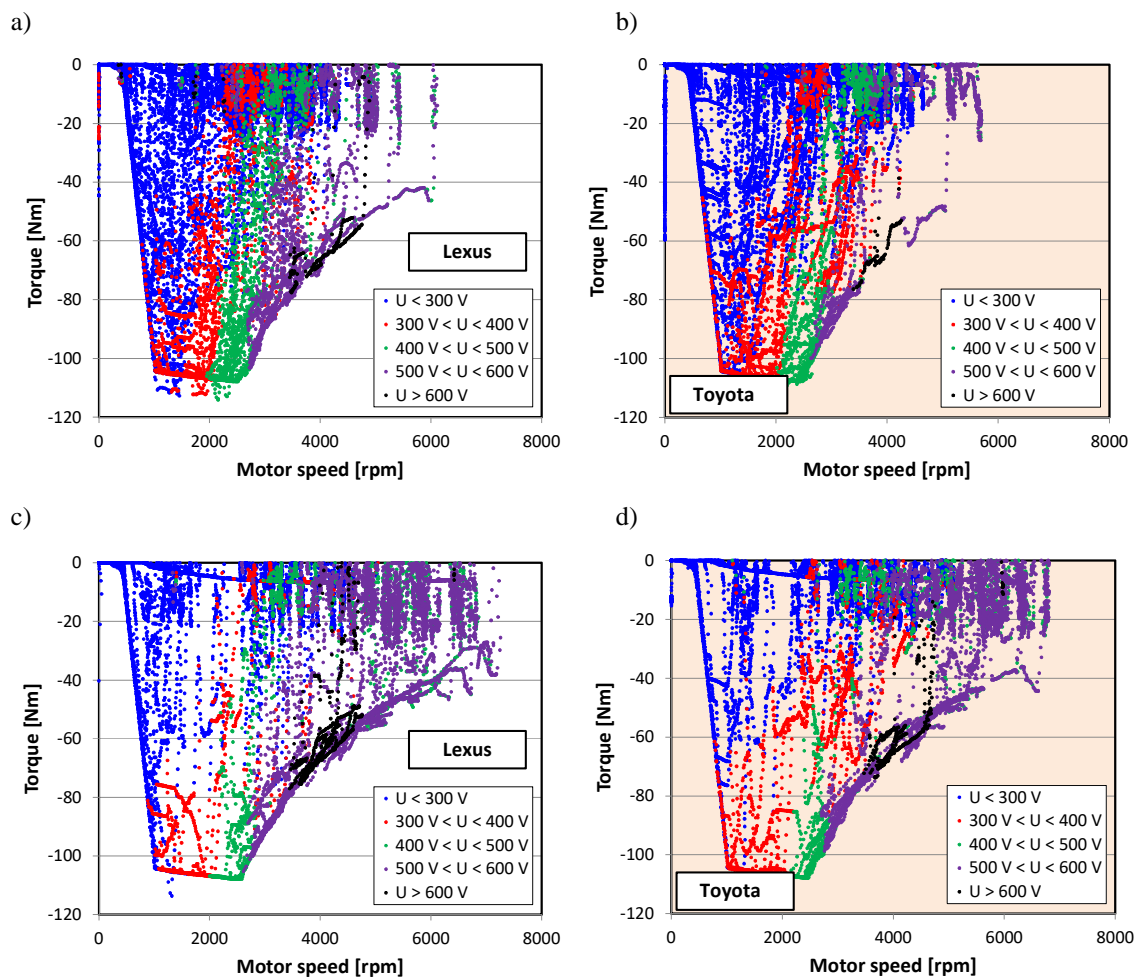
Charakterystyka układu napędowego powoduje, że prędkość jazdy pojazdem jest proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika elektrycznego. Wynika z tego, że wraz ze zwiększeniem prędkości w obszarach pozamiejskich zwiększają się prędkości obrotowe silnika (rys. 4c i 4d). W warunkach jazdy pozamiejskiej różnice w obszarach

wykorzystywanych pól charakterystyk silników elektrycznych uzyskują mniejsze różnice niż podczas jazdy miejskiej. Duże wartości momentu obrotowego w zakresie średnich wartości prędkości silnika elektrycznego powodują, że w tym zakresie prędkości silnika elektrycznego moce uzyskują wartości maksymalne. Te maksymalne wartości mocy są generowane przy dużych wartościach napięcia zasilającego. W innym przypadku, zgodnie z równaniem $Ne = U \times I$, moce byłyby ograniczone (przy tym samym natężeniu prądu mniejsze wartości napięcia zasilania).

5.2. Porównanie warunków pracy silników elektrycznych podczas hamowania regeneracyjnego

Odzyskiwanie energii podczas hamowania pozwala na obserwację typowych warunków zmiany napięcia elektrycznego, które powoduje zmianę energii gromadzonej w akumulatorze wysokonapięciowym.

W poprzednim punkcie wykazano, że maksymalne wartości napięcia zasilania silnika występują przy mocy maksymalnej tych silników. Warunki zmiany napięcia podczas odzyskiwania energii są odmienne (rys. 5). Podczas hamowania zmiana napięcia z generatora prądu ulega zmianie proporcjonalnie do prędkości obrotowej. Duże wartości prędkości obrotowej skutkują największymi wartościami napięcia. Z charakterystyki odzyskiwania energii wynika, że wartości napięcia zależą jedynie od prędkości obrotowej, a nie od



Rys. 5. Charakterystyki maszyn elektrycznych badanych pojazdów podczas hamowania regeneracyjnego: a–b) w warunkach jazdy miejskiej, c–d) w warunkach jazdy pozamiejskiej w odniesieniu do wartości napięcia zasilającego

momentu obrotowego. Taka reguła obowiązuje przy zmianie napięcia od napięcia zasilania akumulatora (około 240 V) do wartości 600 V. Powyżej tej wartości (600–650 V) napięcie jest uzyskiwane jedynie w zakresie mocy maksymalnych generowanych podczas hamowania. Warunki takie dotyczą wszystkich wariantów tras wykorzystanych podczas badań.

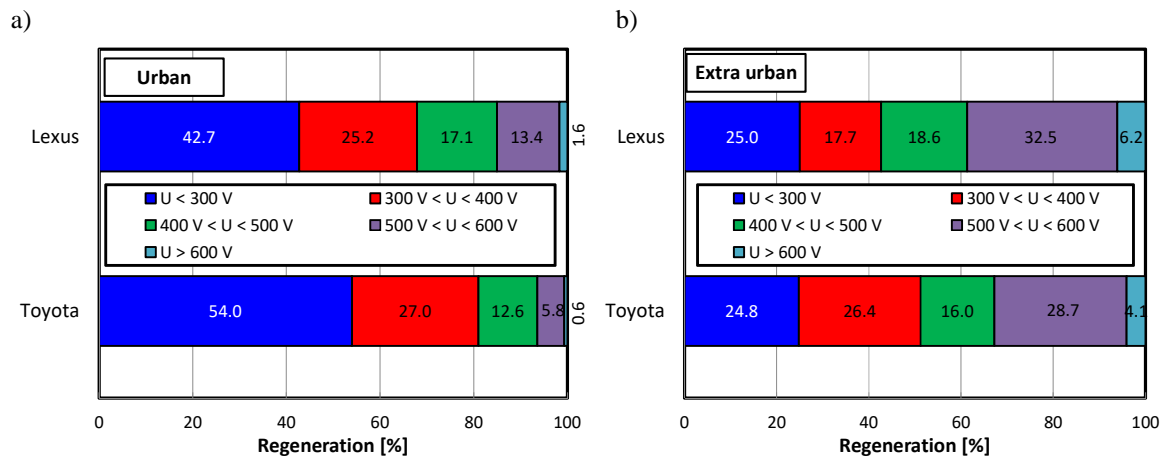
Analiza wielkości momentu obrotowego podczas hamowania uzupełniona o wartości prędkości obrotowej pozwala na wyznaczenie przepływu energii zgodnie z równaniem:

$$E = 2\pi \int_{t=0}^{t=tm} Tn dt \quad (1)$$

gdzie: T – moment hamujący silnika elektrycznego, n – prędkość obrotowa.

Na tej podstawie wyznaczono energię podczas hamowania regeneracyjnego z podziałem na wielkości napięcia generatora prądu. Zgodnie z danymi na rysunku 5 oraz po zastosowaniu równania (1) stwierdzono, że największy udział hamowania regeneracyjnego w warunkach miejskich odbywa się przy napięciu do 300 V. Udział ten wynosi powyżej 40% czasu jazdy dla pojazdu Lexus oraz powyżej 50% podczas przejazdu Toyotą (rys. 6a). Charakterystycznym jest fakt, że udział zwiększonego napięcia w pojeździe Lexus podczas odzyskiwania energii jest coraz większy dla większych wartości napięcia. Ta prawidłowość dotyczy zarówno warunków jazdy miejskiej oraz pozamiejskiej (rys. 6b).

W warunkach jazdy miejskiej udział większych wartości napięcia jest coraz mniejszy w ogólnym czasie jego wykorzystania. W warunkach pozamiejskich największy udział napięcia (o wartości około 30% czasu hamowania regeneracyjnego) przypada na zakres 500–600 V, co można tłumaczyć zwiększonymi prędkościami jazdy oraz możliwością przetwarzania większych wartości energii kinetycznej na energię elektryczną. Jak wynika z rysunku 5 zakres ten dotyczy największych wartości prędkości obrotowych podczas hamowania odzyskującego energię.



Rys. 6. Analiza względnych udziałów czasu odzyskiwania energii z uwzględnieniem napięcia generatora elektrycznego badanych pojazdów: a) w warunkach jazdy miejskiej, b) w warunkach jazdy pozamiejskiej

5.3. Analiza przepływu energii przez akumulator podczas napędu pojazdów

Ważnym aspektem prowadzenia badań drogowych jest początkowy stopień naładowania akumulatorów wysokonapięciowych określany mianem SOC (*state of charge*). Wskazuje on na wartość energii zgromadzonej w akumulatorze podczas rozpoczęcia testu – jednocześnie jest informacją o możliwości wykorzystania silników elektrycznych bez konieczności uruchamiania silnika spalinowego.

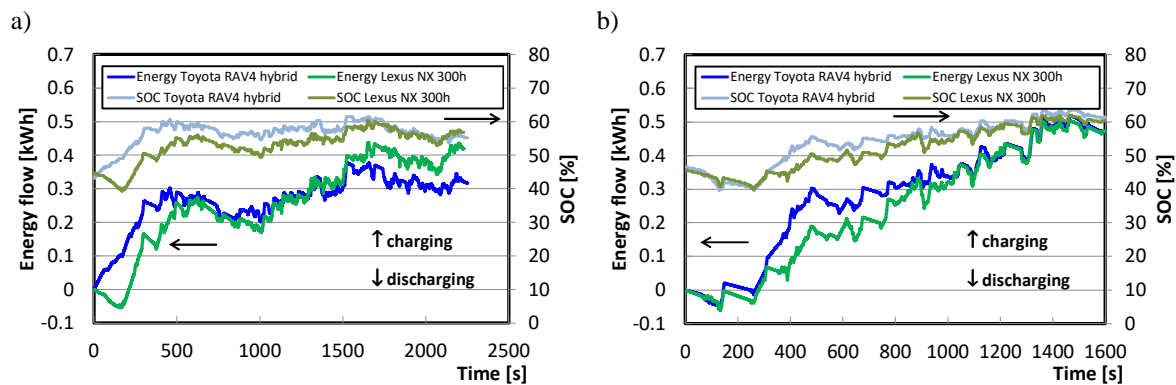
W prowadzonych badaniach wartość SOC w obu przejazdach (miejskim i pozamiejskim) w badanych pojazdach były na zbliżonym poziomie i wynosiły około 45% (rys. 7). Oba przejazdy charakteryzowały się podobnym przepływem energii, gdyż końcowy stopień

naładowania akumulatorów w oby przypadkach był porównywalny. W warunkach jazdy miejskiej wyniósł on dla obu pojazdów około 57% ($\Delta\text{SOC} = 12\%$). W warunkach jazdy pozamiejskiej wartość ta była większa i wynosiła 60% ($\Delta\text{SOC} = 15\%$). Jest to kolejne potwierdzenie porównywalności przejazdów dwoma pojazdami.

Analizie poddano także warunki przepływu energii, z których wynika podobieństwo zarządzania przepływem energii w obu pojazdach. Wartość zmian energii jest podobna, jednak końcowa energia zgromadzona w akumulatorze jest większa w pojeździe Lexus niż w Toyocie. Zmiany te na korzyść pojazdu Lexus mogą wynikać z większej masy (co jest widoczne w początkowych okresach jazdy jako rozładowanie akumulatora), jednak powoduje również większy odzysk energii podczas hamowania zgodnie z równaniem:

$$E = m \int_{t=0}^{t=tm} v dt \quad (2)$$

gdzie masa pojazdu ma wpływ na wartość energii kinetycznej zamienianej na energię elektryczną.

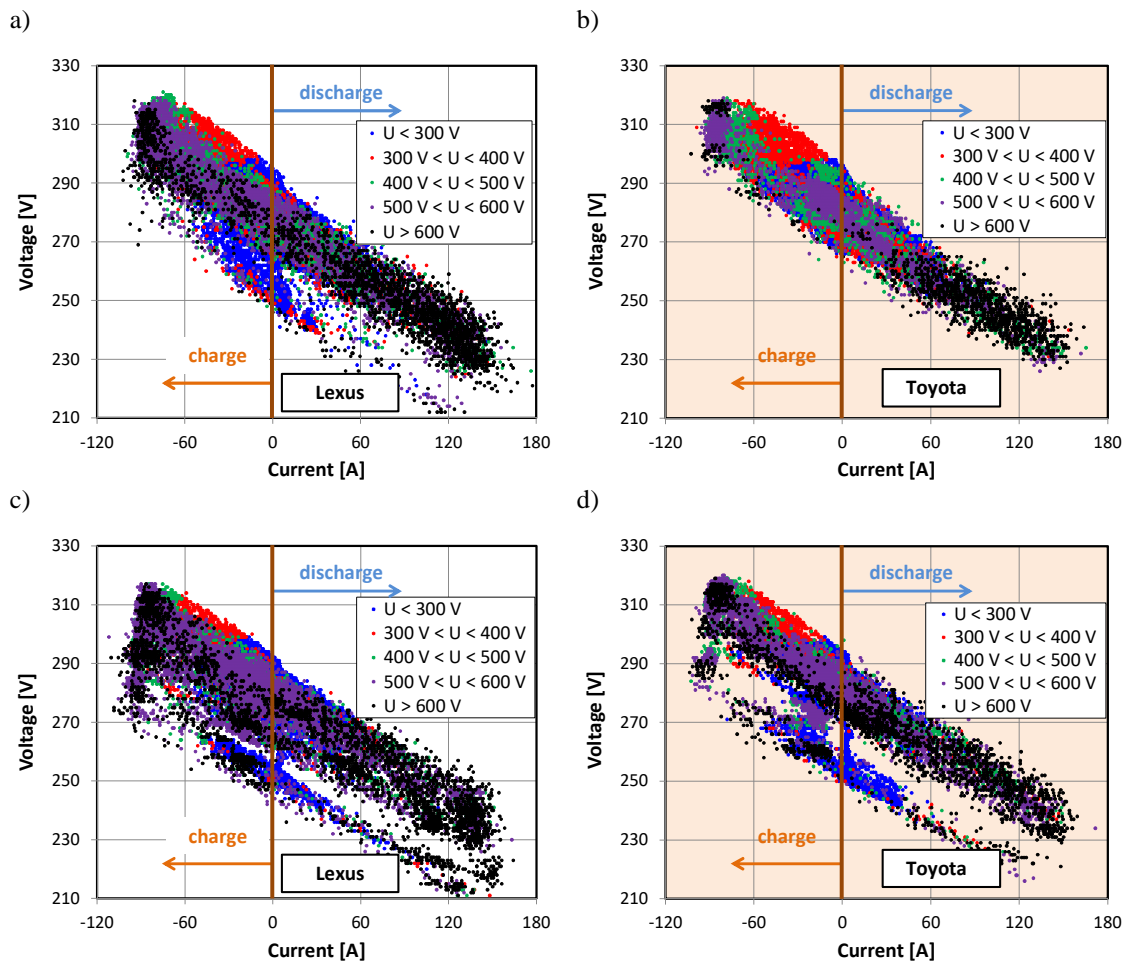


Rys. 7. Analiza przepływu energii oraz stopnia naładowania akumulatorów podczas przejazdu pojazdów: a) w warunkach jazdy miejskiej, b) w warunkach jazdy pozamiejskiej

Analiza zmian SOC w warunkach miejskich wskazuje na brak ciągłego doładowania akumulatora do uzyskania wartości maksymalnych. W początkowej części trasy, po uzyskaniu SOC o wartości 60% następuje jego wyładowanie do wartości około 50%. Stwierdzono więc, że stan typowej wartości SOC w warunkach miejskich oscyluje w zakresie 50–60%. W warunkach jazdy pozamiejskiej wykorzystanie trybu wspomaganie silnika spalinowego przez elektryczny jest większe, co wskazuje na mniejsze szybkości naładowania akumulatora. W tym przypadku, naładowanie akumulatora do wartości 60% uzyskano dopiero w końcowym fragmencie trasy, który jest typowo miejskim odcinkiem pozwalającym na zwiększony odzysk energii.

5.4. Analiza pracy akumulatora wysokonapięciowego w zróżnicowanych warunkach jazdy

Analiza pracy akumulatorów wskazuje na fakt, że większe wartości prądu akumulatora oraz mniejsze wartości napięcia dotyczą jego rozładowania (rys. 8). Analiza zmian napięcia silników elektrycznych podczas ładowania i rozładowania akumulatora wskazuje na istnienie pewnej prawidłowości. Napięcie o najmniejszej wartości (z przedziału poniżej 300 V) jest wykorzystywane przy małych wartościach przepływu prądu przez akumulator. Wraz ze zwiększeniem wartości prądu następuje zwiększenie wartości napięcia wzmocnienia. Jest to cecha charakterystyczna tych systemów, niezależnie od kierunku przepływu prądu (ładowanie lub rozładowanie akumulatora).



Rys. 8. Charakterystyki napięcie–prąd akumulatorów wysokonapięciowych podczas ładowania i rozładowania: a–b) w warunkach jazdy miejskiej, c–d) w warunkach jazdy pozamiejskiej w odniesieniu do wartości napięcia zasilającego maszyny elektryczne

6. Analiza przepływu energii podczas napędu pojazdów

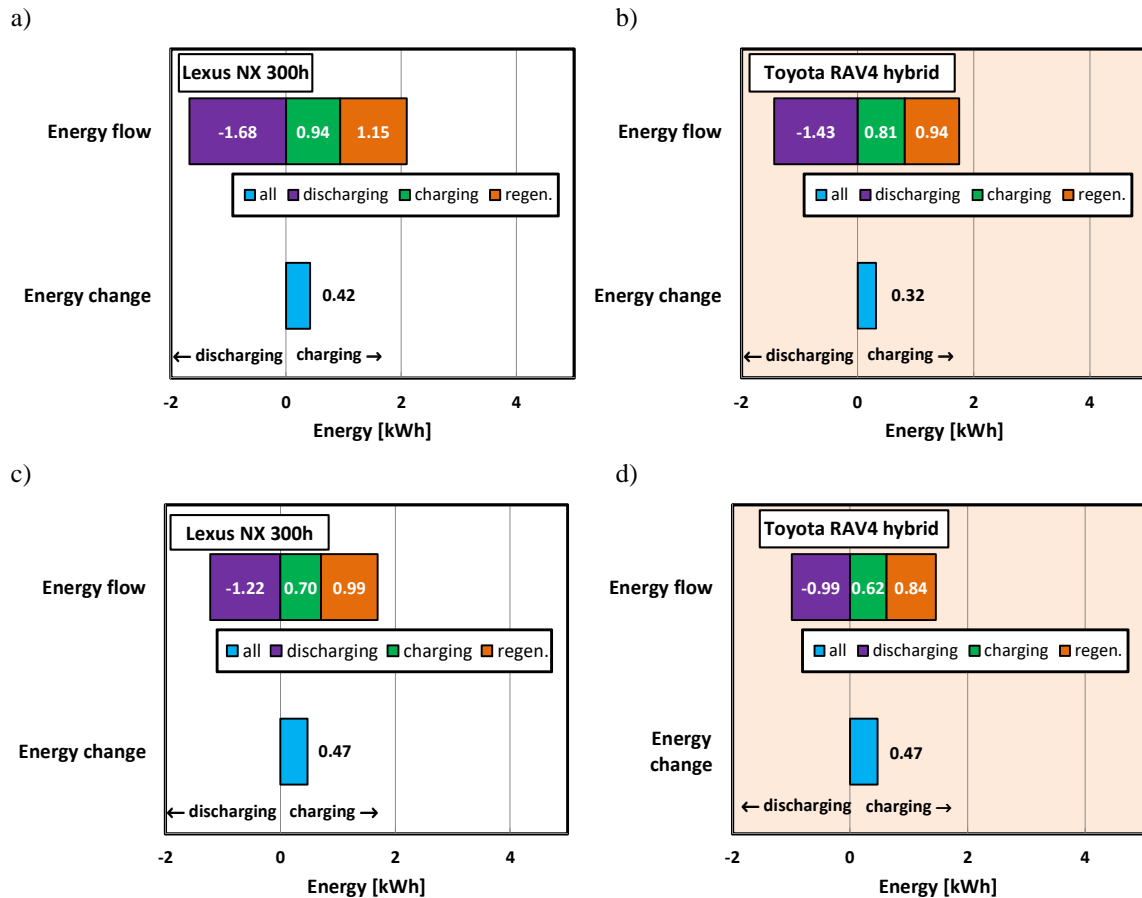
Przedstawione powyżej analizy dotyczące warunków pracy silników elektrycznych i akumulatorów pozwalają na dokonanie zestawienia przepływu energii w układach napędu hybrydowego w warunkach drogowych.

Zebrałe dane pomiarowe pozwoliły na wyszczególnienie faz przepływu energii:

- rozładowania akumulatorów wysokonapięciowych (pobór prądu z akumulatora wysokonapięciowego – $IB > 0$),
- ładowania w warunkach typowych (przepływ prądu do akumulatora $IB < 0$ oraz brak hamowania regeneracyjnego $Th < 0$),
- ładowania w warunkach hamowania regeneracyjnego (przepływ prądu do akumulatora $IB < 0$ oraz ujemna wartość momentu na silniku elektrycznym $Th < 0$).

Warunki takie pozwoliły na określenie wartości energii w trzech trybach jazdy pojazdami. Suma wszystkich wartości energii pozwala na określenie końcowej wartości zmian energii zgromadzonej w akumulatorze. W warunkach jazdy miejskiej uzyskano większe wartości rozładowania akumulatora w pojeździe Lexus (1,68 kWh) niż w Toyocie (1,43 kWh) o 15% (rys. 9a i 9b). Podobnie – dla tego pojazdu – uzyskano także większe wartości odzyskanej energii – o 14%. Uwzględniając ładowanie akumulatora z silnika spalinowego, zmiana energii akumulatora w Lexusie NX 300h wyniosła 0,42 kWh (doładowanie akumulatora). W tych samych warunkach jazdy miejskiej zmiana energii akumulatora wyniosła w Toyocie 0,32 kWh. Większa o 24% wartość zgromadzonej energii w akumulatorze wynika z większych

wartości wszystkich analizowanych wielkości przedstawionych powyżej (rozładowanie, ładowanie, regeneracja).



Rys. 9. Analiza przepływu energii oraz całkowita zmiana naładowania akumulatora podczas przejazdów: a–b) w warunkach jazdy miejskiej, c–d) w warunkach jazdy pozamiejskiej z uwzględnieniem ładowania, rozładowania akumulatora wysokonapięciowego oraz hamowania regeneracyjnego

Analiza jazdy pozamiejskiej wskazuje na podobne różnice w rozładowaniu akumulatora – w pojeździe Lexus NH 300h wartość ta jest większa o 19% w stosunku do pojazdu Toyoty RAV4 hybrid (rys. 9c i 9d). Uwzględniając, że w pojeździe Lexus NX 300h zgromadzono więcej energii wynikającej z ładowania akumulatora (o 11%) i odzyskiwania energii (o 5%) to całkowita ilość zmiany energii w akumulatorach była dokładnie taka sama (0,47 kWh).

Wynika z tego, że w warunkach jazdy pozamiejskiej ilość energii dodatkowej w akumulatorze nie zależała od typu pojazdu (czyli głównie od masy, gdyż pozostałe wielkości są jednakowe).

7. Podsumowanie

Analiza warunków eksploatacji pojazdów z napędem hybrydowym pozwala na stwierdzenie, że istnieją odmienne charakterystyki ich ruchu w warunkach miejskich i pozamiejskich. Wynikają z tego zróżnicowane wielkości przepływu energii oraz ładowania i wyładowania akumulatorów wysokonapięciowych. Szczegółowe wnioski sformułowano poniżej:

- Z analizy tej charakterystyki prędkościowej silnika elektrycznego wynika, że przy danej prędkości obrotowej możliwe jest zasilanie silnika różnymi wartościami napięcia. Napięcie to

jest tym większe im większa jest wartość wymaganego momentu obrotowego. Zwiększenie napięcia zasilania pozwala na zwiększenie wartości mocy silnika.

– Podczas hamowania zmiana napięcia z generatora prądu ulega zmianie proporcjonalnie do prędkości obrotowej. Duże wartości prędkości obrotowej skutkują największymi wartościami napięcia. Z charakterystyki odzyskiwania energii wynika, że wartości napięcia zależą jedynie od prędkości obrotowej, a nie od momentu obrotowego.

– Zmiany wartości naładowania akumulatora w warunkach jazdy miejskiej waha się w zakresie 50–60%. W warunkach jazdy pozamiejskiej wykorzystanie trybu wspomagania silnika spalinowego przez elektryczny jest większe, co wskazuje na mniejsze szybkości naładowania akumulatora. Naładowanie akumulatora do wartości 60% uzyskano dopiero w końcowym fragmencie trasy.

– Wartość zmian energii podczas przejazdów pojazdami jest podobna, jednak końcowa energia zgromadzona w akumulatorze jest większa w pojeździe Lexus NX 300h niż w Toyocie RAV4 hybrid. Zmiany te na korzyść pojazdu Lexus mogą wynikać z różnej masy pojazdów (większej w przypadku Lexusa), która ma wpływ na wartość energii kinetycznej zamienianej na energię elektryczną.

– Napięcie o najmniejszej wartości (z przedziału poniżej 300 V) jest wykorzystywane przy małych wartościach przepływu prądu przez akumulator. Wraz ze zwiększeniem wartości prądu następuje zwiększenie wartości napięcia wzmocnienia. Jest to cecha charakterystyczna tych systemów, niezależnie od kierunku przepływu prądu (ładowanie lub rozładowanie akumulatora).

Powyższe badania prowadzono przy jednakowym stopniu naładowania akumulatorów zarówno w warunkach miejskich oraz pozamiejskich. Kolejnym etapem prac badawczych będzie analiza eksploatacyjna takich napędów w odniesieniu do zróżnicowanych warunków początkowych zgromadzonej energii w akumulatorach tych pojazdów. Wówczas charakterystyki tych napędów powinny być znacząco zróżnicowane.

Literatura

1. Hu X, Jiang J, Egardt B, Cao D. Advanced power-source integration in hybrid electric vehicles: multicriteria optimization approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015; 62 (12): 7847–7858, <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2015.2463770>.
2. Hu X, Moura S J, Murgovski N, Egardt B, Cao D. Integrated optimization of battery sizing, charging, and power management in plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2016; 24 (3): 1036–1043, <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2015.2476799>.
3. Kasprzyk L. Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (2): 229–236, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.2.10>.
4. Li L, Wang X, Xiong R, He K, Li X. AMT downshifting strategy design of HEV during regenerative braking process for energy conservation. *Applied Energy* 2016; 183: 914–925, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.031>.
5. Merkisz J, Pielecha I. Układy mechaniczne napędu hybrydowego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
6. Michel P, Charlet A, Colin G, Chamailard Y, Bloch G, Nouillant C. Optimizing fuel consumption and pollutant emissions of gasoline-HEV with catalytic converter. *Control Engineering Practice* 2017; 61: 198–205, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.12.010>.

7. Navamani J D, Vijayakumar K, Jegatheesan R. Non-isolated high gain DC-DC converter by quadratic boost converter and voltage multiplier cell. *Ain Shams Engineering Journal* 2016, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.09.007>.
8. Pielecha J, Merkisz J, Markowski J, Jasinski R. Analysis of passenger car emission factors in RDE tests. *E3S Web of Conferences* 10, UNSP 00073 (2016), <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20161000073>.
9. Stroe N, Colin G, Ben-Cherif K, Olaru S, Chamaillard Y. Towards a generic control-oriented model for HEV predictive energy management. *IFAC* 2016; 49 (11): 259–264, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.039>.
10. Tani A, Camara M B, Dakyo B, Azzouz Y. DC/DC and DC/AC converters control for hybrid electric vehicles energy management-ultracapacitors and fuel cell. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2013; 9 (2): 686–696, <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2012.2225632>.
11. Wei Z, Xu J, Halim D. HEV power management control strategy for urban driving. *Applied Energy* 2017; 194: 705–714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.023>.
12. Wei Z, Xu Z, Halim D. Study of HEV power management control strategy based on driving pattern recognition. *Energy Procedia* 2016; 88: 847–853, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.062>.
13. Zhu L, Yu F R, Ning B, Tang T. Optimal charging control for plug-in electric vehicles in smart microgrids fueled by renewable energy sources. *International Journal of Green Energy* 2013; 10 (9): 924–943, <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2012.727364>.