

**PIELECHA Ireneusz, CZAJKA Jakub, WISŁOCKI Krzysztof,  
BOROWSKI Przemysław, CIEŚLIK Wojciech**

## **WPŁYW STOPNIA NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW NA WARUNKI PRACY NAPĘDU HYBRYDOWEGO W TEŚCIE NEDC**

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono analizę pracy napędu hybrydowego w warunkach testu jezdny NEDC. Przedstawiono sposoby pracy tego układu podczas zróżnicowanego stanu początkowego naładowania wysokonapięciowych akumulatorów. Warunki takie generują różne możliwości pracy napędu powodując określone skutki przepływu energii. Badania prowadzono przy wykorzystaniu napędu hybrydowego Toyoty Prius z silnikiem spalinowym o pojemności 1,5 dm<sup>3</sup> na hamowni podwozowej. Określono czas, po którym następuje jednakowe naładowanie akumulatorów niezależnie od ich stanu początkowego. Przeprowadzono analizę pracy silnika spalinowego i silników elektrycznych oraz dokonano bilansu energii napędu hybrydowego w teście jezdny NEDC.*

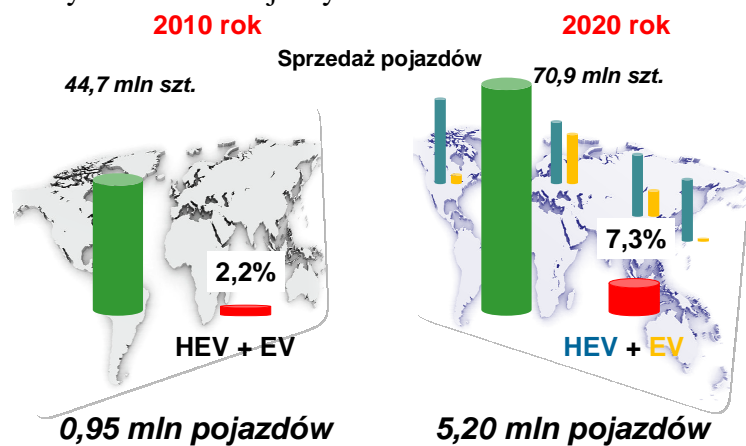
### **WSTĘP**

Konieczność ograniczania zużycia paliwa i emisji spalin wymusza rozwój nowych rozwiązań napędów pojazdów – napędów hybrydowych, których udział w rynku znacznie się zwiększa. Zastosowanie napędów hybrydowych w pojazdach samochodowych pozwala obecnie na znaczne zredukowanie emisji spalin przy jednoczesnym częściowym ograniczeniu zużycia paliwa. Ograniczenie składników toksycznych jest uzależnione od sposobu realizacji napędu hybrydowego. Obecnie stosowane są najczęściej dwa rozwiązania: „łagodny” napęd hybrydowy (*mild hybrid*) oraz pełnohybrydowy (*full hybrid*). Pierwsze z rozwiązań – znacznie tańsze, wykorzystuje przeważanie silnik elektryczny niewielkiej mocy do wspomaganie pracy silnika spalinowego i jego rozruchu. Układ *full hybrid* pozwala na napęd pojazdu w sposób niezależny przez silnik elektryczny lub spalinowy lub przez oba te silniki jednocześnie.

Analiza zwiększania udziału napędów hybrydowych w populacji wszystkich układów napędowych wskazuje na istnienie znacznego potencjału rozwojowego tych konstrukcji. Jest to szczególnie ważny segment rynek napędów w przypadku Ameryki Północnej, jednak rynek europejski ma także znaczący udział w sprzedaży tych układów. Analizy firmy konsultingowej JDPower wskazują, że udział napędów hybrydowych w rynku zwiększy się z 2,2% w roku 2010 do 7,3% w roku 2020 – rys. 1. Liczba sprzedanych nowych pojazdów hybrydowych i elektrycznych wynosi (w 2010 r.) odpowiednio 44,7 mln oraz 70,9 mln szt. Liczba sprzedaży nowych pojazdów hybrydowych na rynku amerykańskim ma wynosić (w 2020 r.) około 1,672 mln szt. oraz 108 tys. pojazdów elektrycznych. Sprzedaż napędów hybrydowych na rynku europejski będzie mniejsza, lecz znacznie korzystniejsza dla pojazdów elektrycznych. Sprzedaż tych napędów osiągnie odpowiednio: 977 tys. szt. oraz 742 tys. szt. Liczba napędów hybrydowych w Japonii ma osiągnąć poziom 875 tys. szt., natomiast

pojazdów elektrycznych – około 67 tys. szt. Wynika z tego, że dysproporcja między liczbą napędów hybrydowych i elektrycznych jest najmniejsza w krajach europejskich. Jest to zrozumiałe ze względu na duże odległości pokonywane przez pojazdy na rynku amerykańskim (małe – w krajach europejskich).

Badania napędów pojazdów hybrydowych są prowadzone w aspekcie pomiarów emisji spalin z tych jednostek oraz pod kątem ich wskaźników energetycznych. Ze względu na odzyskiwanie energii w takim napędzie, istotne wydają się badania dotyczące ich aspektów energetycznych. Pozwalają one w wymierny sposób ocenić możliwości ograniczenia zużycia paliwa w zróżnicowanych warunkach jazdy.



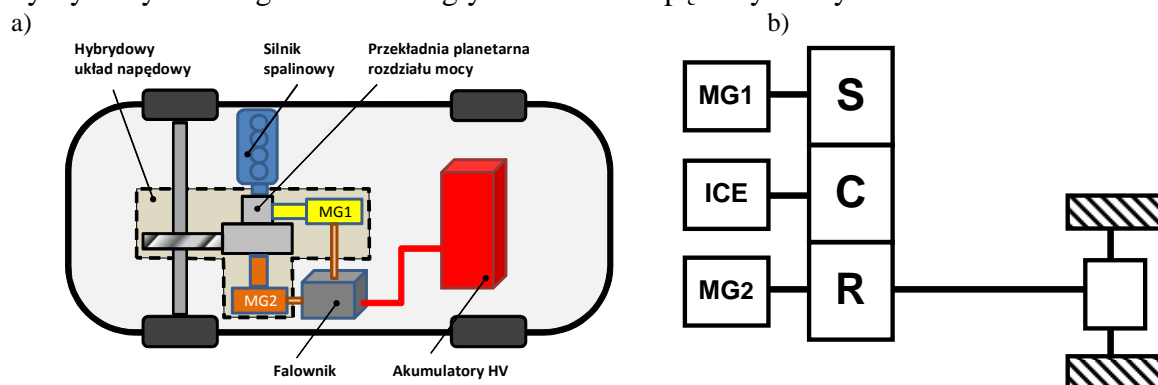
**Rys. 1.** Sprzedaż napędów hybrydowych i elektrycznych na świecie oraz jej prognozy w najbliższym dziesięcioleciu (HEV – *hybrid electric vehicle* – pojazdy hybrydowe; EV – *electric vehicle* – pojazdy elektryczne)

Źródło: [1]

Celem prowadzonych badań była ocena wpływu stopnia naładowania akumulatorów (SOC – *State of Charge*) na przepływ energii w napędzie hybrydowym, w tym wykorzystanie silnika spalinowego i układów elektrycznych w teście jezdnym NEDC. Wybrano warunki testu jezdny ze względu na możliwość powtarzalności prowadzonych badań oraz z uwagi na jego użycie w badaniach homologacyjnych pojazdów osobowych do 3,5 t.

## 1. OBIEKT BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano Toyotę Prius 2004 (silnik spalinowy o oznaczeniu NHW20) z hybrydowym szeregowo-równoległym układem napędowym – rys. 2.



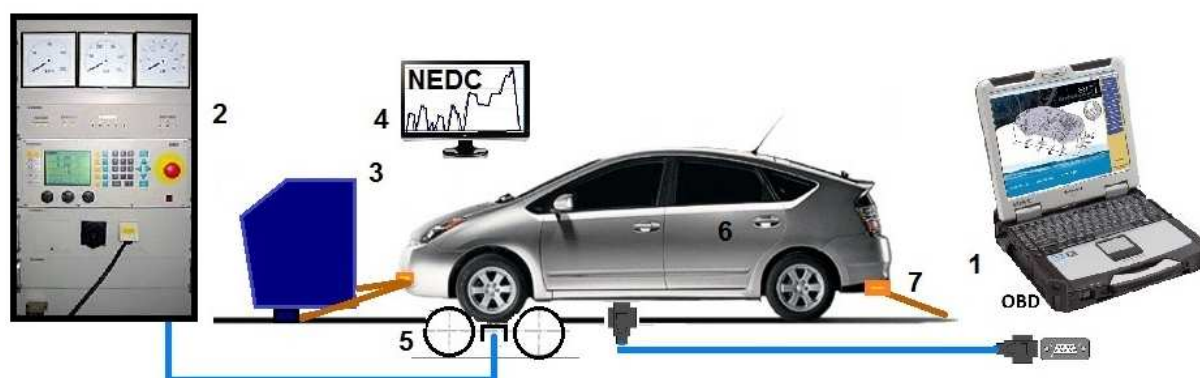
**Rys. 2.** Układ napędowy Toyoty Prius (a) oraz schemat funkcjonalny połączeń elementów przekładni planetarnej (b): MG1 – silnik/generator; MG2 – silnik/generator; S – koło słoneczne, C – koła satelitarne, R – pierścień zewnętrzny

Źródło: [2, 3]

Test jezdny przeprowadzono na hamowni podwoziowej Ostfalia University of Applied Sciences w Wolfsburgu. Do badań wykorzystano test jezdny NEDC, a hamownia podwoziowa umożliwiła przeprowadzenie tego testu. Wykorzystane stanowisko składa się z obudowy, w której umieszczono podnoszone rolki, hamulca elektrowirowego chłodzonego cieczą oraz panelu sterującego (rys. 3). Jednostka sterująca po wczytaniu testu NEDC rejestruje prędkość pojazdu, aktualny moment obrotowy oraz moc badanego napędu. Podstawowe dane techniczne wykorzystanej hamowni podwoziowej przedstawiono poniżej.

Dane techniczne hamowni:

- maksymalne obciążenie osi: 2000 kg,
- maksymalna siła uciągu: 5000 N,
- maksymalna moc: 230 kW,
- zakres prędkości: 0-200 km/h.



**Rys. 3.** Schemat stanowiska badawczego: 1 – odczyt danych diagnostycznych, 2 – panel sterujący, 3 – nawiew, 4 – sterowanie testem NEDC, 5 – rolki, 6 – pojazd, 7 – pasy zabezpieczające  
Źródło: [2, 3]

Charakterystykę pojazdu i układu napędowego przedstawiono w tab. 1. Wykorzystując złącze OBD i czytnik informacji diagnostycznych uzyskano dane dotyczące pracy napędu hybrydowego. Dane te posłużyły do oceny charakterystyk tego napędu w warunkach testu jezdnego.

**Tab. 1.** Parametry układu napędowego Toyota Prius

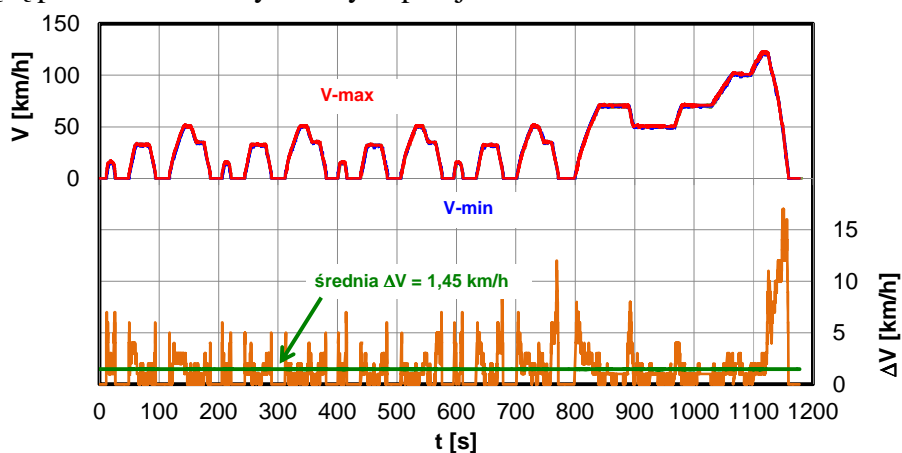
Silnik spalinowy	
Typ i układ cylindrów	ZI, R4, 16-zaw.
Pojemność silnika	1497 cm <sup>3</sup>
Moc maksymalna	57 kW/74 KM/5000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	115 N·m/4200 obr/min
Silnik elektryczny/MG2	
Napięcie maksymalne	500 V AC
Moc maksymalna	50 kW/68 KM/1200–1540 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	400 N·m/0–1540 obr/min
Akumulator	
Typ	niklowo-wodorkowy (NiMH)
Liczba modułów, napięcie, moc	28; 201,6 V; 21 kW
Pojemność elektryczna	6,5 A·h
System napędowy	
Moc maksymalna	82 kW przy 85 km/h
Maksymalny moment obrotowy	478 N·m

Źródło: [2, 3]

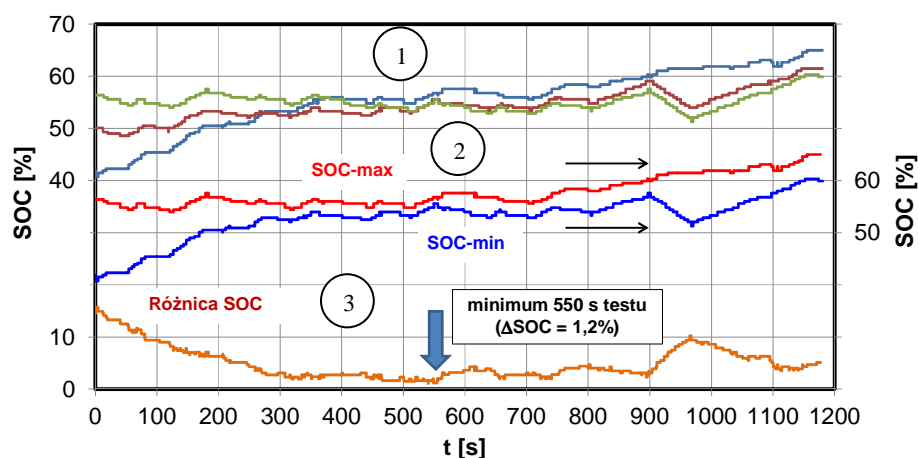
Sterownik układu napędowego Toyoty Prius pozwala na odczyt danych z sieci pokładowej w trzech grupach: pracy silnika, układu hybrydowego oraz akumulatorów. W badaniach wykorzystano jedynie dane odnoszące się do hybrydowego układu napędowego. Badania przeprowadzono w teście jezdnym NEDC na hamowni podwoziowej dla zróżnicowanych stopni naładowania akumulatorów: 40%, 50% oraz 55%. Zmiany SOC w hybrydowym układzie napędowym pojazdu kształtują się na poziomie 40–65%. Proponowane wielkości badawcze SOC powinny być wystarczające do oceny warunków pracy napędu hybrydowego.

## 2. WPŁYW STOPNIA NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW NA PARAMETRY PRACY HYBRYDOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO W TEŚCIE NEDC

W badaniach wykorzystano trzy pełne realizacje testu NEDC. Na ich podstawie dokonano oceny powtarzalności warunków jezdnych (rys. 4) oraz określono czas, po jakim nastąpiło zrównanie wartości naładowania akumulatorów podczas przejazdów (rys. 5). Średnia wartość prędkości w przejazdach wynosiła odpowiednio: 34,2 km/h, 33,8 km/h oraz 33,7 km/h. Maksymalna różnica prędkości między przejazdami wynosiła 17 km/h (podczas hamowania w ostatniej części testu EUDC – *Extra Urban Driving Cycle*), co należy uznać za wystarczającą powtarzalność wykonanych przejazdów.



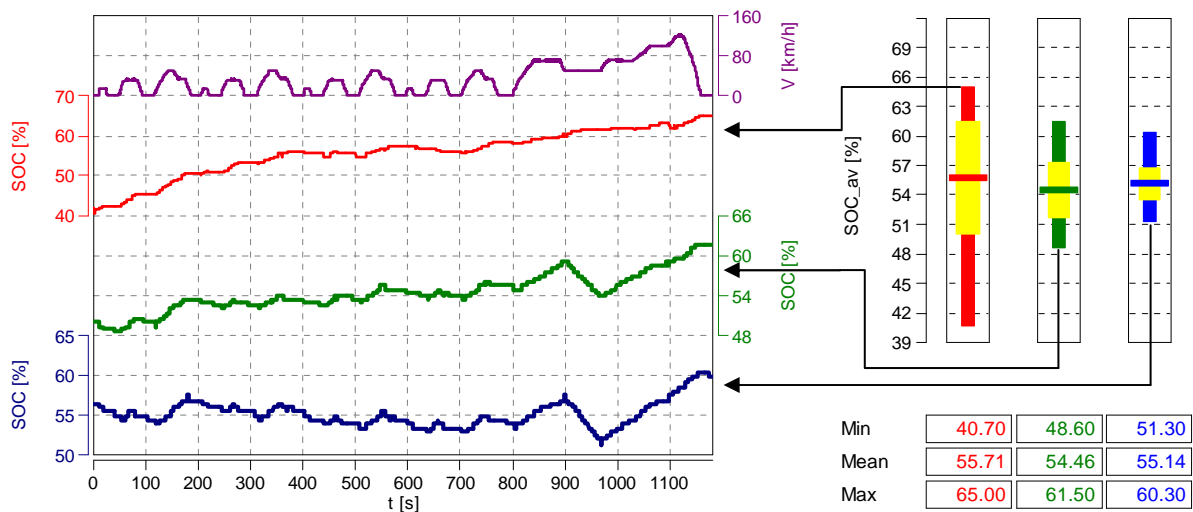
Rys. 4. Przebiegi testów jezdnych wraz z wartością średniej różnicy prędkości w testach NEDC



Rys. 5. Przebiegi testów jezdnych wraz z wyznaczeniem czasu zrównania wartości naładowania akumulatorów w teście NEDC

Początkowe wartości SOC wskazują na stan naładowania akumulatorów podczas rozpoczęcia testów NEDC. W celu wyznaczenia minimalnej różnicy SOC między trzema przejazdami określono wartości maksymalnego i minimalnego naładowania akumulatorów (① na rys 5). Następnie wyznaczono obwiednie tych wartości czyli linie SOC-min oraz SOC-max podczas testu jezdnego (② na rys. 5). Mając różnice między tymi wielkościami (③ na rys 5) określono minimalne wartości różnic SOC. Z przedstawionego rysunku wynika, że czas po którym uzyskuje się jednakową wartość naładowania akumulatora niezależnie do stanu początkowego, wynosi około 550 s (maksymalna różnica wynosi 1,2% naładowania akumulatorów).

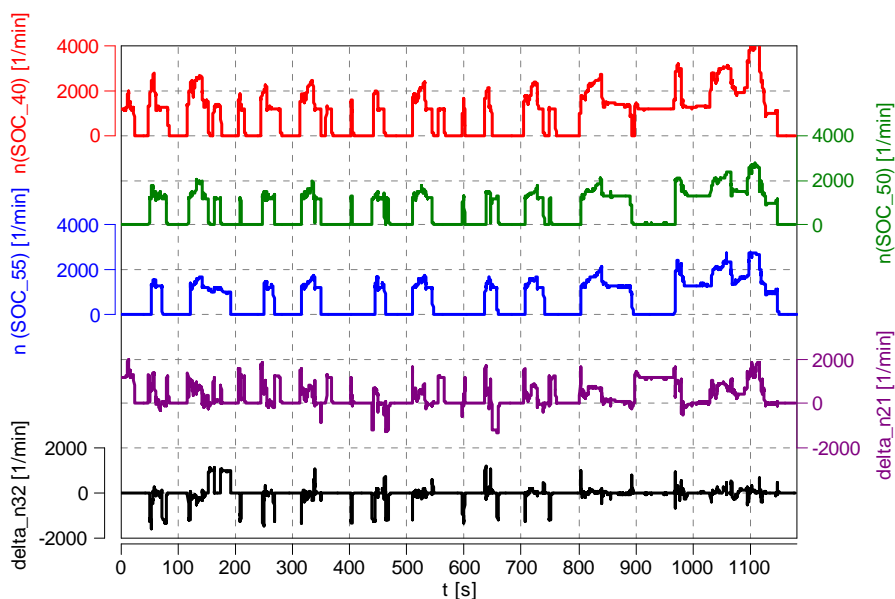
Na podstawie badań wykazano, że średnia wartość SOC w teście jezdnym jest niezależna od początkowego stanu naładowania akumulatora. Wynosi ona odpowiednio 55,7%, 54,4% oraz 55,1%. Oznacza to, że błąd względny wynosi 2,3% w stosunku do maksymalnej uzyskanej wartości. Czas ładowania akumulatorów w zależności od początkowego stanu SOC przedstawiono na rys. 6.



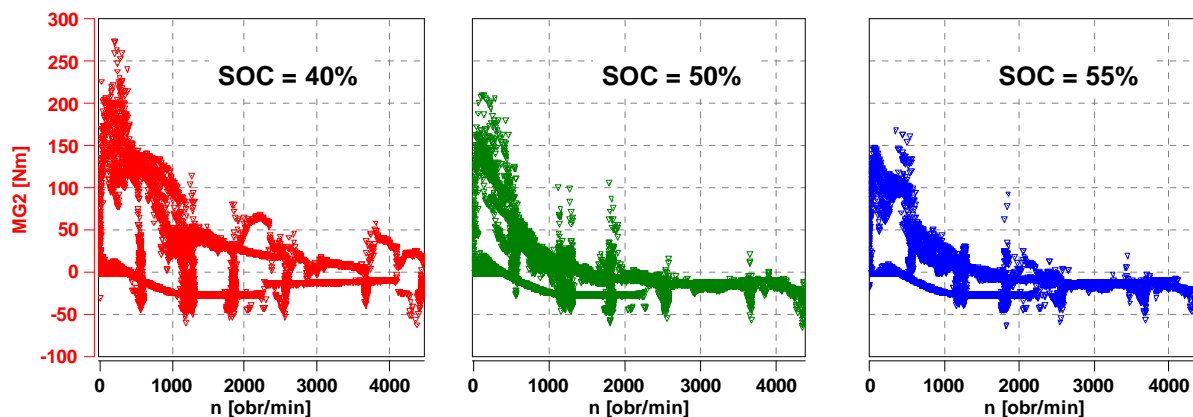
**Rys. 6.** Początkowe i średnie wartości SOC (SOC\_av) dla różnych stopni początkowego rozładowania akumulatorów i warunki ich ładowania podczas testu NEDC

Z zestawienia na rysunku 7 wynika, że różnica prędkości obrotowych silnika spalinowego podczas przejazdów testu z początkowym SOC wynoszącym 50% i 40% jest znaczna. Wynika to z analizy przebiegu zmian wartości delta\_n21 (różnica SOC50 – SOC40) – wartości są głównie dodatnie, co wskazuje na częstszą pracę silnika z początkowym stanem naładowania akumulatora o wartości SOC = 40%. Zmiany prędkości obrotowej podczas przejazdów z SOC = 55% i SOC = 50% nie są tak duże. W początkowym zakresie testu pojawiają się stany pracy silnika w trzecim przejeździe (z największym naładowaniem akumulatora), jednak analiza wartości wskazuje na sporadyczne występowanie takich przypadków. Wynikają one głównie z niedopasowania prędkości pojazdu do ściśle określonego profilu prędkości (podczas testu dopuszczalny jest błąd  $\pm 2$  km/h). Analiza wielkości delta\_n21 i delta\_n32 wskazuje na zwiększony udział pracy silnika spalinowego z mniejszym SOC przy rozpoczynaniu testu. W teście z SOC = 40% prędkości obrotowe silnika spalinowego są znacznie większe ( $\Delta n \approx 2000$  obr/min). Wskazuje to na typowe wartości prędkości obrotowej silnika spalinowego podczas których następuje doładowanie akumulatorów. Analiza stanu pracy silnika MG2 przy niewielkim SOC wskazuje na duże wykorzystanie tych silników, szczególnie w zakresie małych prędkości obrotowych (rys. 8). Charakterystyczne są podobne stany pracy wynikające z warunków testu NEDC. Oznacza to,

że silnik spalinowy doładowuje akumulatory przy jednoczesnym wykorzystaniu silnika elektrycznego MG2 do napędu pojazdu.

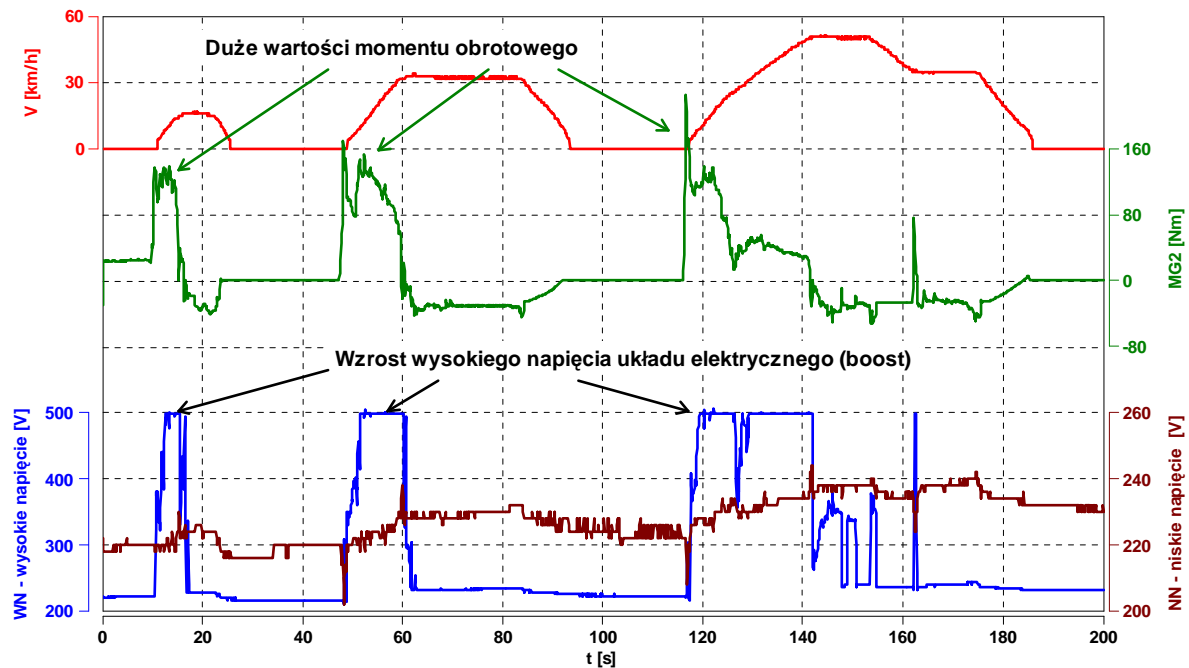


**Rys. 7.** Przebieg prędkości silnika spalinowego w teście NEDC dla każdej z początkowych wartości SOC, różnice prędkości między stanami SOC\_50 i SOC\_40 oznaczone jako delta\_n21 oraz różnice prędkości między SOC\_55 i SOC\_50 oznaczone jako delta\_n32

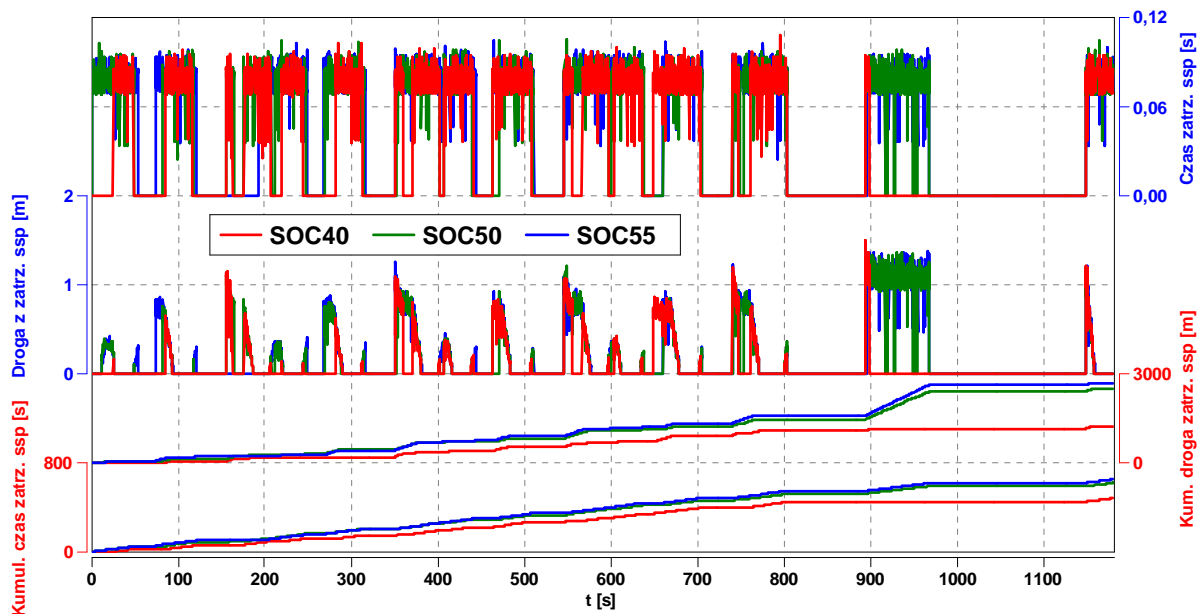


**Rys. 8.** Pole pracy silnika elektrycznego MG2 w przypadku zróżnicowanych początkowych wartości naładowania akumulatorów w teście NEDC

Różnica wykonania napędu hybrydowego w stosunku do pierwszej generacji układu THS (*Toyota Hybrid System*) polega m.in. na zastosowaniu akumulatorów o napięciu 201,7 V (NN – niskie napięcie, *LV – low voltage*) i przetwornicy pozwalającej na uzyskanie napięcia 500V (WN – wysokie napięcie, *HV – high voltage*). Gwałtowne przyspieszenie w pierwszej fazie testu NEDC (rys. 9) wskazuje na uzyskiwanie w przetwornicy napięcia maksymalnych wartości. Pozwala to przy poborze prądu o wartości około 20 A i napięciu 500 V generować duże wartości mocy i momentu obrotowego z silnika elektrycznego MG2. Tym samym możliwe jest znaczne ograniczenie pracy silnika spalinowego. Jest to szczególnie zauważalne podczas zmiany stopnia naładowania akumulatorów z 40 do 50% (rys. 10).



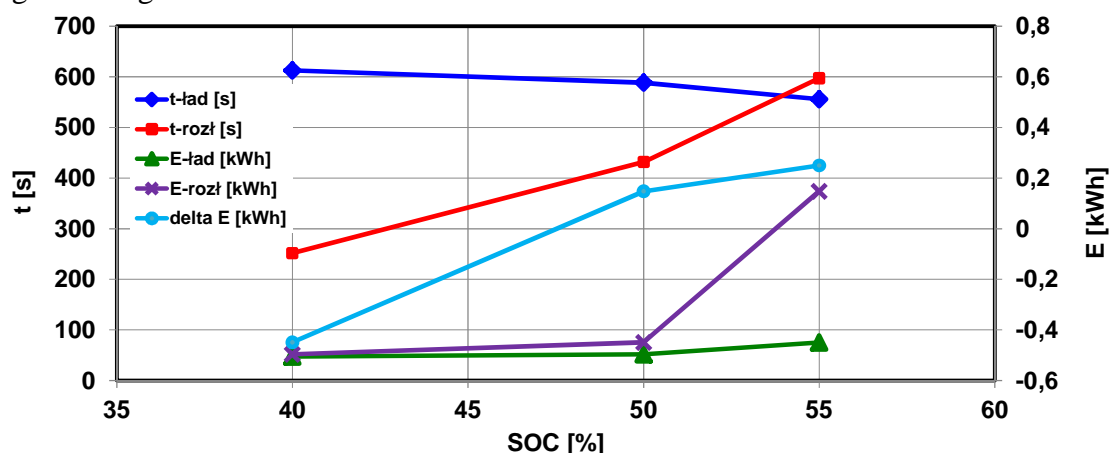
**Rys. 9.** Analiza momentu obrotowego silnika elektrycznego MG2 oraz wartości napięcia w układzie NN i WN podczas zwiększonego wykorzystania momentu obrotowego silnika MG2 w pierwszej fazie testu jezdneho ( $\Delta t = 200$  s) przy początkowym stanie naładowaniu akumulatora SOC = 40%



**Rys. 10.** Wpływ początkowego stanu SOC na czas i drogę testu NEDC z wyłączonym silnikiem spalinowym

Zestawienie danych z poprzedniego rysunku ukazuje, że czas ładowania akumulatorów w teście NEDC jest znaczny w przypadku małego początkowego stanu naładowania akumulatorów (rys. 11). Odwrotna sytuacja ma miejsce podczas analizy czasów rozładowania. Analiza energii ładowania i rozładowania akumulatorów wskazuje na to, że akumulatory podczas testu NEDC akumulują większą wartość energii niż oddają podczas rozładowania. Oznacza to, że bilans energii (określany jako różnica energii dostarczonej i

odebranej od akumulatora) jest w większości ujemny (na co wskazuje wartość krzywej delta E na rys. 11). Duży stopień początkowego naładowania akumulatorów pozwala na uzyskanie dodatniego bilansu energii, tzn. wartość energii wykorzystanej z akumulatora jest większa niż energia do niego dostarczona.



**Rys. 11.** Wpływ początkowego stopnia naładowania akumulatorów na czas ich ładowania i rozładowania wraz z wartościami energii wytworzonej podczas testów NEDC

Stopień naładowania akumulatora istotnie wpływa na czas wyłączenia silnika spalinowego. Obserwuje się znaczne zwiększenie czasu i drogi wyłączenia silnika podczas zwiększania stopnia naładowania akumulatora z 40% do 50%. Dalsze zwiększanie SOC nie powoduje gwałtownych zmian w czasie wyłączenia silnika. Z danych zawartych w tabeli 2 wynika, że przy 50-procentowym naładowaniu akumulatora możliwe jest uzyskanie 50% czasu przejazdu testu NEDC bez pracy silnika spalinowego. Należy zauważyć, że charakterystyczna jest porównywalność SOC z procentowym udziałem czasu zatrzymania silnika w teście NEDC.

**Tab. 2.** Charakterystyka parametrów jazdy testu NEDC pojazdem Toyota Prius przy różnym początkowym stopniu naładowania akumulatorów

Wielkość	Jednostka	SOC		
		40%	50%	55%
Prędkość średnia przejazdu	km/h	17,71	18,29	18,15
Droga z wyłączonym silnikiem spalinowym	m	1222,65	2479,10	2697,94
Udział drogi z wyłączonym silnikiem spalinowym	%	10,92	22,41	24,42
Czas wyłączenia silnika spalinowego	s	481,9	622,4	651,2
Udział czasu wyłączenia silnika spalinowego	%	40,82	52,73	55,17

## WNIOSKI

Analiza pracy napędu hybrydowego w teście NEDC wskazuje na jego dużą zależność od stopnia naładowania akumulatora. Zwiększenie początkowego SOC zmniejsza udział czasu pracy silnika spalinowego. Największe różnice w czasie pracy silnika występują przy zmianie SOC z 40% do 50% – skrócenie czasu pracy wynosi 10%. Wynika z tego, że ograniczenie czasu pracy silnika spalinowego jest proporcjonalne do początkowego stopnia naładowania akumulatora na początku testu NEDC.

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki badań należy stwierdzić, że praca napędów hybrydowych, w których jest wymuszone rozpoczęcie testu NEDC z rozładowanymi akumulatorami będzie prowadzić do ujemnego bilansu energii (taki rodzaj testu homologacyjnego wymagany jest obecnie przepisami regulaminu 101 [4] podczas badań



napędów hybrydowych). Należy zauważyć, że taka postać bilansu energii jest charakterystyczna dla danego modelu pojazdu. Implementacja innego typu napędu elektrycznego czy układów gromadzenia energii może zmienić postać bilansu.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. JDPower (www.jdpower.com, dostęp z dnia 10.09.2013).
2. Materiały firmy Toyota (www.toyota.com, dostęp z dnia 2.09.2013)
3. Mi C., Masrur A., Gao D.W., Hybrid Electric Vehicles. *Principles and Applications with Practical Perspectives*. Wiley, Chichester 2011.
4. Regulamin nr 101 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji samochodów osobowych wyposażonych wyłącznie w silnik spalinowy spalania wewnętrznego lub wyposażonych w hybrydowy elektryczny układ napędowy w zakresie pomiaru emisji dwutlenku węgla i zużycia paliwa i/lub pomiaru zużycia energii elektrycznej i zasięgu przy zasilaniu energią elektryczną oraz pojazdów kategorii M1 i N1 wyposażonych w elektryczny układ napędowy w zakresie pomiaru zużycia energii elektrycznej i zasięgu przy zasilaniu energią elektryczną.

## **IMPACT OF THE STATE OF CHARGE OF THE BATTERY ON HYBRID DRIVE IN NEDC TEST CONDITIONS**

### *Abstract*

*The paper presents an analysis of the hybrid drive in the NEDC driving test conditions. The conditions of employment hybrid powertrain while varying the initial state of charge of the high voltage battery. These conditions generate different states of the drive causing certain effects of energy flow. The study was conducted using the second generation hybrid Toyota Prius of an engine with a 1.5 dm<sup>3</sup> capacity. Specified time, followed by the same battery charge regardless of the initial state. An analysis of electric motors and made the hybrid energy balance in the NEDC test.*

### **Autorzy:**

dr hab. inż. **Ireneusz Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

dr inż. **Jakub Czajka** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Jakub.Czajka@put.poznan.pl

dr hab. inż. **Krzysztof Wisłocki**, prof. PP – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Krzysztof.Wislocki@put.poznan.pl

mgr inż. **Przemysław Borowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Przemyslaw.T.Borowski@doctorate.put.poznan.pl

mgr inż. **Wojciech Cieślik** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Wojciech.Cieslik@doctorate.put.poznan.pl