

## Assessment of parameters of the hybrid drive system in vehicles in urban traffic conditions

*Continuously increasing share of the hybrid and electric vehicles in the global automotive market justifies the need for detailed analysis of the operational effectiveness of these drive systems. The aim of the study was to assess the operational conditions of the combustion engines and electric motors in hybrid drive systems – full hybrid – of the motor vehicles in urban traffic conditions. Variety of designs of such drive systems is related to the high voltage batteries used and the way of charging them. The road tests were conducted in Warsaw (urban traffic conditions) by recording the operational parameters of three vehicles and their driving systems. The conditions of operation of the combustion engine and electric motors along with the values of their high voltage battery charge level were related to the test routes. The analysis of the relative shares of engine and motor operation time in the total time of vehicle operation in urban traffic conditions was conducted. The scope of operation of the hybrid drive system utilizing only electric propulsion system was determined. The relations between the operational indexes of the hybrid propulsion (combustion engine and electric motor) in real traffic conditions and the charge level of batteries, current speeds and accelerations were shown.*

**Key words:** hybrid drive systems, combustion engine, electric motor, regenerative braking, real traffic conditions

### Ocena parametrów pracy układu napędu hybrydowego pojazdów w warunkach ruchu miejskiego

*Zwiększająca się liczba pojazdów hybrydowych oraz elektrycznych w światowym rynku motoryzacyjnym wskazuje na celowość szczegółowej analizy efektywności pracy tych napędów. Celem badań opisanych w artykule była ocena warunków pracy silników spalinowych i elektrycznych w układach napędu hybrydowego – full hybrid pojazdów samochodowych w warunkach ruchu miejskiego. Różnorodność konstrukcji takich napędów jest związana z zastosowanymi akumulatorami wysokonapięciowymi oraz sposobem ładowania tych akumulatorów. Badania drogowe prowadzono na terenie Warszawy (warunki miejskie), rejestrując parametry ruchu trzech pojazdów i ich układów napędowych. Warunki pracy silników spalinowych i elektrycznych wraz z wartościami stopnia naładowania akumulatorów wysokonapięciowych odniesiono do tras przejazdu. Dokonano analizy względnych udziałów czasu pracy silników (spalinowego i elektrycznego) w całkowitym czasie eksploatacji w warunkach ruchu miejskiego. Określono zakresy pracy układu napędowego hybrydowego wykorzystującego tylko układ napędu elektrycznego. Wykazano zależność wskaźników pracy napędu hybrydowego (silników spalinowego i elektrycznego) podczas rzeczywistych warunków ruchu od stopnia naładowania akumulatorów oraz od aktualnych prędkości i przyspieszeń pojazdu.*

**Słowa kluczowe:** układy napędu hybrydowego, silnik spalinowy, silnik elektryczny, hamowanie regeneracyjne, rzeczywiste warunki ruchu

### 1. Introduction and the aim of the research

Operating conditions of the drive systems of vehicles moving within the area of modern urban agglomerations and out of town vary. Driving in urban conditions involves phases of vehicle starting and stopping. Often these phases are separated by a phase of halting. The frequency of occurrence of these phases is high and their value depends on the time of day, flow capacity of the communication routes etc. Under these conditions, in the classic vehicle, the thermal engine operates within a wide range of changes of power, speed and in consequence – efficiency. The general power efficiency of the classic propulsion is impaired by irreversible conversion of the vehicle kinetic energy into heat during braking process. The movement of vehicles away from the city, on the other hand, is characterized by relatively stable operation of the drive system. Such significant differences between urban and out-of-the city traffic conditions make the highly-effective operation of the drive system impossible. For this reason, utilization

### 1. Wstęp. Cel badań

Warunki pracy układów napędowych pojazdów poruszających się w obszarach współczesnych aglomeracji miejskich oraz poza miastami są różne. W miastach występują fazy ruszania i zatrzymania pojazdu. Często fazy te oddziela faza postoju. Częstotliwość pojawiania się faz jest duża, a ich wartość zależy od pory dnia, przepustowości tras komunikacyjnych itp. W tych warunkach w klasycznym napędzie pojazdu silnik cieplny pracuje w znacznym zakresie zmian mocy, prędkości obrotowej i w konsekwencji sprawności. Ogólną sprawność energetyczną klasycznego napędu pogarsza nieodwracalna zamiana energii kinetycznej pojazdu na ciepło podczas procesu hamowania. Ruch międzymiastowy natomiast charakteryzuje względnie stabilna praca układu napędowego. Znaczące zróżnicowanie warunków ruchu miejskiego i międzymiastowego uniemożliwia wysokosprawną pracę układu napędowego. Z tego powodu zastosowanie układu napędu hybrydowego może przyczynić się do zmiany niekorzystnych warunków pracy silnika spalinowego. Polega

of the hybrid drive system can contribute to the change of the adverse operating conditions of the combustion engine. It involves the use of combustion engine only in specific situations – lack of the required power on wheels while using electric motor. These postulates are justified also by the fact that the quantitative share of the urban traffic conditions is often prevailing in the total balance of the vehicle movement conditions [8].

Currently in Europe 12 countries (Belgium, Denmark, France, Greece, Ireland, Italy, Malta, the Netherlands, Portugal and Spain) meet the carbon dioxide emission limits valid from 2015 (below 130 g/km). In the Netherlands and Greece this emission is the lowest, respectively 109.1 and 111.9 g/km [9].

Emission of carbon dioxide from vehicles is strictly related to their mass. The target limits determined for 2020 (90 g/km) mean the necessity of reduction of emissions by approximately 27% (Fig. 1).

The sale of hybrid vehicles began in Japan in 1997 – then 300 vehicles were sold [13]. In the years 2005–2008 the largest recipient of such vehicles was the American market, with the share in the market exceeding 60% (Fig. 2). Currently the share of sale of hybrid vehicles by Toyota in Europe amounts to a little more than 12% (period I–IX 2014), while in American market – to about 26%, and in Japan – 55%. The sale of Toyota hybrid vehicles in years 2012–2013 amounted to over 1220 thousand vehicles a year.

The research on vehicles with the hybrid drive system, apart from the road tests and tests on the test bench [3, 6] involved also simulations related to optimization of such a drive system. Simulations concerning determination of the optimum settings of electric system required to achieve the maximum efficiency [7] allow for significant savings as far as the time of conducting tests is concerned. The tests on managing the cooling system (warm-up strategy) of the Opel Ampera vehicle were conducted with the use of GT-

to na jego wykorzystaniu jedynie w określonych sytuacjach – braku wymaganej mocy na kołach podczas wykorzystania napędu elektrycznego. Słuszność tych postulatów uzasadnia także to, że najczęściej ilościowy udział ruchu miejskiego jest przeważający w ogólnym bilansie ruchu pojazdu [8].

W Europie obecnie 12 krajów (Belgia, Dania, Francja, Grecja, Irlandia, Włochy, Malta, Holandia, Portugalia i Hiszpania) spełnia limity emisji dwutlenku węgla obowiązujące od 2015 roku (poniżej 130 g/km). Holandia i Grecja mają tę emisję najmniejszą, odpowiednio 109,1 i 111,9 g/km [9].

Emisja dwutlenku węgla z pojazdów jest ściśle powiązana z ich masą. Docelowe wartości wyznaczone na 2020 rok (90 g/km) oznaczają konieczność ograniczenia emisji o około 27% (rys. 1).

Sprzedaż pojazdów hybrydowych rozpoczęła się w Japonii w 1997 roku – sprzedano wówczas około 300 pojazdów [13]. W latach 2005–2008 największym odbiorcą tych pojazdów był rynek amerykański – ponad 60% (rys. 2). Obecnie udział Europy w sprzedaży pojazdów hybrydowych firmy Toyota wynosi nieco ponad 12% (styczeń–wrzesień 2014 r.), rynek amerykański – około 26%, a japoński – 55%. W latach 2012–2013 sprzedano rocznie ponad 1220 tys. pojazdów hybrydowych tej firmy.

Prace dotyczące pojazdów z układem napędu hybrydowego, oprócz badań drogowych i stanowiskowych [3, 6], obejmują również symulacje związane z optymalizacją takiego układu napędowego. Symulacje dotyczące określenia optymalnych nastaw układów elektrycznych w celu osiągnięcia maksymalnych sprawności [7] wskazują na znaczne oszczędności czasu prowadzenia badań. Badania związane z zarządzaniem układem chłodzenia (strategia nagrzewania) pojazdu Opel Ampera prowadzono z wykorzystaniem oprogramowania GT-Suite. Rezultatem było uzyskanie około 15-procentowego zmniejszenia zużycia paliwa w teście NEDC oraz około 80-procentowe zmniejszenie wydzielania ciepła z układu elektrycznego (z wartości 0,5 kWh do 0,1 kWh) przez skrócenie czasu nagrzewania cieczy chłodzącej.

Zwiększenie funkcjonalności pojazdów hybrydowych związane jest również z rozwojem układów przeniesienia napędu. Układy przeniesienia napędu z przekładniami planetarnymi i sprzęgłami pozwalające na różne przełożenia

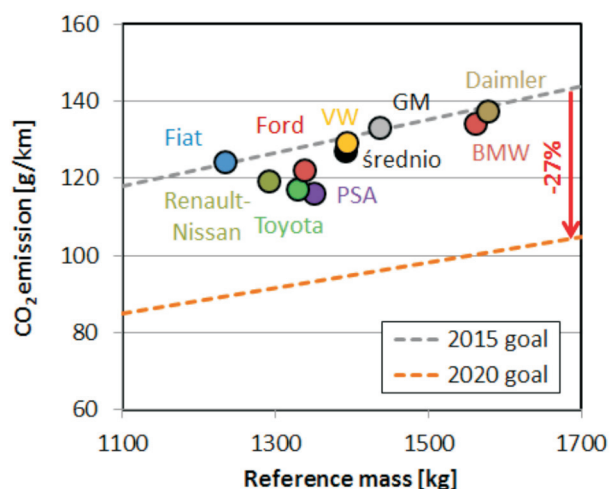


Fig. 1. Carbon dioxide emissions from new vehicles of selected manufacturers in relation to the average weight of the vehicle [4]

Rys. 1. Emisja dwutlenku węgla wybranych producentów z nowych pojazdów odniesiona do średniej masy pojazdu [4]

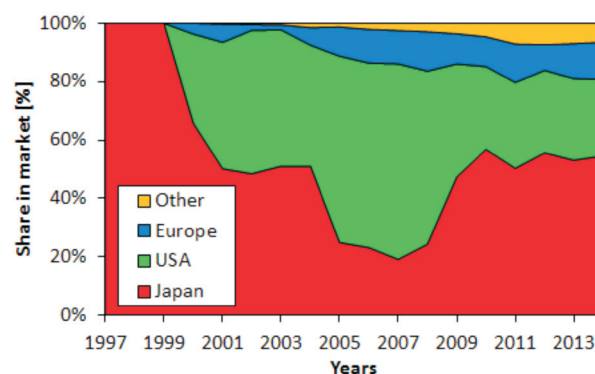


Fig. 2. The share of Toyota in global sale of hybrid vehicles [13]

Rys. 2. Udział sprzedaży pojazdów hybrydowych firmy Toyota na rynkach światowych w ogólnej sprzedaży pojazdów [13]

Suite software. The result was a 15-percent reduction in fuel consumption in the NEDC test and about 80% reduction of heat release from the electric system (reduction from the value of 0.5 kWh to 0.1 kWh) achieved by reducing the time of heating of the cooling liquid.

The increase of the functionality of the hybrid vehicles is also related to the development powertrain systems. The powertrain systems with planetary gears and clutches allowing to achieve different transmissions have already been utilized (Toyota, Lexus, GM); currently, however, are conducted works on increasing the number of the transmissions to more than 7 [5].

Previous papers of the Authors concerning research on hybrid vehicles, involved the indexes of combustion engine operation during the UDC test [1] in different driving conditions [2, 11] and development of combustion engines in such vehicles [10].

The aim of the current study was to indicate the varied operational conditions of the combustion engines and electric motors in hybrid vehicles in urban traffic conditions and their influence on the distribution of the power drawn from both drive systems. Also the influence of traffic conditions on the possibility of discharging and recharging the battery of the hybrid vehicle in electric mode was tested.

## 2. Analysis of the powertrain – planetary gears

The latest generation of the hybrid drive system from Toyota includes two planetary gears (one responsible for power distribution and the other – for increase of the torque value at the output through application of the gear reducing speed of MG2 motor). Such a solution was used originally in Toyota Camry, and now in Toyota Yaris, Auris and Prius (3<sup>rd</sup> generation). In this system the combustion engine, the generator and the planetary gear are in the same configuration as in the previous-generation Toyota Prius (the combustion engine is connected with the yoke of satellite wheels, and the MG1 generator with the sun wheel). The MG2 motor is connected to the sun wheel of the other planetary gear with immobilized yoke of satellite wheels, which is connected with the use of a ring wheel to the first planetary gear (Fig. 3).

The total gear ratios behind a planetary gears  $i_c = z_{12}/z_{11} \times z_{14}/z_{13}$ , ensuing from the utilized gear wheels (no power chain) is respectively  $(77/24) \times (55/54) = 3.27$ . Co-operation of the combustion engine ( $\omega_{cl}$ ) and MG1 generator ( $\omega_{sl}$ ) can be described with the equation [8]:

$$\omega_{cl} = \frac{z_{r1}}{z_{s1} + z_{r1}} \omega_r + \frac{z_{s1}}{z_{s1} + z_{r1}} \omega_{s1} \quad (1)$$

and the speed  $\omega_r$  is not equal to the speed of MG2 motor. The MG2 motor speed ensues from transmission of the other planetary gear, where the engine is connected to the sun wheel. For immobilized yoke of satellite wheels ( $\omega_{c2} = 0$ ) the equation (1) can be as follows:

są już stosowane (Toyota, Lexus, GM), jednak obecnie prowadzi się prace nad zwiększeniem liczby tych przełożeń do ponad 7 [5].

Wcześniejsze prace autorów artykułu w zakresie badania pojazdów hybrydowych dotyczyły wskaźników pracy silnika spalinowego podczas testu UDC [1] i w zróżnicowanych warunkach jazdy [2, 11] oraz rozwoju silników spalinowych w takich pojazdach [10].

Celem bieżących badań było wskazanie zróżnicowanych warunków pracy silników spalinowego i elektrycznego pojazdów hybrydowych w ruchu miejskim oraz ich wpływ na rozdział mocy pobieranej z obu układów napędowych. Badano także wpływ warunków ruchu na możliwości rozładowania i doładowania akumulatorów pojazdu hybrydowego w trybie elektrycznym.

## 2. Analiza układu przeniesienia napędu – przekładnie planetarne

Najnowsza generacja układu napędu hybrydowego firmy Toyota zawiera dwie przekładnie planetarne: jedna jest odpowiedzialna za rozdział mocy, druga – za zwiększenie wartości momentu obrotowego na wyjściu przez zastosowanie przekładni redukującej prędkość obrotową silnika MG2. Rozwiązanie takie zastosowano pierwotnie w Toyocie Camry, a obecnie w Toyotach Yaris, Auris oraz Prius (3. generacji). W układzie tym silnik spalinowy, generator i przekładnia planetarna są w takiej samej konfiguracji jak w poprzedniej generacji Toyoty Prius (silnik spalinowy połączony jest z jazmem kół satelitarnych, a generator MG1 z kołem słonecznym). Silnik MG2 połączony jest z kołem słonecznym drugiej przekładni planetarnej, która ma unieruchomione jazmo satelitów, a połączona jest kołem pierścieniowym z pierwszą przekładnią planetarną (rys. 3).

Przełożenie całkowite za przekładniami planetarnymi  $i_c = z_{12}/z_{11} \times z_{14}/z_{13}$ , wynikające z zastosowanych kół zębatach (brak łańcucha), wynosi odpowiednio  $(77/24) \times (55/54) = 3.27$ . Współpraca silnika spalinowego ( $\omega_{cl}$ ) i generatora MG1 ( $\omega_{sl}$ ) może być opisana równaniem (1) [8], przy czym prędkość  $\omega_r$  nie jest równa prędkości silnika MG2. Prędkość obrotowa silnika MG2 wynika z przełożeń

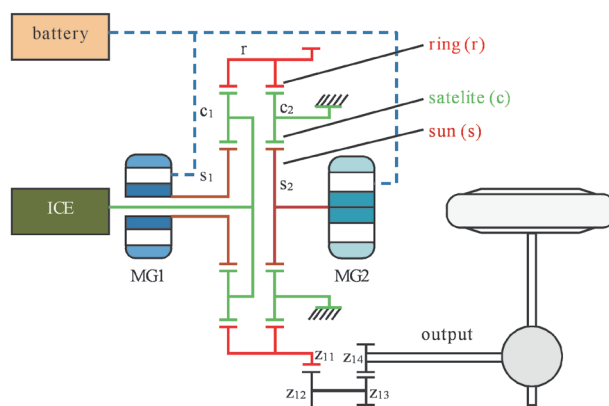


Fig. 3. Two planetary gears of the hybrid drive system utilized in Toyota Camry and Toyota Prius

Rys. 3. Dwie przekładnie planetarne układu napędu hybrydowego zastosowane w Toyocie Camry oraz Toyocie Prius

$$\omega_r = -\frac{z_{s2}}{z_{r2}}\omega_{s2} \quad (2)$$

The total torque transmitted to the wheels can be described by the equation ensuing from the combustion engine torque and the torque of MG2 motor transmitted onto the external ring. The combustion engine torque transmitted to the external ring (for the assumed efficiency = 1) is equal to:

$$M_r = \frac{z_{r1}}{z_{s1} + z_{r1}} M_{ZI} \quad (3)$$

The MG2 motor torque transmitted onto external ring (at immobilized yoke of the satellite wheels) is:

$$M_r = \frac{z_{r2}}{z_{s2}} M_{MG2} \quad (4)$$

During braking the vehicle, the electric machine acts as a generator MG2 (there is negative torque  $M_{MG2}$ ).

The sum of the torques transferred to the vehicle wheels takes into consideration the total transmission of the two additional gears  $i_c$ :

$$M_{wy} = \left( \frac{z_{r1}}{z_{s1} + z_{r1}} M_{ZI} + \frac{z_{r2}}{z_{s2}} M_{MG2} \right) \cdot i_c \quad (5)$$

What it means is, that despite lower total gear ratios compared to the system with one gear, the torque transmitted from the MG2 motor is increased by the ratio of the teeth of the other planetary gear which, as a result, gives heightened value of torque at the wheels. Operation of this gear requires higher torque of the MG2 motor, the maximum speed of which exceeds 13 000 rpm.

### 3. Tested objects – vehicles with hybrid drive systems

Vehicles used in tests are equipped with modern hybrid drive systems with batteries of different types and capacities: Toyota Auris, Toyota Prius+ and Toyota Prius plug-in. In the last two solutions lithium-ion batteries were used. The vehicles have the same combustion engines with engine

drugiej przekładni planetarnej, gdzie silnik ten jest połączony z kołem słonecznym. Przy zablokowanym jarzmie satelitów ( $\omega_{c2} = 0$ ) równanie (1) można zapisać w postaci równania (2).

Całkowity moment obrotowy przenoszony na koła może być opisany równaniem wynikającym z momentu obrotowego silnika spalinowego oraz momentu obrotowego silnika MG2 przenoszonych na pierścień zewnętrzny. Moment obrotowy silnika spalinowego przenoszony na pierścień zewnętrzny (dla przyjętej sprawności równej 1) podano w postaci równania (3).

Moment obrotowy silnika MG2 przenoszony na pierścień zewnętrzny wynosi (przy zablokowanym jarzmie kół satelitarnych) przedstawiono w postaci równania (4).

Podczas hamowania pojazdem, maszyna elektryczna MG2 pełni rolę generatora (występuje wówczas ujemny moment obrotowy  $M_{MG2}$ ).

Suma momentów przenoszonych na koła pojazdu uwzględnia przełożenie całkowite dodatkowych dwóch przekładni  $i_c$  i zapisano je jako równanie (5).

Wynika z tego, że mimo mniejszego przełożenia całkowitego niż w układzie z pojedynczą przekładnią, moment obrotowy przenoszony z silnika MG2 jest zwiększany przez stosunek liczby zębów drugiej przekładni planetarnej, co powoduje, że na kołach uzyskuje się moment o większej wartości. Praca tej przekładni wymaga większej prędkości obrotowej silnika MG2, którego maksymalna prędkość obrotowa przekracza 13 000 obr/min.




### 3. Obiekty badań – pojazdy z hybrydowym układem napędowym

Pojazdy wykorzystane do badań to nowoczesne układy napędu hybrydowego ze zróżnicowanymi typami i pojemnościami akumulatorów: Toyota Auris, Toyota Prius+ oraz Toyota Prius plug-in.

W dwóch ostatnich rozwiązaniach zastosowano akumulatory litowo-jonowe. W pojazdach zastosowano jednakowe silniki spalinowe o objętości skokowej 1,8 dm<sup>3</sup> oraz jednakowe silniki elektryczne o mocy 60 kW. Zastosowanie w tych pojazdach różnych typów akumulatorów wysokonapięciowych umożliwiło zróżnicowanie ich pojemności elektrycznych w znacznym zakresie. Podstawowe dane techniczne pojazdów hybrydowych przedstawiono w tablicy 1.

Table 1. Characteristics of the tested vehicles – hybrid vehicles [12]

Tablica 1. Charakterystyka badanych pojazdów hybrydowych [12]

Size	Toyota Auris Touring	Toyota Prius+	Toyota Prius plug-in
Overview of the vehicle			
Combustion engine	1.8 dm <sup>3</sup> ; 16V, DOHC VVT-i, 73 kW/5200 rpm; 142 N·m/4000 rpm		
Electric motor	60 kW/13 500 rpm; 207 N·m; 650 V		
Batteries	NiMH; 201.6 V; 6.5 A·h; 1.31 kW·h	Li-Ion; 201.6 V; 5 A·h; 1.0 kW·h	Li-Ion; 201.6 V; 21.5 A·h; 4.4 kW·h

displacement of 1.8 dm<sup>3</sup> and the same electric motors with power of 60 kW. Use of different types of high voltage batteries in these vehicles allowed obtain a different ranges of electric capacitance. Basic technical specification of hybrid vehicles is shown in Table 1.

#### 4. Research methodology

The tests of the parameters of vehicles while driving and tests of the conditions of operation of components of the hybrid drive systems were conducted in Warsaw over diversified test routes. Diversified test routes allowed assessment of the operational conditions of a drive system in different, usually non-repeatable conditions. The test routes are shown in Fig. 4. Numbers „1” and „2” represent first or second test run along the same test route. Due to their different lengths, further in the article is presented their comparison in relation to the relative length and relative time of the test run along those routes.

#### 5. Comparison of operational conditions of the drive systems

Diversified test routes were compared in terms of the time of their duration, distance travelled and share of variable traffic conditions. The results of this comparison are shown in Fig. 5. Despite diversified lengths of the routes (from 12 to 20 km), the time of the test runs ranged from 30 min to 40 min (Fig. 5a). This means that different average speeds were obtained, which in turn indicates non-repeat-

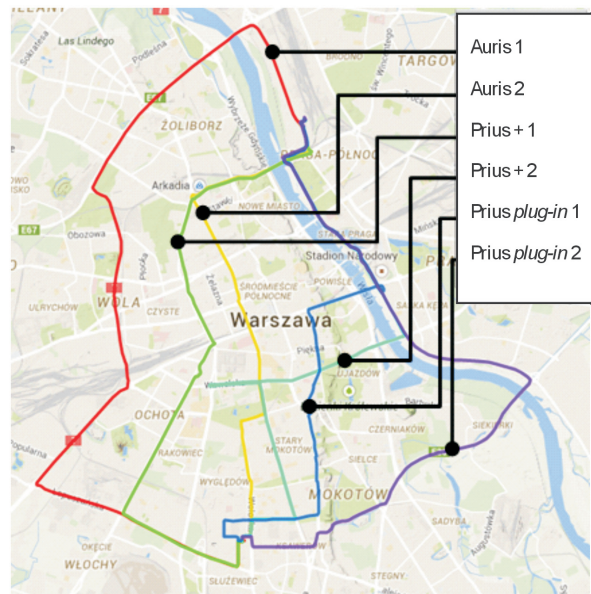


Fig. 4. Test runs of the vehicles with hybrid drive systems

Rys. 4. Trasy przejazdu pojazdami z układami napędu hybrydowego

#### 4. Metodyka badań

Badania parametrów ruchu pojazdów i warunków pracy elementów napędów hybrydowych prowadzono w Warszawie na różnych trasach, co umożliwiało ocenę warunków

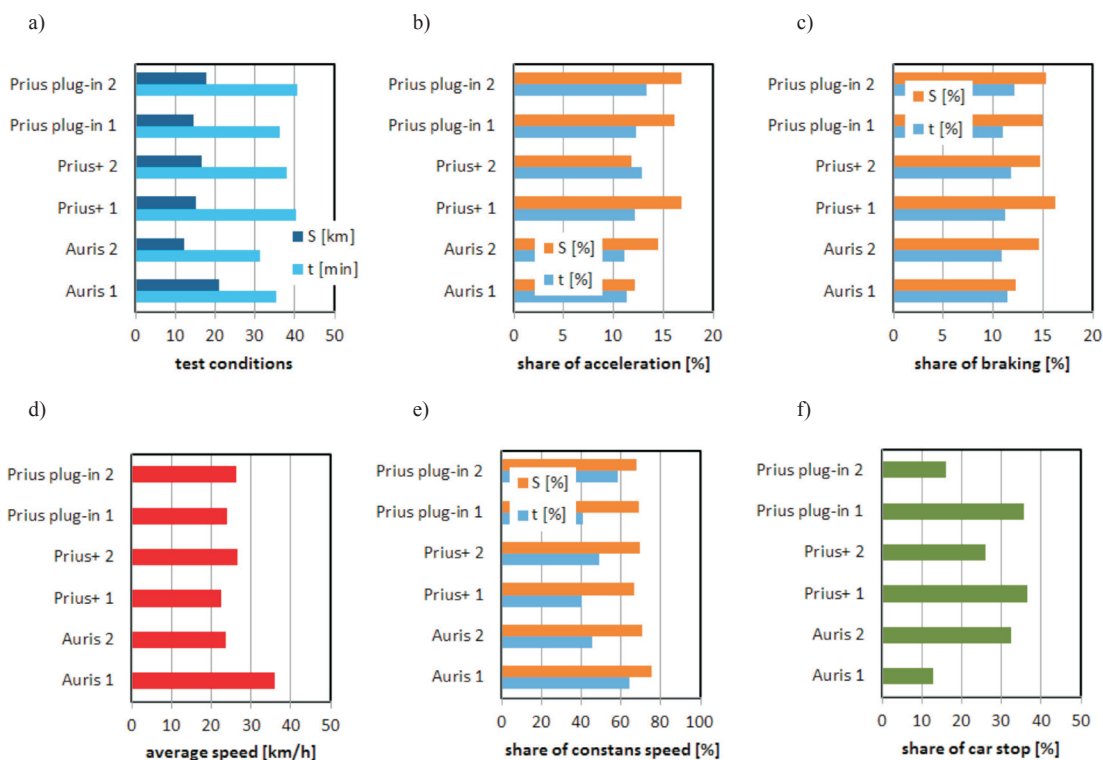


Fig. 5. Analysis of the test routes (numbers „1” and „2” represent respectively first or second test run along the same test route): a) test conditions, b) share time and route of acceleration, c) share time and route of braking, d) average speed, e) share of constant speed, f) share time of car stop in total driving cycle

Rys. 5. Analiza tras przejazdu (wielkości „1” oraz „2” oznaczają odpowiednio pierwszy lub drugi przejazd tej samej trasy): a) warunki testu, b) udział czasu i drogi przyspieszania, c) udział czasu i drogi hamowania, d) średnia prędkość, e) udział stałej prędkości, f) udział czasu zatrzymania, w teście jezdnym

ability of the test routes. Average speeds ranged from 22 to 36 kph (Fig. 5b).

The test routes were analyzed in terms of the time of acceleration, braking and constant driving speed. These parameters were defined as the time elapsing between two successive recorded measurements. It means that the highest shares of vehicle operation time are obtained for the constant driving speed (even though the speeds are not the same, but are specified only along the defined parts of the routes). Similar conditions for calculations were maintained during the analysis of the acceleration and braking phase: these phases have comparable share (Fig. 5c-e). The shares of the vehicle halting time are diverse and range from about 12% to more than 35% (Fig. 5f).

Analysis of operational conditions of the hybrid drive system was made by comparing the operation of the hybrid mode and electric mode. Such conditions are presented in Fig. 6.

From the analysis of Fig. 6 ensues that the share of time of vehicle operation using only electric motor is quite diversified and is not constant. The use of electric drive system can be mainly observed at partial utilization of the power of electric motor. Rapid acceleration requires utilization of the hybrid drive mode. Only during analysis of the operation of a vehicle of plug-in type with

pracy układu napędowego w odmiennych, często niepowtarzalnych warunkach. Trasy przejazdu zaznaczono na rys. 4. Wielkości 1 oraz 2 oznaczają pierwszy lub drugi przejazd tej samej trasy. Ze względu na różne ich długości w dalszej części artykułu porównano je w aspekcie względnej długości oraz względnego czasu ich przejazdu.

## 5. Porównanie warunków pracy układów napędowych

Zróznicowane trasy przejazdu porównano pod względem czasu trwania, długości przebytej drogi oraz udziału zmiennych warunków ruchu – wyniki przedstawiono na rys. 5. Mimo zróżnicowanych długości tras (między 12 a 20 km) czas ich przejazdu wynosił 30 min – 40 min (rys. 5a). Oznacza to uzyskanie różnych prędkości średnich, co wskazuje na niepowtarzalność tras przejazdowych. Średnie prędkości wynosiły od 22 do 36 km/h (rys. 5b).

Trasy przejazdu analizowano pod względem czasów przyspieszania, hamowania i stałej prędkości jazdy. Wielkości te wyznaczono jako czasy między dwoma kolejnymi rejestrowanymi pomiarami. Oznacza to, że największe udziały czasu pracy pojazdu uzyskuje się dla stałej prędkości jazdy (mimo że prędkości te nie są jednakowe, a ustalone jedynie w określonych fragmentach tras). Podobne warunki obliczeń zachowano podczas analizy fazy przyspieszania

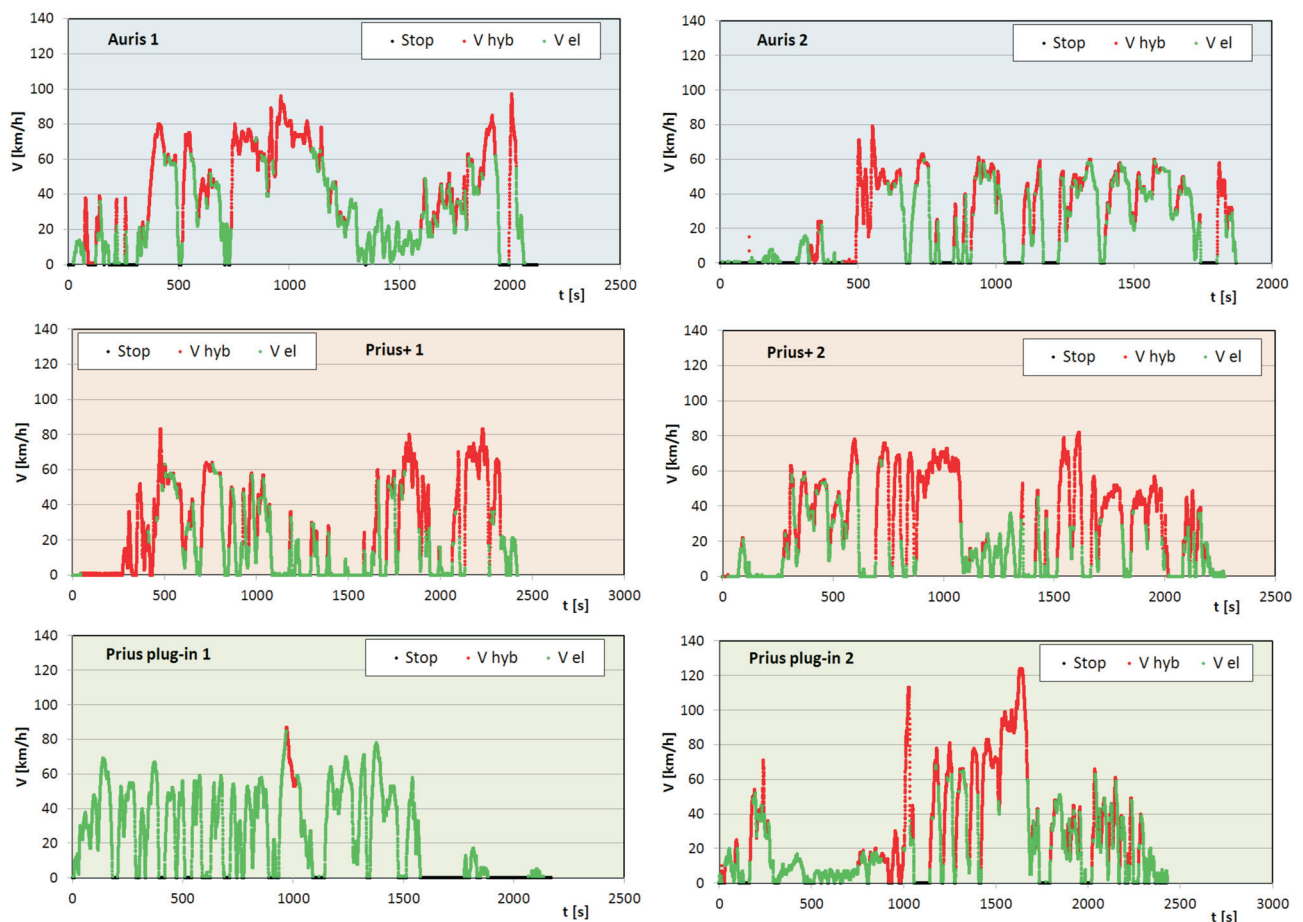


Fig. 6. Comparison of the operational conditions of vehicles in electric and hybrid mode

Rys. 6. Porównanie warunków pracy pojazdów w trybie elektrycznym i hybrydowym

high initial charge level of the batteries (Prius *plug-in* 1), a large part of the test route was travelled with the use of the electric motor.

It should be pointed out, that the share of operation time in electric mode will depend on the capacitance of the battery as well as on its initial charge level and traffic conditions.

## 6. Analysis of the variation of SOC of hybrid vehicles in urban traffic conditions

### 6.1. Analysis of the changes of SOC

Analysis of the changes in the state of charge/discharge of batteries of the hybrid vehicles does not show any explicit

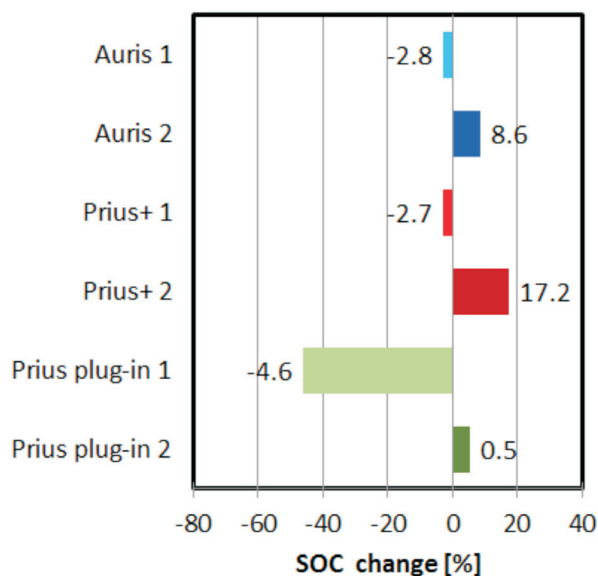


Fig. 7. Change of the total value of SOC during the tests

Rys. 7. Zmiana całkowitej wartości SOC podczas testów

trends in typical urban driving conditions (Fig. 7). It can be observed that for vehicles which might be recharged only while driving, the level of discharge or recharge is not significant and ranges from +17.2% (recharge) to -2.8% (discharge). For vehicles recharged externally the range of discharge is much more significant and amounts to over 45%. This means wide range of application of such vehicles in urban traffic conditions.

Vehicles with typical methods of battery charging (with the use of combustion engine and regenerative braking) show tendency to maintain the level

i hamowania: fazy te mają zbliżone udziały (rys. 5c-e). Udziały czasu zatrzymania pojazdów są zróżnicowane i wynoszą od około 12% do ponad 35% (rys. 5f).

Analizy warunków pracy układów napędu hybrydowego dokonano, porównując pracę trybu hybrydowego oraz trybu elektrycznego. Warunki takie przedstawiono na rys. 6.

Z analizy rysunku 6 wynika, że czas pracy pojazdu z wykorzystaniem tylko napędu elektrycznego jest dość zróżnicowany i nie jest stały. Użycie napędu elektrycznego widoczne jest głównie przy częściowym wykorzystaniu mocy silnika elektrycznego. Gwałtowne przyspieszanie wymaga użycia trybu napędu hybrydowego. Jedynie podczas analizy pracy pojazdu typu *plug-in* przy dużym stopniu początkowego naładowania akumulatorów (Prius *plug-in* 1) można zauważyć znaczną część trasy przejazdu pokonaną z zastosowaniem układu napędu elektrycznego.

Należy więc stwierdzić, że udział czasu pracy w trybie elektrycznym zależeć będzie od pojemności elektrycznej akumulatora, ale również od jego początkowego stanu naładowania i warunków ruchu.

## 6. Analiza zmiany SOC pojazdów hybrydowych w warunkach jazdy miejskiej

### 6.1. Analiza zmian SOC

Analiza zmian wartości stopnia rozładowania/naładowania akumulatorów pojazdów hybrydowych nie wykazuje jednoznacznej tendencji ich ładowania podczas typowych warunków jazdy miejskiej (rys. 7). Można zauważyć, że dla pojazdów o możliwości doładowania akumulatora jedynie podczas jazdy stopień rozładowania lub jego doładowania nie jest duży i wynosi od +17,2% (doładowanie) do -2,8% (rozładowanie). Dla pojazdów ładowanych zewnątrz przedział rozładowania jest znacznie większy i wynosi ponad 45%. Oznacza to duże możliwości wykorzystania takich pojazdów w warunkach jazdy miejskiej.

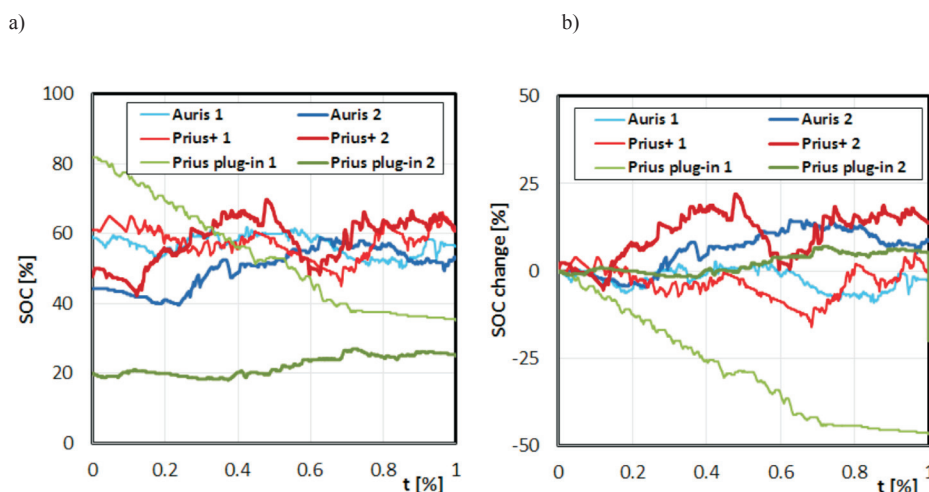


Fig. 8. Conditions of discharging the batteries while driving in urban traffic conditions: a) change in SOC, b) the value of the change in the battery charge level during test run

Rys. 8. Warunki rozładowania akumulatorów podczas jazdy miejskiej: a) zmiana SOC, b) wielkość zmiany naładowania akumulatora podczas jazdy

of charge from 50–60%. Increase in the time of test run allows obtaining such results (Fig. 8a). It is also indicated by the initial state of charge of the batteries which was not adjusted in any way. However, it can be observed that in case of the plug-in system (Prius *plug-in* 1) a battery fully charged enables vehicle operation in the electric mode and achieving insignificant level of charging amounting to a value below 40%. Then the hybrid drive system maintains constant level of charging of the high-voltage batteries. Change of SOC from the initial value (at the beginning of the test) until the end of the test (Fig. 8b) does not indicate any clear tendencies. What is visible, however, is the reduction in amplitude of changes of these values, which implies the optimum utilization of the systems for energy accumulation.

## 6.2. Analysis of energy and power regeneration during braking

The systems for energy accumulation in the hybrid vehicles allow to recharge with the braking energy of the vehicles.

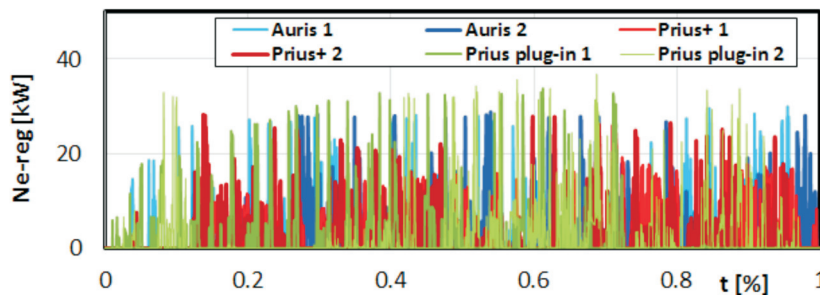


Fig. 9. The values of energy recovered during braking in urban traffic conditions

Rys. 9. Wartości odzyskiwanej mocy podczas hamowania w warunkach jazdy miejskiej

Such high-power regenerative braking can also significantly increase the amount of energy accumulated. Figure 9 shows braking power value during such a process. Regardless of the type of vehicle, the braking power at a level close to 30 kW might be observed (Fig. 9); however, the highest share of the braking power falls within low speeds of the vehicle. For external systems of vehicle recharging (plug-in) the values of power regenerated are higher, although the vehicles were equipped with the electric motors with the same maximum power rating.

The summary values of the regenerated energy during braking are similar and independent of conditions of the test run. They fall within the range from 1.0 kW·h (Toyota Auris 2 – the shortest distance travelled) to 1.5 kW·h (Toyota Auris 1 – the longest distance travelled) – Fig. 10a. A similar tendency of regenerating braking energy should be pointed out – almost linear way of recharging batteries. In Figure

Pojazdy cechujące się typowymi sposobami ładowania akumulatorów (silnikiem spalinowym oraz z wykorzystaniem hamowania odzyskowego) wykazują tendencję do utrzymywania stopnia naładowania w zakresie 50–60%. Zwiększenie czasu przejazdu pozwala na uzyskanie takich wyników (rys. 8a). Świadczy o tym również początkowy stan naładowania akumulatorów, który nie był w żaden sposób regulowany. Można zauważyć, że dla systemu *plug-in* (Prius *plug-in* 1) pełne naładowanie akumulatora umożliwia pracę w trybie elektrycznym pojazdu, (od wartości maksymalnej do uzyskania niewielkiego stopnia naładowania o wartości poniżej 40%). Następnie układ napędu hybrydowego utrzymuje stały poziom naładowania akumulatorów wysokonapięciowych. Zmiana SOC od wartości początkowej podczas rozpoczynania testu do zakończenia testu (rys. 8b) nie wskazuje na występowanie jednoznacznych tendencji rozładowania. Zauważa się natomiast zmniejszenie amplitudy zmian tych wartości, co pozwala uznać optymalne wykorzystanie układów gromadzenia energii.

## 6.2. Analiza odzyskiwania mocy i energii podczas hamowania

Układy gromadzenia energii w pojazdach hybrydowych umożliwiają doładowanie energią z ich hamowania. Takie hamowanie odzyskujące energię (tzw. hamowanie regeneracyjne) może znacząco zwiększyć wielkość tej energii zgromadzonej w akumulatorze. Na rysunku 9 przedstawiono wartości mocy hamowania podczas takiego procesu. Niezależnie od rodzaju pojazdu obserwuje się występowanie mocy hamowania o wartości zbliżonej do 30 kW (rys. 9), jednak

największe wartości mocy hamowania przypadają na małe prędkości pojazdu. Dla zewnętrznego systemu doładowania pojazdów (*plug-in*) wartości odzyskiwanej mocy są największe, mimo że pojazdy wyposażono w silniki elektryczne o takiej samej mocy maksymalnej.

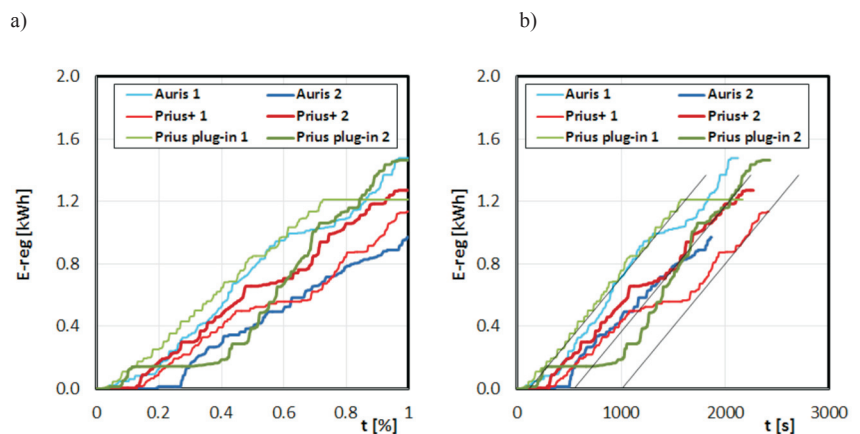


Fig. 10. The values of energy recovered during braking of vehicles in urban traffic conditions: a) as a function of the relative time, b) as a function of test run time

Rys. 10. Wartości odzyskiwanej energii podczas hamowania pojazdów w warunkach jazdy miejskiej: a) jako funkcje względnego czasu, b) jako funkcje czasu przejazdu

10b straight lines were drawn which indicate the identical dependency between the distance travelled and energy regenerated during braking. It means that during 1500 s on average the vehicles recovered 0.8 kW·h of energy during braking in urban traffic conditions.

## 7. Conditions of operation of the combustion engine

Operation of the combustion engine in hybrid drive systems depends on the functionality of such a system. In the micro-hybrid systems the conditions of operation of the engine are the same as for traditional vehicles. In the mild hybrid systems (mild hybrid drive system) [8], a combustion engine is supported by electric motor. It means that the combustion engine operates within typical operational areas. In the full hybrid drive system (full hybrid), the combustion engine operates in areas of the highest efficiency. Such areas of operation of the combustion engines are observed in the tested vehicles (Fig. 11). Analysis of Figure 11 shows that a combustion engine is used for significant loads at low engine speeds and within the full power characteristics. It means high efficiency of engine operation. What can be noticed are the ranges within which the combustion engine does not work – at small loads and high engine speeds.

The number of start-ups of the combustion engine depends on the initial level of battery charge. Regardless of the time of the test run, there might be observed 40 to 60 cycles of the combustion engine start ups. For Toyota Prius plug-in with high initial state of charge (80%) the number of engine start-ups was minimal – amounted to 1. The start up of the combustion engine resulted from high loads (in forced electric mode the combustion engine is not started). Large number of engine start ups means its frequent switching off, but also not very long operation as, which is shown in Fig. 12b, the share of the operation of the stopped engine in the total test run is quite significant. It is about 50 to 60% of the time of the test run. Utilization of the planetary gear for starting up the com-

Łączne wartości odzyskanej energii podczas hamowania są podobne i niezależne od warunków przejazdu. Zawierają się one w granicach od około 1,0 kW·h (Toyota Auris 2 najkrótszy pokonany dystans) do 1,5 kW·h (Toyota Auris 1 najdłuższy pokonany dystans) – rys. 10a. Należy zauważyć podobną tendencję odzyskiwania energii hamowania – prawie liniowy sposób doładowania akumulatorów. Na rysunku 10b poprowadzono linie proste wskazujące na jednakową zależność pokonanej drogi i odzyskanej energii podczas hamowania. Wynika z tego, że średnio pojazdy w trakcie hamowania odzyskują 0,8 kW·h energii podczas pokonywania warunków jazdy miejskiej w czasie 1500 s.

## 7. Warunki pracy silnika spalinowego

Praca silnika spalinowego w układach napędu hybrydowego zależy od funkcjonalności takiego układu. W układach mikrohybrydowych warunki pracy silnika są typowe dla konwencjonalnych pojazdów. W układach mild hybrid (łagodny układ napędu hybrydowego) [8] silnik spalinowy jest wspomagany silnikiem elektrycznym. Wynika z tego, że silnik spalinowy pracuje w typowych obszarach pola pracy. W układach pełnego napędu hybrydowego (*full hybrid*) silnik spalinowy pracuje jedynie w obszarach największej sprawności. Takie właśnie obszary pracy silnika obserwuje się w badanych pojazdach (rys. 11). Z analizy rysunku 11 wynika, że silnik spalinowy jest wykorzystywany w obszarze dużego obciążenia przy małej prędkości obrotowej oraz w zakresie charakterystyki zewnętrznej. Oznacza to dużą sprawność jego pracy. Można zauważyć obszary, w których silnik spalinowy nie pracuje – są to małe obciążenia przy jego dużej prędkości obrotowej.

Liczba uruchomień silnika spalinowego zależy od początkowego stopnia naładowania akumulatora. Obserwuje się, niezależnie od czasu jazdy, około 40–60 cykli uruchomienia silnika spalinowego. Dla pojazdu Toyota Prius *plug-in* z dużym początkowym SOC (80%) liczba uruchomień silnika była minimalna – wynosiła 1. Uruchomienie silnika spalinowego wynikało z dużego obciążenia

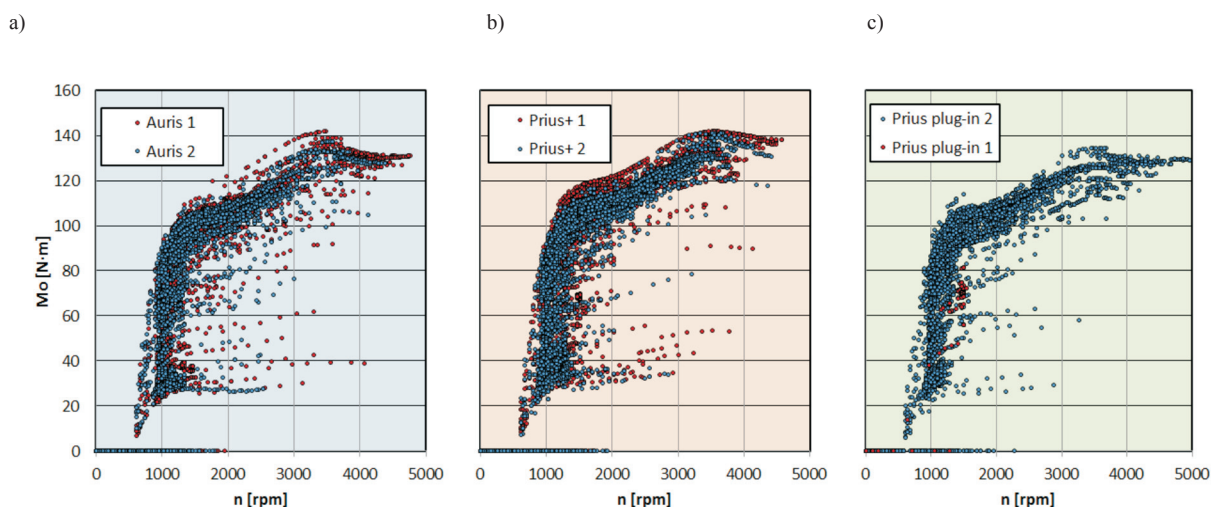


Fig. 11. Operational conditions of the combustion engines of tested hybrid vehicles in urban traffic conditions: a) Auris, b) Prius, c) Prius *plug-in*  
Rys. 11. Warunki pracy silników spalinowych badanych pojazdów hybrydowych w warunkach ruchu miejskiego: a) Auris, b) Prius, c) Prius *plug-in*

bustion engine is beneficial in context of its frequent start-ups. From the data provided in Fig. 12c ensues that the combustion engine is operated every 20 to 27 seconds, regardless of the test run (excluding the test run of the vehicle Toyota Prius *plug-in* with high initial SOC – for which the engine start occurred after 17 minutes due to the large temporary power requirements of the propulsion system).

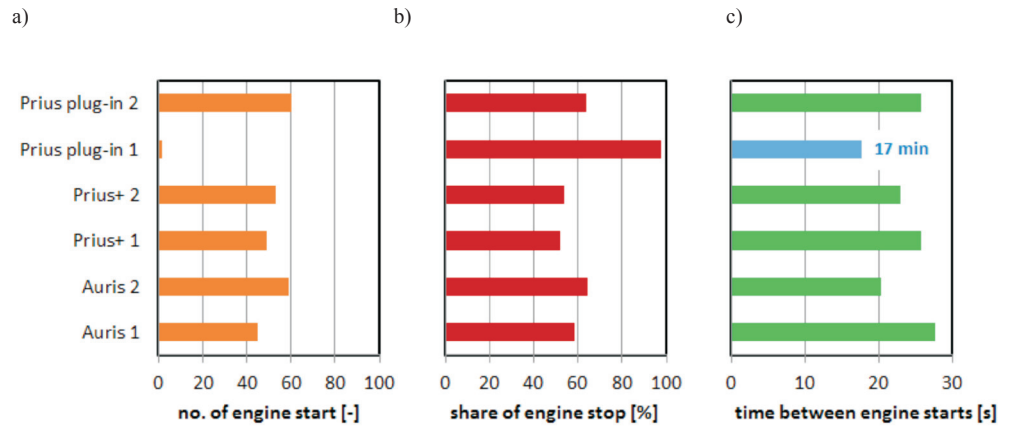


Fig. 12. Utilisation of combustion engine: a) number of start-ups, b) share of the time of engine stoppages, c) the average time between successive start-ups

Rys. 12. Wykorzystanie silnika spalinowego: a) liczba rozruchów, b) udział czasu zatrzymania, c) średni czas między kolejnymi uruchomieniami

## 8. Conditions

### of operation

### of vehicles in electric mode

#### 8.1. Electric motors

Utilized electric motors (MG2) in the tested vehicles with power of 60 kW and 207 N·m allow to generate high values of torque during acceleration of the vehicle. The obtained characteristics of operation of these motors (Fig. 13) indicate that they are not used to the full extent within the range of high speeds (due to the speed limits for vehicles in urban traffic conditions). However, the values of torque for all presented MG2 motors achieved values of the external characteristics, which indicates obtaining the maximum power of these engines (on the decreasing line of the torque).

Maximum values of torque obtained during acceleration of vehicles in urban environment amount to 95–100% of the maximum torque (Fig. 14a). Only for Toyota Prius *plug-in* 2 (test run in hybrid mode with 20% SOC) the values are smaller and amount to about 80% of the maximum torque.

(w wymuszonym trybie elektrycznym silnik ten nie będzie się uruchamiał). Duża liczba uruchomień silnika oznacza jego częste włączanie, ale jednocześnie niezbyt długą pracę, gdyż jak wykazano na rys. 12b udział zatrzymanego silnika w całym przejeździe jest dość znaczny. Wynosi on około 50–60% czasu jazdy. Wykorzystanie przekładni planetarnej do uruchomienia silnika spalinowego jest bardzo korzystne ze względu na częste rozruchy. Z danych zawartych na rys. 12c wynika, że silnik spalinowy jest uruchamiany co około 20–27 s niezależnie od trasy przejazdu (z pominięciem przejazdu pojazdem Toyota Prius *plug-in* z dużym początkowym SOC – dla którego uruchomienie silnika nastąpiło po 17 min ze względu na duże chwilowe zapotrzebowanie na moc układu napędowego).

## 8. Warunki pracy pojazdów w trybie elektrycznym

### 8.1. Silniki elektryczne

Zastosowane silniki elektryczne (MG2) w badanych pojazdach o mocy 60 kW i 207 N·m pozwalają na generowanie

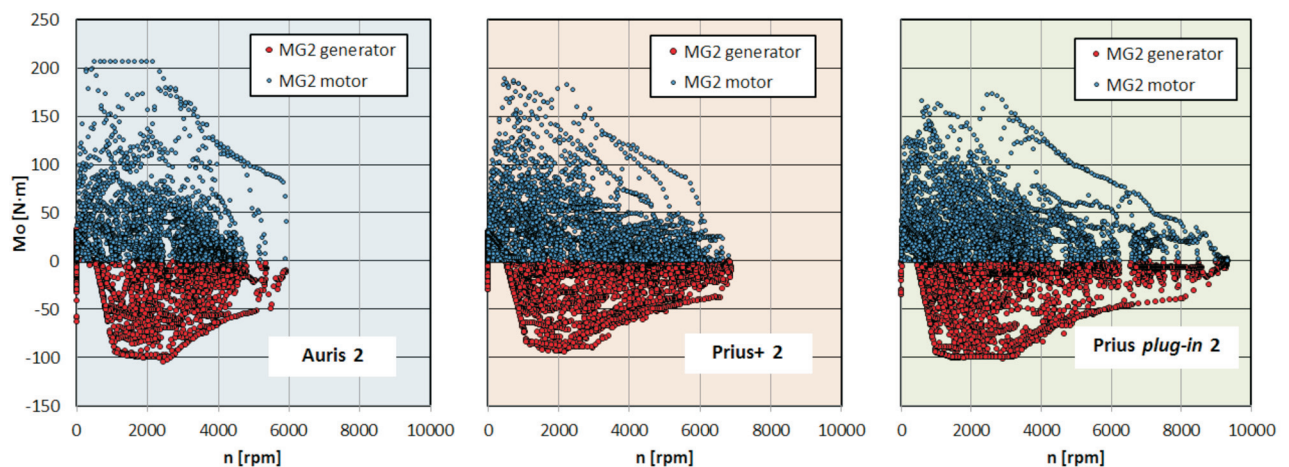


Fig. 13. Conditions of operation of electric motors for engine and generator mode of operation (for test runs of vehicles marked with '2')

Rys. 13. Warunki pracy silników elektrycznych dla pracy silnikowej i generatorowej (dla przejazdów pojazdów oznaczonych numerem 2)

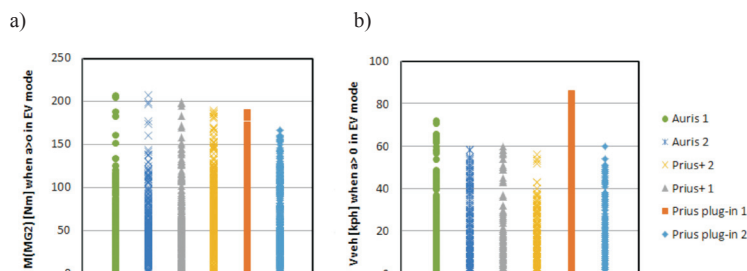


Fig. 14. Use of electric motors for propulsion of vehicles: a) maximum torque during acceleration in electric mode, b) maximum speed of the vehicle in electric mode

Rys. 14. Wykorzystanie silników elektrycznych do napędu pojazdu: moment maksymalny podczas przyspieszania w trybie elektrycznym, b) maksymalna prędkość pojazdu w trybie elektrycznym

Maximum vehicle speeds fall within the range from 60 to 85 kph and are the highest for the vehicle with large capacity of the battery and significant initial level of their charge.

## 8.2. Conditions of operation of vehicles with the use of electric propulsion

Use of different systems for energy accumulation in vehicles offers different possibilities of utilization of the electric propulsion mode in urban traffic conditions. The analysis of the time of operation of a vehicle in electric mode (Fig. 15) indicates about 30% share of this mode in the Toyota Prius+ test run, regardless of the test run. The time of operation in EV was the shortest, which was associated with the smallest electric capacity of the batteries. For Toyota Auris this time amounted to 30–50%. The

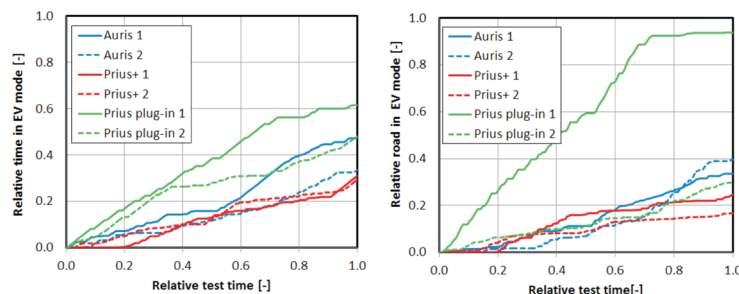


Fig. 15. Conditions of utilization of the electric propulsion mode in urban traffic conditions

Rys. 15. Warunki wykorzystania trybu napędu elektrycznego w ruchu miejskim

longest time of operation in the electric mode was observed for the vehicle with external charging source – plug-in. This time amounts to over 60% of total time of the test run.

The relative share of the distance travelled in urban traffic conditions in electric mode ranges from about 20% (Toyota Auris) to about 40% (Toyota Prius *plug-in*). For a vehicle with a battery charged to maximum, the electric propulsion was utilized during 90% of the travelled distance. This is possible only with fully charged high-voltage batteries.

## 9. Torque and power split device in hybrid vehicles

The applied diagram of the drive system allows summing up the torque derived from the internal combustion engine

dużej wartości momentu obrotowego podczas przyspieszania pojazdu. Uzyskiwane charakterystyki pracy tych silników (rys. 13) wskazują na ich niepełne wykorzystanie w zakresie dużych prędkości obrotowych (ograniczone prędkości pojazdów w jeździe miejskiej). Jednakże wartości momentu obrotowego wszystkich przedstawionych silników MG2 uzyskują wartości charakterystyki zewnętrznej, co wskazuje na otrzymywanie mocy maksymalnych tych silników (na linii opadającego momentu obrotowego).

Maksymalne wartości momentu obrotowego otrzymywane podczas przyspieszania pojazdami w warunkach miejskich uzyskują około 95–100% momentu maksymalnego (rys. 14a). Jedynie dla pojazdu Toyota Prius *plug-in* 2 (przejazd w trybie hybrydowym z 20% SOC) wartości te są mniejsze i wynoszą około 80% momentu maksymalnego.

Maksymalne prędkości pojazdu w trybie elektrycznym wynoszą 60–85 km/h i są największe dla pojazdu z dużą pojemnością akumulatorów i dużym początkowym stopniem ich naładowania.

## 8.2. Warunki pracy pojazdu z wykorzystaniem napędu elektrycznego

Wykorzystanie zróżnicowanych układów gromadzenia energii w pojazdach prowadzi do odmiennych możliwości wykorzystania trybu elektrycznego napędu w warunkach ruchu miejskiego. Analiza czasu pracy pojazdu w trybie elektrycznym (rys. 15) wskazuje na około 30-procentowy udział tego trybu w pojeździe Toyota Prius+, niezależnie od przejazdu. Czas pracy w trybie EV jest najmniejszy, gdyż wynika on z najmniejszej pojemności elektrycznej akumulatorów. Dla pojazdu Toyota Auris czas ten wynosi 30–50%. Największym czasem pracy w trybie elektrycznym dysponuje pojazd z zewnętrznym źródłem ładowania – *plug-in*. Czas ten wynosi ponad 60% całego czasu przejazdu.

Względny udział drogi w ruchu miejskim w trybie elektrycznym wynosi od około 20% (Toyota Auris) do około 40% (Toyota Prius *plug-in*). Dla pojazdu z maksymalnie naładowanym akumulatorem warunki elektrycznego napędu wykorzystano podczas 90% pokonanego dystansu. Jest to możliwe jedynie przy pełnym naładowaniu akumulatorów wysokonapięciowych.

## 9. Rozdział momentu obrotowego i mocy pojazdów hybrydowych

Zastosowany schemat układu napędowego pozwala na sumowanie momentu pochodzącego od silnika spalinowego i silnika elektrycznego zgodnie ze wzorem (5). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 16. Uwzględniono tu tylko wartości przenoszone na pierścień zewnętrzny bez ładowania akumulatorów HV zarówno przez generator MG2 (podczas hamowania) oraz MG1 (zasilany silnikiem spalinowym). Analiza tego rysunku wskazuje na znacznie większe wartości momentu

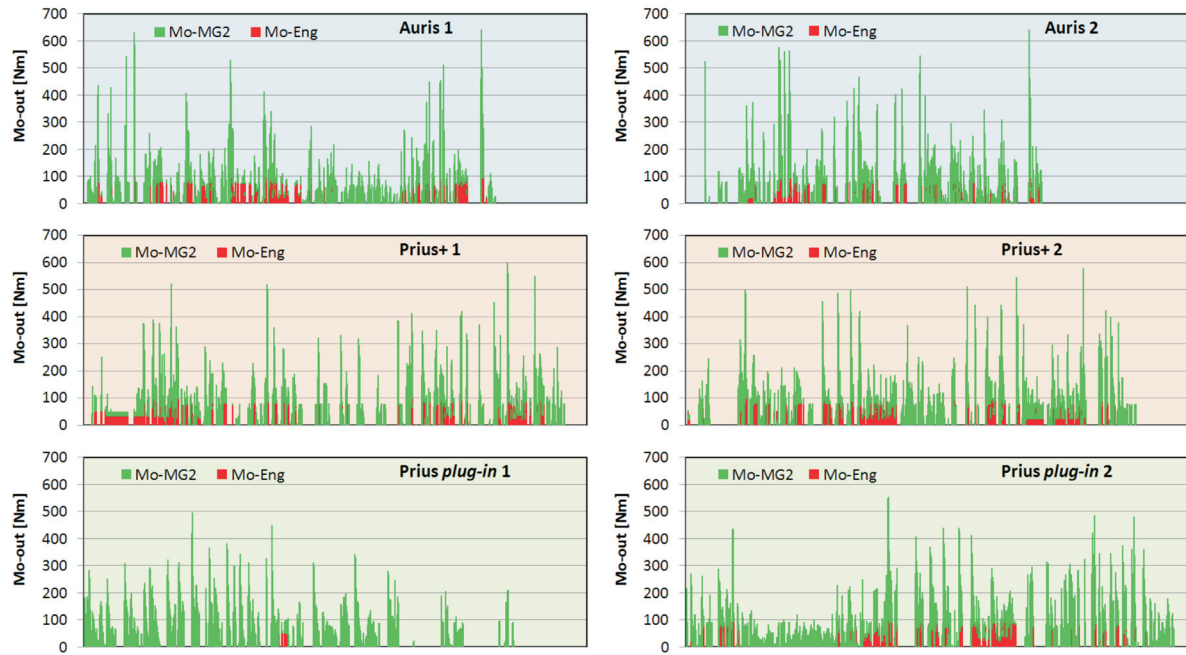


Fig. 16. Values of the torque transmitted by the hybrid drive system (does not include HV battery charging cases: during braking energy recovery and load them from the generator MG1 using the internal combustion engine)

Rys. 16. Wartości momentu obrotowego przenieszonego przez układ napędu hybrydowego (nie uwzględniono przypadków ładowania akumulatorów HV: podczas odzyskiwania energii hamowania oraz ładowania ich z generatora MG1 przy użyciu silnika spalinowego)

and an electric motor in accordance with formula (5). The results of these calculations are shown in Fig. 16. Included here only the values transmitted to the outer ring without charging HV battery by generator MG2 (regenerative braking) and MG1 (powered by an internal combustion engine). Analysis of this figure shows much higher values of the

obrotowego uzyskiwane przez silnik elektryczny (zwiększane z wykorzystaniem przekładni planetarnej) niż przez silnik spalinowy (moment obrotowy tego silnika jest redukowany w tej przekładni). Udział momentu obrotowego silnika spalinowego wynosi przeważnie poniżej 20% całego momentu przekazywanego z przekładni planetarnej na koła pojazdu.

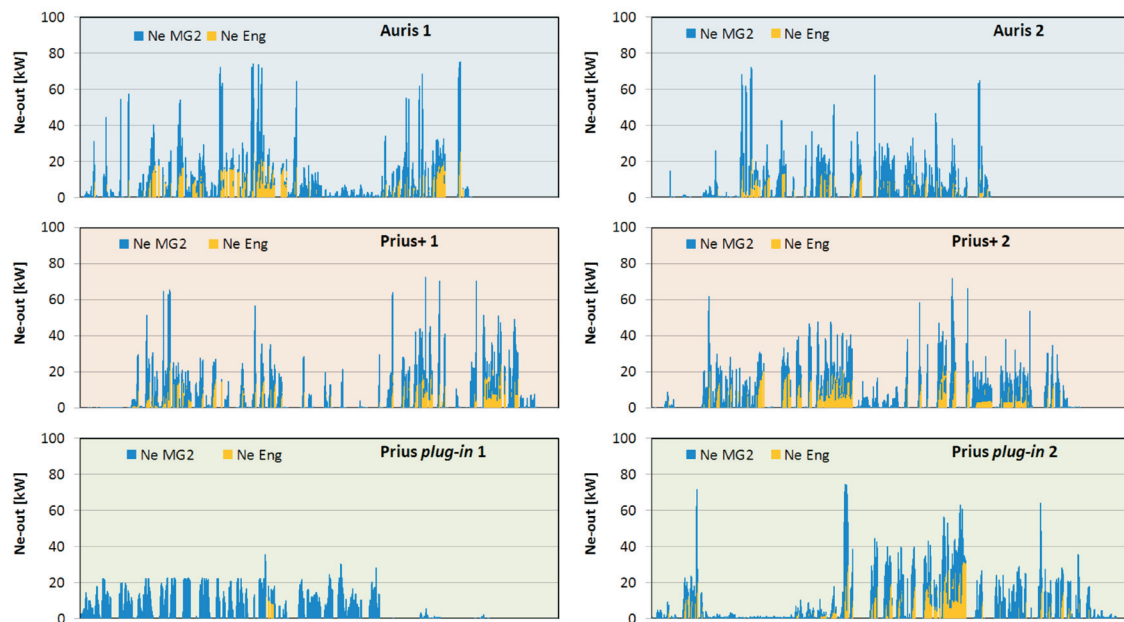


Fig. 17. Values of power on the external ring of the planetary gear transmitted by the hybrid drive system onto the wheels of the vehicle (does not include HV battery charging cases: during braking energy recovery and load them from the generator MG1 using the internal combustion engine)

Rys. 17. Wartości mocy na pierścieniu zewnętrznym przekładni planetarnej przenoszonej przez układ napędu hybrydowego do kół pojazdu (nie uwzględniono przypadków ładowania akumulatorów HV: podczas odzyskiwania energii hamowania oraz ładowania ich z generatora MG1 przy użyciu silnika spalinowego)

torque obtained from the electric motor (increased due to the use of the planetary gear) compared with the combustion engine (the engine torque is reduced at this gear). The share of the combustion engine torque usually amounts to less than 20% of the total torque transmitted from the planetary gear onto the vehicle wheels.

Maximum value of power generated by the hybrid drive system is 100 kW. This value is a result of the planetary gear ratios and characteristics of ICE engine and MG2 motor, whose maximum powers are not derived simultaneously. Analysis of the conditions of operation shows that in traffic conditions is utilized about 80% of maximum power of the system (Fig. 17). The average value is about 40% regardless of conditions of urban traffic and tested vehicle.

Analysis of dependency of the share of distance travelled in electric mode from the initial level of batteries charge shows no such correlation (Fig. 18). It is indicated by a very low value of the coefficient of determination  $R^2$  amounting to 0.30. Similarly, there is no correlation between the time of test run in electric mode and the initial SOC. In this analysis the coefficient of determination amounted to 0.42.

## 10. Conclusions

The presented tests of the hybrid vehicles in urban traffic conditions indicate:

- obtaining a similar discharge value of the batteries, amounting to 50–60%; these values are much higher for vehicles with external battery charging (*plug-in*) and amount to 80%,
- the initial level of battery charge during the test run in urban conditions does not change significantly and amounts to  $\pm 20\%$ ;
- the instantaneous values of recovered power during braking on research section amount to 30 kW, and the energy recovered during braking is on average 1.0–1.5 kW·h,
- operating conditions of the combustion engine include ranges of its high efficiency and concern mainly full power characteristics of the engine (for low and average engine speed),
- the number of start-ups of the combustion engine is quite significant and amounts to about 50 cycles, while the average interval between the start-ups of combustion engine is 20 to 27 s,
- during vehicle acceleration in electric mode is utilized about 95–100% of the maximum torque,
- the tested vehicles in the electric mode achieved the maximum speed of about 60 kph,
- the share of time of utilization of electric mode is significant and ranges from 30% to 60% for vehicle with external charging of the systems for accumulating energy with high initial level of battery charge,
- the share of the torque and power of electric motor is over 80% of the total torque and total power transmitted by the planetary gear onto the wheel of the vehicle – without taking into account the energy balance of the high-voltage battery charging (by the combustion engine and braking recovery by MG2 generator).

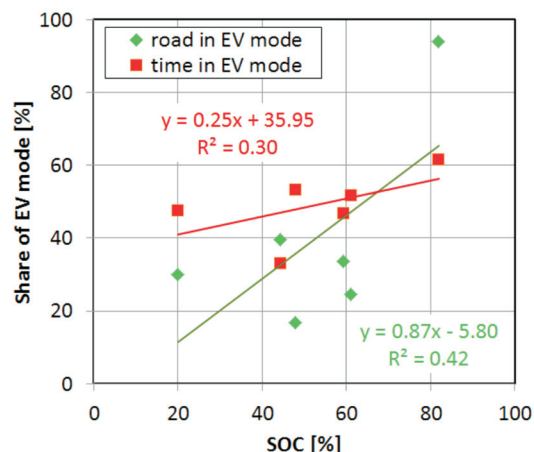


Fig. 18. Dependency of the share of utilization of electric propulsion from the initial level of charge of the high-voltage batteries

Rys. 18. Zależność wykorzystania napędu elektrycznego od początkowego stopnia naładowania akumulatorów wysokonapięciowych

Maksymalna wartość mocy generowana z układu napędu hybrydowego to 100 kW. Wartość ta wynika z doboru przełożeń przekładni planetarnej oraz charakterystyk silników SSP oraz MG2, których moce maksymalne nie są uzyskiwane jednocześnie. Z analizy warunków pracy układów wynika, że w przejazdach miejskich wykorzystuje się około 80% mocy maksymalnej układu (rys. 17). Przeciętna wartość wynosi około 40% niezależnie od warunków ruchu miejskiego i badanego pojazdu.

Analiza udziału drogi pokonanej w trybie elektrycznym od początkowego stopnia naładowania akumulatorów wskazuje na brak takiej korelacji (rys. 18). Potwierdza to bardzo mała wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosząca 0,30. Także brak jest korelacji między czasem jazdy w trybie elektrycznym od początkowego SOC. W tej analizie współczynnik determinacji wynosi 0,42.

## 10. Wnioski

Przedstawione badania pojazdów hybrydowych w warunkach jazdy miejskiej wskazują:

- uzyskanie zbliżonej wartości rozładowania akumulatorów wynosi 50–60%; wartość ta jest znacznie większa dla pojazdów o zewnętrznym ładowaniu akumulatorów (*plug-in*) i wynosi do 80%,
- początkowe naładowanie akumulatorów podczas przejazdu tras miejskich nie ulega znacznym zmianom i wynosi  $\pm 20\%$ ,
- wartości chwilowe odzyskanej mocy podczas hamowania na odcinkach badawczych wynoszą około 30 kW, a energia odzyskana podczas hamowania wynosi średnio 1,0–1,5 kW·h,
- warunki pracy silnika spalinowego obejmują zakresy jego dużej sprawności i dotyczą w znacznej części charakterystyki zewnętrznej silnika (w zakresie małej i średniej prędkości obrotowej),
- liczba rozruchów silnika spalinowego jest dość duża i wynosiła podczas badań około 50 cykli, natomiast średni czas między uruchomieniem silnika spalinowego wynosił 20–27 s,

**Abbreviations and symbols/Skróty i oznaczenia**

z	number of teeth/liczba zębów
$\omega$	angularly speed/prędkość kątowa
MG1	electric motor/generator 1/silnik elektryczny/generator 1
MG2	electric motor /generator 2/silnik elektryczny/generator 2
M, Mo	torque/moment obrotowy
NiMH	nickel-metal hydride battery/akumulator niklowo-wodorkowy
Li-Ion	lithium-ion battery/akumulator litowo-jonowy
SOC	state of charge/stopień naładowania akumulatorów wysokonapięciowych
t	time/czas
P	power/moc
E	energy/energia
n	speed/prędkość obrotowa
EV	electric mode of hybrid vehicle/tryb pracy elektrycznej pojazdu
a	vehicle acceleration/przyspieszenie pojazdu
V <sub>veh</sub>	vehicle speed/prędkość pojazdu

indexes:

s	sun gear/koło słoneczne
c	planet gear/koła satelitarne
r	ring/pierścień zewnętrzny
reg	recuperated/odzyskana

- podczas przyspieszania pojazdem w trybie elektrycznym wykorzystuje się około 95–100% maksymalnego momentu obrotowego,
- pojazdy w trybie elektrycznym uzyskiwały prędkość maksymalną około 60 km/h,
- czas wykorzystania trybu elektrycznego jest znaczny i wynosi od 30% do 60% dla pojazdu o zewnętrznym ładowaniu układów akumulacji energii i dużym początkowym stopniu naładowania akumulatorów,
- moment obrotowy i moc silnika elektrycznego wynosi ponad 80% całego momentu obrotowego i całej mocy przenoszonej przez przekładnię planetarną na koła pojazdu – bez uwzględniania bilansu energii podczas ładowania akumulatorów wysokonapięciowych (przez silnik spalinowy oraz podczas hamowania przez generator MG2).

out	output/wyjście
ZI	combustion engine/silnik spalinowy
1,2	for first and second planetary gear/odnosi się do pierwszej i drugiej przekładni planetarnej

**Bibliography/Literatura**

- [1] Cieślak W., Pielecha I., Szalek A. Indexes of performance of combustion engines in hybrid vehicles during the UDC test. *Combustion Engines*. 2015, 160(1), 11–26. ISSN 2300-9896.
- [2] Cieślak W., Pielecha I., Szalek A., Vanhaelst R. Wpływ naładowania akumulatorów na parametry pracy napędu hybrydowego plug-in w rzeczywistych warunkach ruchu. *Logistyka* 6/2014, 2796-2805, ISSN 1231-5478.
- [3] Disch C., Koch T., Spicher U., Donn C. Engine-in-the-loop as a development tool for emissions optimisation in the hybrid context. *MTZ worldwide*, 2014, 75(10), 40–46, 10.1007/s38313-014-0234-5.
- [4] European vehicle market statistics. Pocketbook 2014. International Council on Clean Transportation Europe. [www.theicct.org](http://www.theicct.org), dostęp z dnia 28.03. 2015.
- [5] Fischer R., Beste F., Yolga M., Fritz W. Seven-mode transmission for plug-in hybrid concepts. *MTZ worldwide*. 2014, 75(12), 10–17, doi: 10.1007/s38313-014-0260-3.
- [6] Hadler J., Kehrwald B., Faubel L., Geisler J. Online methods in the development of hybrid powertrain concepts. *MTZ worldwide*, 2014, 75(10), 32–37, doi: 10.1007/s38313-014-0232-7.
- [7] Krenek T., Bacher C., Raidl G., Lauer T. Numerical optimisation of electro hybrid powertrains. *MTZ worldwide*. 2015, 76(3), 46–52, doi: 10.1007/s38311-015-0007-9.
- [8] Merksiz J., Pielecha I. Układy mechaniczne pojazdów hybrydowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
- [9] Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013. April 2014. [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu), dostęp z dnia 28.03.2015.
- [10] Pielecha I., Cieślak W., Borowski P., Czajka J., Bueschke W. The development of combustion engines for hybrid drive systems. *Combustion Engines*. 2014, 158(3), 23–35. ISSN 2300-9896.
- [11] Pielecha I., Czajka J., Borowski P., Wisłocki K. Operational parameters of hybrid drive system of Toyota Yaris on urban traffic conditions. *Prace Naukowe. Transport. Środki i infrastruktura transportu*. Politechnika Warszawska, 2013, 98, 533–542, ISSN 1230-9265.
- [12] Toyota Motor Poland Ltd. Sp. z o.o. [www.toyota.pl](http://www.toyota.pl) (dostęp z dnia 27.03.2015).
- [13] Toyota Global Newsroom, [newsroom.toyota.co.jp/en/detail/mail/4069183](http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/mail/4069183) (dostęp z dnia 28.03.2015).

Ireneusz Pielecha, DSc., DEng. – professor at the Faculty of Machines and Transport of Poznan University of Technology.

*Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha, prof. PP – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

e-mail: [ireneusz.pielecha@put.poznan.pl](mailto:ireneusz.pielecha@put.poznan.pl)



Wojciech Cieślak, MEng. – postgraduate at the Faculty of Machines and Transportation of Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Wojciech Cieślak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

e-mail: [wojciech.m.cieslik@doctorate.put.poznan.pl](mailto:wojciech.m.cieslik@doctorate.put.poznan.pl)



Andrzej Szalek, DEng. – technical instructor in Toyota and Lexus Academy in Toyota Motor Poland Company Sp. z o. o. in Warsaw.

*Dr inż. Andrzej Szalek – wykładowca Akademii Toyoty i Lexusa w Toyota Motor Poland Company Sp. z o. o. Warszawa.*

e-mail: [andrzej.szalek@toyota.com.pl](mailto:andrzej.szalek@toyota.com.pl)

