

The influence of the velocity profile on the distribution of power flows in a hybrid vehicle

Abstract: This paper presents an overview of currently used solutions for hybrid vehicle designs. It also presents an analysis in the scope of work for the Toyota Prius hybrid system, based on research carried out in urban areas. The ability to save selected parameters of the hybrid as well as a summary of these parameters such as the velocity profile and fuel consumption, allows analyzing the energy consumption in hybrid vehicles. An analysis of the energy consumption provides the diagnosis of the hybrid drive, which allows you to optimize the design of the propulsion, and supports the development of environmental causes.

Keywords: hybrid, energy consumption, flow energy in hybrid, Toyota Prius

Wpływ profilu prędkości na rozdział przepływu mocy w napędzie hybrydowym

Streszczenie: W artykule przedstawiono przegląd rozwiązań konstrukcyjnych napędów hybrydowych obecnie stosowanych. Zaprezentowano analizę zakresów pracy systemu hybrydowego zastosowane w Toyocie Prius w oparciu o przeprowadzone badania podczas jazdy miejskiej. Możliwość zapisu wybranych parametrów pracy napędu hybrydowego i zestawienie ich z parametrami takimi jak profil prędkości i zużycie paliwa umożliwia przeprowadzenie analizy energochłonności pojazdów z napędem hybrydowym. Analiza energochłonności umożliwia diagnostykę napędu hybrydowego, pozwala na optymalizację konstrukcji napędu oraz wspiera rozwój technologii proekologicznych.

Słowa kluczowe: napęd hybrydowy, energochłonność, przepływ energii w napędzie hybrydowym, Toyota Prius

1. Wstęp

Pojazd samochodowy w obecnych czasach, stał się podstawowym środkiem transportu i komunikacji. Trudno wyobrazić sobie dzisiaj funkcjonowanie społeczeństwa bez transportu samochodowego, nawet w krajach ubogich. Pojazdy samochodowe są wytwarzane w coraz większej ilości, modernizowane i ulepszone. Wraz z rozwojem przemysłu motoryzacyjnego i wzrostem ilości pojazdów na świecie pojawiają się problemy takie jak: skażenie środowiska naturalnego, globalne ocieplenie, oraz problemy związane z recyklingiem pojazdów wycofanych z eksploatacji. W krajach rozwiniętych w dzisiejszych czasach aby zaspokoić oczekiwania klientów pojazd musi być nie tylko wygodny, niezawodny i o atrakcyjnym wyglądzie. Takie cechy nie decydują już o rynkowym sukcesie pojazdu. W Japonii przeprowadzono badania potrzeb klientów [1]. Na podstawie tych badań powstał raport opisujący oczekiwania klientów samochodów. Obecnie wśród potrzeb klientów należy wskazać trzy grupy: środowisko i energia, bezpieczeństwo oraz technologie usprawniające prowadzenie samochodu. Tak więc najważniejszym kryterium w niedalekiej przyszłości będzie pojazd przyjazny środowisku naturalnemu, zużywający niewielką ilość paliwa. Aby sprostać wymaganiom klientów producenci pojazdów samochodowych musieli odejść od tradycyjnych form projektowania

pojazdów. Tak więc powstała koncepcja samochodów elektrycznych, pojazdów z napędem hybrydowym i pojazdów zużywających 1 dm³ paliwa na 100 km [1]. Pojazdy hybrydowe obecnie łączą tradycyjny napęd spalinowy z nowatorskimi rozwiązaniami w samochodach elektrycznych. Pojazdy z napędem hybrydowym ponadto umożliwiają rekuperację energii podczas zjeżdżania z pochylenia, lub podczas hamowania, jej magazynowania i wykorzystania do napędu samochodu. Tak więc pojazdy hybrydowe stają się coraz bardziej popularne w krajach rozwiniętych takich jak Stany Zjednoczone, czy Japonia. Obecnie każda licząca się firma samochodowa ma w swojej ofercie pojazd z napędem hybrydowym. Pojazdy hybrydowe z roku na rok mają coraz większą rzeszę klientów i cieszą się rosnącą popularnością. Firma Toyota, która jest pionierem w produkcji seryjnej pojazdów hybrydowych zapowiedziała iż w roku 2020 każdy model będzie oferowany z napędem hybrydowym. Tak więc kierunek rozwoju przyszłych napędów będzie zmierzał do stosowania pojazdów z napędem hybrydowym, natomiast w dużych aglomeracjach miejskich coraz popularniejsze staną się jazdy elektryczne.

2. Rozwiązania konstrukcyjne napędów hybrydowych

Różnorodność obecnie stosowanych napędów hybrydowych wymusza konieczność ich klasyfikacji.

Pod względem funkcjonalnym pojazdy hybrydowe zgodnie z dostępną literaturą [1], można podzielić na następujące grupy:

- **Micro – hybrid** – pojazdy w których po zatrzymaniu wyłączany jest silnik, a po naciśnięciu pedału przyspieszenia silnik jest uruchamiany. Pojazdy te posiadają zablokowany układ rozrusznika z alternatorem. Przedstawicielem tego typu pojazdu, obecnie produkowanym seryjnie, jest Mercedes – Benz klasy A.
- **Mild – hybrid** – w tym rozwiązaniu silnik elektryczny wspomaga podstawowe źródło napędu, czyli silnik spalinowy, w momentach dużego zapotrzebowania na moc np. podczas bardzo intensywnego przyspieszania. Reprezentantem obecnie produkowanym jest Mercedes – Benz klasy S.
- **Full – hybrid** – najbardziej “dojrzała” forma napędu hybrydowego (pełna hybryda). W pojazdach z rozwiązaniami tego typu podstawowym źródłem napędu jest silnik spalinowy współpracujący z silnikiem elektrycznym, generatorem oraz pośrednio akumulatorem. Elementy tego układu współpracują ze sobą w zależności od warunków jazdy tzn. w zależności od realizowanego profilu prędkości przekazując moc na koła napędzane. Bardzo istotną rzeczą w tym napędzie jest możliwość rekuperacji energii w procesie hamowania pojazdu. Najbardziej rozpoznawalnym i znanym przedstawicielem tej grupy pojazdów jest Toyota Prius, która była pierwszym seryjnie produkowanym pojazdem z napędem hybrydowym. Dziś Toyota Prius oferowana jest w mocno zmodernizowanej wersji i III generacji napędu hybrydowego.

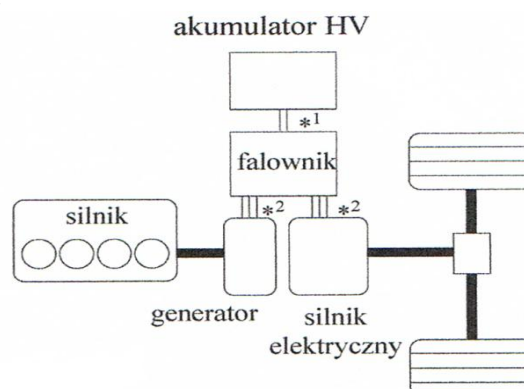
Kolejnym kryterium podziału napędów hybrydowych jest zgodnie z [1] podział ze względu na sposób współpracy silnika spalinowego z silnikiem elektrycznym, generatorem i akumulatorem. Jest to układ szeregowy, równoległy i ewentualnie ich kombinacja. Takie kryterium podziału jest również szeroko opisane w literaturze. [5].

W szeregowym systemie hybrydowym, silnik spalinowy napędza generator. Generator z kolei wytwarza prąd, który przepływając przez falownik, napędza silnik elektryczny przekazujący napęd na koła pojazdu. Taki system napędu może być opisany jako napęd samochodu elektrycznego wyposażonego w generator napędzany silnikiem spalinowym.

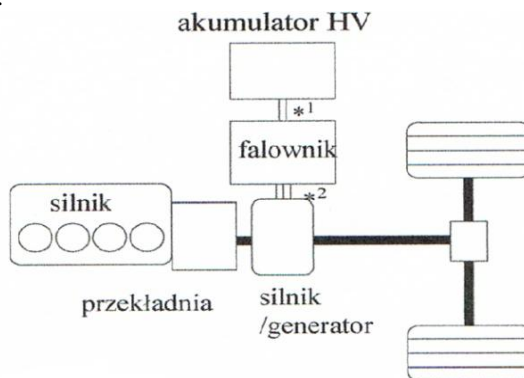
Pojazd wyposażony jest w silnik spalinowy małej mocy, który pracuje praktycznie ze stałą prędkością w zakresie prędkości obrotowej najwyższej sprawności, w celu efektywnego ładowania akumulatora, podczas poruszania się pojazdu [2].

W równoległym systemie hybrydowym wykorzystane są dwa źródła mocy tzn. silnik spalinowy i elektryczny do bezpośredniego napędu kół pojazdu. Dodatkowo w tym systemie generator napędzany przez silnik lub od kół samochodu, w odpowiednich stanach ruchu pojazdu, ładuje akumulator. Na rysunku 1, przedstawiono schematy napędu hybrydowego szeregowego i równoległego.

a.



b.



*1:prąd stały

*2:prąd zmienny

Rys.1.Schemat napędu hybrydowego: szeregowego (a) i równoległego (b) [2]

*1:DC

*2:AC

Fig.1.Hybrid scheme: serial (a) and parallel (b) [2]

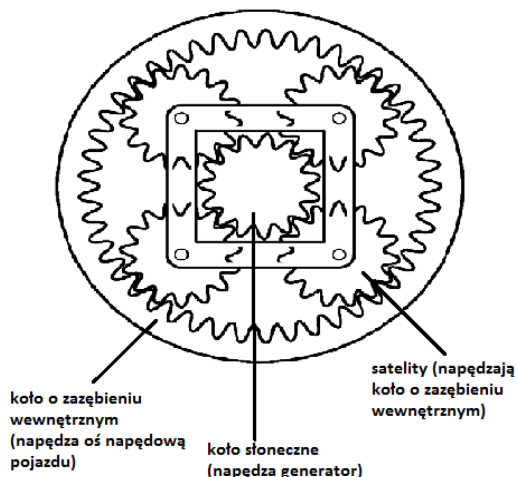
Warto zwrócić uwagę na rozwiązania opisane w literaturze [8,9], gdzie autor przedstawił ideę napędu hybrydowego z wykorzystaniem akumulatorów mechanicznych.

Układ hybrydowy Toyoty składa się z dwóch rodzajów źródeł napędu, tj. silnika spalinowego, (pierwotne źródło energii) oraz dwóch elektrycznych silników-generatorów i węzła sumowania mocy w postaci przekładni planetarnej. Moc z silnika spalinowego, w większości stanów pracy

układu jest rozdzielana przez przekładnie planetarną do napędzania obydwu kół i generatora[4].

3.Przepływ strumienia mocy w pojazdach z napędem hybrydowym

Analizując przepływ strumienia mocy w pojazdach z napędem hybrydowym, należy przedstawić jego poszczególne zakresy pracy. Zostaną one zaprezentowane w oparciu o rozwiązania zastosowane w Toyocie Prius [2].



Rys.2. Przekładnia planetarna [7].
Fig.2. Planetary gear [7].

Najważniejszym elementem napędu hybrydowego o rozdzielonej mocy, a taki jest zastosowany w Toyocie Prius to przekładnia planetarna (rys.2). Moc silnika spalinowego jest rozdzielana w tej przekładni na dwie drogi. Jedna z nich jest drogą mechaniczną, która przez przekładnie zębate może przetransmitować siłę bezpośrednio na koła, natomiast druga jest drogą elektryczną [7].

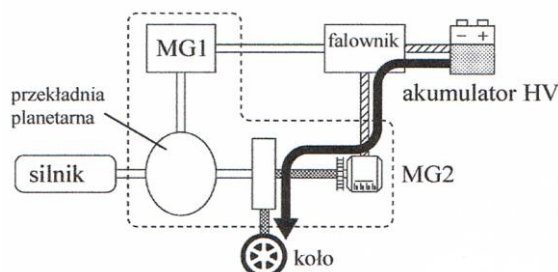
Generator MG1 za pośrednictwem trzeciego wału przekładni planetarnej współpracuje z silnikiem spalinowym oraz układem przeniesienia napędu. Rolą generatora MG1 jest dopasowywanie prędkości obrotowej oraz mocy silnika spalinowego odpowiednio do wymagań układu napędowego w zakresie prędkości obrotowej kół i momentu obrotowego [7]. W przekładni planetarnej prędkość obrotowa dwóch wałów w sposób ciągły zależy od prędkości obrotowej trzeciego wału. W tym układzie przekazywanie mocy drogą mechaniczną jest możliwe tylko wtedy gdy jest napędzany generator wytwarzający moc elektryczną [7]. Generowana moc elektryczna jest magazynowana w akumulatorze i dlatego za pomocą silnika elektrycznego MG2 umieszczonego bezpośrednio na wale napędowym, jest zamykana droga elektryczna, a wytwarzana moc elektryczna jest zamieniana na moc mechaniczną. Pożądana wartość momentu napędowego na

kołach pochodzi od silnika spalinowego i jest przekazywana na koła częściowo drogą mechaniczną, a częściowo drogą elektryczną [7]. Oczekiwana wartość momentu obrotowego z użyciem energii akumulatora może prowadzić do większego lub mniejszego obciążenia silnika spalinowego[7].

Przedstawione poniżej opracowanie zawiera niektóre stany pracy napędu hybrydowego, wprowadzone w celu osiągnięcia najskuteczniejszego przekazywania napędu. Należy zaznaczyć, że w zależności od warunków i sposobu realizacji profilu prędkości stany te zmieniają się dynamicznie, co zostanie zaprezentowane w dalszej części opracowania na podstawie przeprowadzonych badań.

Zakresy pracy system hybrydowego są następujące[2]:

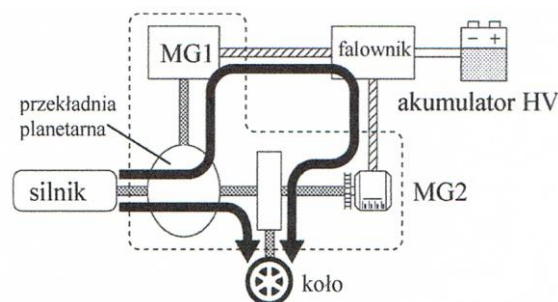
- Silnik elektryczny MG2 jest zasilany mocą akumulatora i napędza koła pojazdu.[rys.3].Silnik spalinowy nie pracuje.



Rys.3. Zakres pracy układu hybrydowego kiedy silnik spalinowy nie pracuje [2].

Fig.3. The operation of the hybrid system when the combustion engine is not running [2].

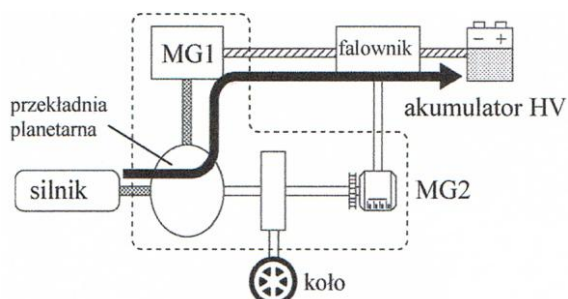
- Silnik spalinowy poprzez przekładnie planetarną napędza koła pojazdu, jak również przekazuje napęd do generatora MG1, który przez falownik przekazuje napięcie zasilające silnik elektryczny MG2, który również napędza koła pojazdu [rys.4].



Rys.4. Zakres pracy układu hybrydowego gdzie silnik spalinowy i elektryczny napędzają koła pojazdu [2].

Fig.4. The operation of the hybrid system where the internal combustion and electric engine drive the wheels [2].

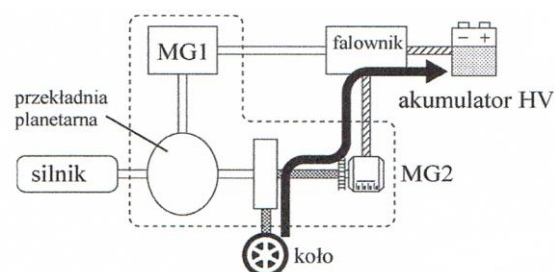
- Silnik spalinowy poprzez przekładnię planetarną napędza generator MG1, który z kolei przez falownik ładuje akumulator. Stan ten występuje podczas uruchamiania napędu, kiedy poziom naładowania akumulatora jest niski [rys.5].



Rys.5. Zakres pracy układu hybrydowego gdzie silnik spalinowy napędza generator ładujący akumulator [2].

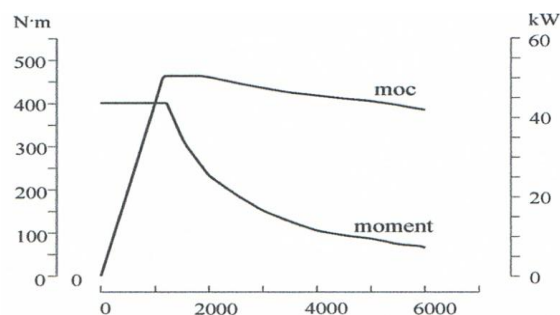
Fig.5. The operation of the hybrid system where the engine drives the generator for the battery charger [2]

- W tym przypadku silnik spalinowy nie pracuje, energia kinetyczna z obracających się kół pojazdu poprzez silnik MG2 zostaje zamieniana na energię elektryczną, którą ładowany jest akumulator. Jest to stan kiedy pojazd realizuje ruch opóźniony i odzyskuje energię [rys.6].



Rys.6. Zakres pracy układu hybrydowego gdzie moment obrotowy z kół pojazdu napędza MG2, który ładuje akumulator [2]

Fig.6. The operation of the hybrid system where the torque from MG2 drives the wheels of the vehicle to recharge the battery [2]

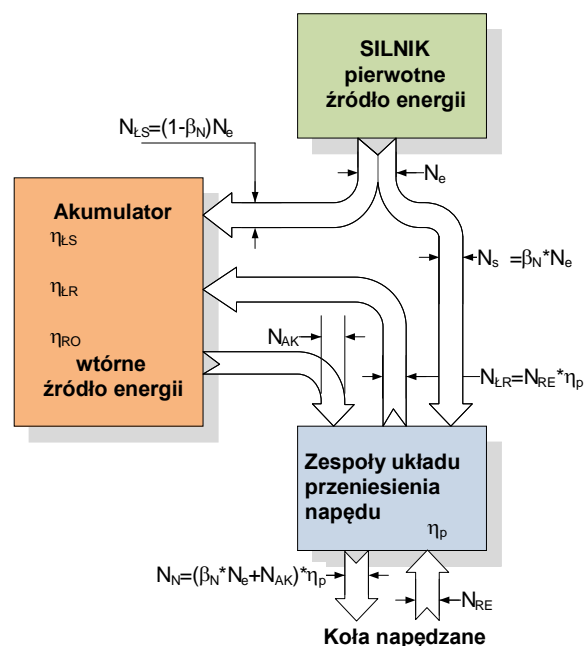


Rys.7. Charakterystyka silnika elektrycznego [2]

Fig.7. Characteristics of the electric motor [2]

Jak wynika z charakterystyki silnika elektrycznego, maksymalny moment obrotowy dostępny jest przy małych obrotach silnika i zaczyna spadać od ok.1500 obr/min.

Analiza przepływu mocy w pojazdach z napędem hybrydowym umożliwia przeprowadzenie analizy energetycznej ruchu samochodu z takim napędem. Uproszczony przebieg strumieni mocy między zespołami układu hybrydowego z silnikiem spalinowym, jako pierwotnym źródłem energii przedstawiono na [rys.8].



Rys.8. Uproszczony przebieg strumieni mocy w pojeździe z napędem hybrydowym.[3]

Fig.8. A simplified flow process of the power in a hybrid vehicle.[3]

Na rysunku przedstawiono sprawności, uwzględniające straty energetyczne podczas przepływu mocy.

Tak, więc:

- η_{LS} – sprawność ładowania akumulatora z silnika spalinowego
- η_{LR} – sprawność ładowania akumulatora z układu rekuperacji
- η_p – sprawność układu przeniesienia napędu
- η_{RO} – sprawność rozładowania akumulatora

N_e – moc użyteczna silnika, N_s – moc dostarczana do napędu kół, N_L – moc jako nadwyżka jest mocą ładowania akumulatora.

Stosunek mocy skierowanej na koła N_s , do mocy użytecznej silnika N_e zdefiniowany jest, jako współczynnik rozdziału mocy silnika β .

Zależnie od zapotrzebowania mocy na kołach można wyróżnić następujące przypadki, opisane poniżej[3].

1. Moc użyteczna silnika jest w całości doprowadzana do układu przeniesienia napędu. W tym

przypadku $N_e=N_s$. W tym przypadku przy stałej prędkości pojazdu moc oporów podstawowych w fazie ruchu ustalonego jest równa iloczynowi mocy użytecznej i sprawności układu przeniesienia napędu.

$$(N_{TP})_u=N_e\eta_p$$

2. Moc użyteczna silnika jest w całości wykorzystana do ładowania akumulatora. Przypadek taki może mieć miejsce np. podczas pracy silnika na postoju. W tym przypadku $N_e=N_L$.

3. W tym przypadku silnik przekazuje moc do układu przeniesienia napędu, jak również ładuje akumulator. Ten przypadek ma miejsce, gdy zapotrzebowanie mocy na kołach jest mniejsze od jej wartości maksymalnej.

Tak, więc:

$$N_e=N_s+N_{LS}$$

$$N_s=\beta_N N_e$$

$$N_{LS}=(1-\beta_N)N_e$$

Gdzie:

N_e - moc użyteczna

N_{LS} - moc doprowadzona z silnika do akumulatora

N_s - moc z silnika doprowadzona do układu przeniesienia napędu

Przy jednoczesnym doprowadzeniu mocy z silnika i z akumulatora moc napędową na kołach można przedstawić następująco.

$$N_N=(\beta_N N_e+N_{AK})\eta_p$$

gdzie N_{AK} -moc doprowadzona z akumulatora do układu przeniesienia napędu.

Moc doprowadzana z kół samochodu przez układ przeniesienia napędu do akumulatora można przedstawić w następującej formie.

$$N_{LR}=N_{RE}\eta_p$$

Sytuacja taka ma miejsce podczas fazy hamowania z rekuperacją energii.

Akumulator w następstwie ładowania z obu źródeł z uwzględnieniem strat dysponuje następującą mocą:

$$N_{LC}=(1-\beta_S)N_e\eta_{LS}+N_{RE}\eta_p\eta_{LR}$$

Gdzie:

N_{LC} - całkowita moc doprowadzona do akumulatora

N_{LR} - moc doprowadzona do akumulatora w następstwie rekuperacji energii hamowania

N_{RE} - moc doprowadzona z kół do układu przeniesienia napędu w następstwie rekuperacji energii hamowania

4. Badanie przepływu strumienia mocy w zależności od profile prędkości

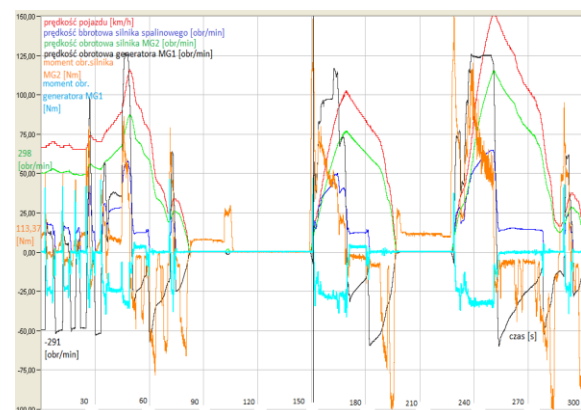
Badanie przepływu strumienia mocy w pojazdach hybrydowych zostało przeprowadzone na pojeździe Toyota Prius III generacji za pomocą urządzenia diagnostycznego inteligent II. Badanie zostało przeprowadzone podczas jazdy miejskiej po ulicach Warszawy. Tak więc badanie strumienia przepływu mocy zostało przeprowadzone w różnorodnych warunkach pracy napędu hybrydowego tj.

podczas przyspieszania, postoju, hamowania, jazdy ze zmienną prędkością, oraz jazdy do tyłu.

Podczas badania zapisano parametry profilu prędkości trwającego 300 s. Parametry zarejestrowane podczas badania zostały opisane poniżej. Przeprowadzono dwie próby, każda z nich po 300 s.

Wśród parametrów mierzonych podczas badania znajdują się:

- czujnik położenia pedału przyspieszenia nr.1 i nr.2. Wartości podane są w [%]. W pojeździe znajdują się dwa czujniki, z uwagi na wyeliminowanie skutków usterki jednego z nich. Z czujników wychodzą dwa sygnały, oba mają różne charakterystyki.
- stopień położenia pedału przyspieszenia podany w [%].
- wzmocnienie napięcia z akumulatora do falownika wyrażone w [%].
- obciążenie silnika spalinowego wyrażone w [%]. Parametr ten przedstawia procent wypełnienia cylindrów powietrzem i jest liczony na podstawie informacji z przepływomierza.
- prędkość obrotowa silnika spalinowego wyrażana w [obr/min].
- wykonany moment obrotowy generatora MG1 wyrażony w [Nm].
- prędkość obrotowa generatora MG1 wyrażona w [obr/min].
- założony moment obrotowy generatora MG1 [Nm].
- wykonany moment obrotowy silnika MG2 [Nm].
- prędkość obrotowa silnika MG2 [obr/min].
- założony moment obrotowy silnika MG2 [Nm].
- obciążenie z akumulatora. Parametr ten opisuje natężenie prądu pobieranego z akumulatora w [A].
- moment obrotowy hamowania regeneracyjnego [Nm]. Moment obrotowy z rekuperacji energii na zawsze wartość ujemną.
- prędkość pojazdu [km/h].



Rys.9. Zapis parametrów pojazdu hybrydowego podczas jazdy

Fig.9. Recording of hybrid vehicle parameters whilst driving

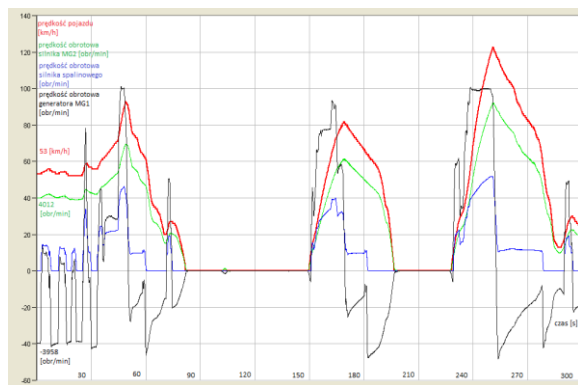
Rysunek ten przedstawia przebiegi następujących parametrów:

- prędkość pojazdu – kolor czerwony na wykresie.
- prędkość obrotową silnika – kolor ciemno niebieski.
- prędkość obrotową silnika MG2 – kolor zielony.
- prędkość obrotową silnika MG1 – kolor szary.
- wykonany moment obrotowy generatora MG1 – kolor czarny.
- wykonany moment obrotowy silnika MG2 – kolor pomarańczowy.

Są to tylko wybrane parametry pracy układu hybrydowego. Przedstawienie wszystkich mierzonych parametrów na jednym wykresie wiąże się ze zmniejszeniem czytelności wykresu, tak, więc do szczegółowej analizy należy zestawiać ze sobą dwa do maksymalnie trzech parametrów.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż w przypadku, kiedy prędkość obrotowa i moment obrotowy występują ze znakiem dodatnim urządzenie jest silnikiem, w odwrotnym przypadku jest hamulcem.

Parametry zmieniają się dynamicznie, dlatego też przedstawienie parametrów na jednym wykresie pokazuje zależności pomiędzy nimi.

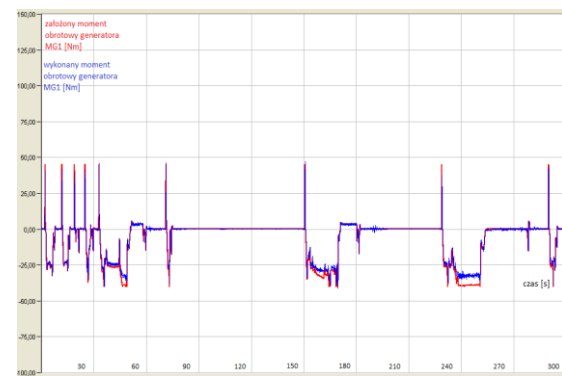


Rys.10. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: prędkość pojazdu, prędkość obrotowa silnika spalinowego, prędkość obrotowa silnika elektrycznego MG2, prędkość obrotowa generatora MG1.

Fig.10. Recording of operating parameters of the hybrid system: vehicle speed, engine speed, electric engine speed MG2, speed generator MG1

Na powyższym rysunku przedstawione są przebiegi prędkości pojazdu, prędkości obrotowej silnika MG2 i generatora MG1, oraz prędkości obrotowej silnika spalinowego. Na rysunku wyraźnie widać korelację pomiędzy wykresem prędkości samochodu i prędkości obrotowej silnika elektrycznego MG2. Zmiana jednej wartości pociąga za sobą zmianę drugiej, przy czym jest to zależność dodatnia. Ponadto można zauważyć, że prędkość pojazdu wyrażona w [km/h] (kolor czerwony) i prędkość obrotowa silnika MG2 wyrażona w [obr/min] (kolor zielony), są w ścisłej relacji wynikającej ze stałego przełożenia kinematycznego, stąd amplitu-

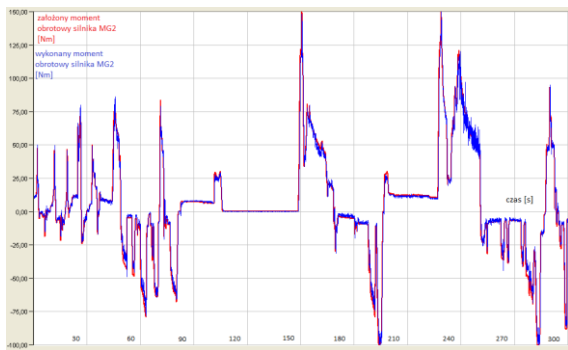
dy zmian (ich wartości względne) muszą być również takie same. Wyraźnie widać, że spośród parametrów przedstawionych na wykresie tylko prędkość obrotowa generatora MG1 przyjmuje zarówno wartości dodatnie jak i ujemne. Generator MG1 jest napędzany przez silnik spalinowy i generuje on wysokie napięcie elektryczne, które może być wykorzystane do napędu silnika MG2 lub ładowania akumulatora. Należy zaznaczyć, że generator MG1 jest wykorzystany również, jako rozrusznik silnika spalinowego. Pierwsza część wykresu przedstawia łagodne przyspieszanie pojazdu od prędkości ok.53 km/h. W tym przypadku przekładnia planetarna rozdziela siłę napędową kół, część do napędu generatora MG1, który moc elektryczną przez falownik przekazuje do MG2, a ten z kolei do kół pojazdu. Generator MG1 posiada obroty ujemne podczas hamowania silnikiem, co można zauważyć podczas przebiegu profilu prędkości na powyższym rysunku. Zmiana kierunku obrotów następuje wraz ze zmianą prędkości pojazdu, jak również prędkości obrotowej silnika MG2.



Rys.11.Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: przebieg momentu obrotowego generatora MG1 założonego i wykonanego.

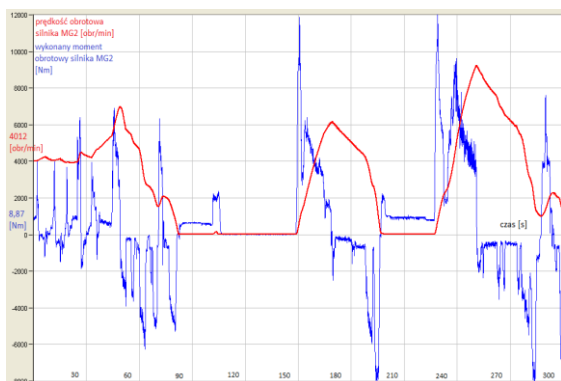
Fig.11. Recording of operating parameters of the hybrid system: the generator torque curve MG1 established and made

Na rysunku przedstawiono przebieg założonego i wykonanego momentu obrotowego generatora MG1.Wykres momentu założonego oznaczony jest kolorem czerwonym, natomiast wykres momentu wykonanego oznaczono kolorem niebieskim. Według informacji producenta pojazdu moment wykonany może mieć wartość inną od założonego +/- 20%, co widać w pewnych okresach przebiegu na wykresie.



Rys.12. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: przebieg momentu obrotowego generatora MG2 założonego i wykonanego.
Fig.12. Recording of operating parameters of the hybrid system: the generator torque curve MG2 established and made.

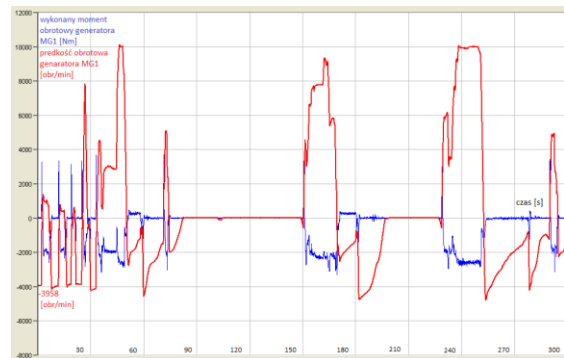
Na rysunku przedstawiono przebiegi wykonanego i założonego momentu obrotowego silnika elektrycznego MG2. Przebieg momentu wykonanego jest przedstawiony kolorem niebieskim, natomiast przebieg momentu założonego jest przedstawiony kolorem czerwonym. Jak widać na powyższym rysunku przebiegi momentu wykonanego i założonego pokrywają się. Moment obrotowy założony jest zapisywany podczas jazdy zależnie od warunków eksploatacji pojazdu.



Rys.13. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: przebieg wykonanego momentu obrotowego silnika elektrycznego MG2 i prędkości obrotowej silnika MG2.
Fig.13. Recording of operating parameters for the hybrid system: progress made with an electric motor torque and speed MG2 motor

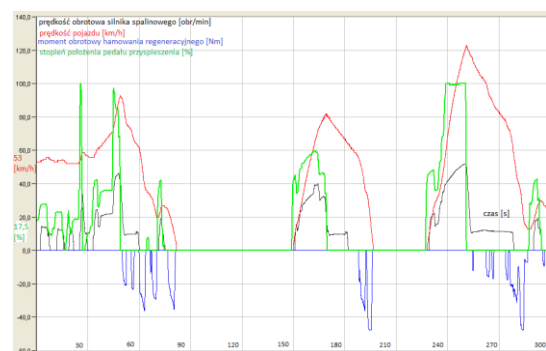
Na rysunku przedstawiono przebiegi prędkości obrotowej i wykonanego momentu obrotowego silnika MG2. Kolor niebieski oznacza moment obrotowy, natomiast kolor czerwony prędkość obrotową silnika MG2. W przypadku zwiększania momentu obrotowego silnika elektrycznego MG2 zwiększa się również prędkość obrotowa, w przypadku zmniejszenia prędkości obrotowej silnika

elektrycznego MG2 zmienia się również wartość momentu obrotowego. Na rysunku tym wyraźnie widać, kiedy silnik elektryczny MG2 działa jako silnik, a kiedy jako hamulec.



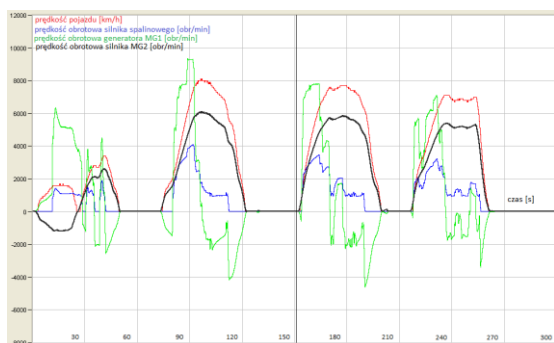
Rys.14. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: przebieg wykonanego momentu obrotowego generatora MG1 i przebieg prędkości obrotowej generatora MG1.
Fig.14. Recording of operating parameters for the hybrid system: progress made generator MG1 torque and speed run

Powyższy rysunek przedstawia przebieg prędkości obrotowej i momentu obrotowego generatora MG1. Kolor czerwony oznacza przebieg prędkości obrotowej, natomiast kolorem niebieskim oznaczony jest przebieg momentu obrotowego. Generator MG1, ładuje akumulator oraz dostarcza energię elektryczną do napędu silnika elektrycznego MG2. Ilość generowanej mocy elektrycznej zależy od prędkości obrotowej generatora a ta zależy od stanu pracy układu hybrydowego. W tym miejscu należy podkreślić, że generator MG1 jest również używany jako rozrusznik silnika spalinowego.



Rys.15. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego: prędkość obrotowa silnika spalinowego, prędkość pojazdu, moment obrotowy hamowania regeneracyjnego, stopień położenia pedału przyspieszenia.
Fig.15. Recording of parameters for a hybrid systems: engine speed, vehicle speed, regenerative brake torque, throttle position level

Rysunek 15 przedstawia zależności pomiędzy prędkością obrotową silnika spalinowego (kolor czarny) [obr/min], prędkością pojazdu (kolor czerwony) [km/h], momentem obrotowym hamowania regeneracyjnego (kolor niebieski) [Nm], oraz stopień położenia pedału przyspieszenia (kolor zielony) [%]. Na wykresie wyraźnie widać zależność pomiędzy prędkością obrotową silnika spalinowego i prędkością pojazdu. Wzrost prędkości obrotowej silnika jest ściśle związany i ustalany za pomocą prędkości obrotowej generatora MG1. Przebieg wykresu położenia pedału przyspieszenia jest ściśle związany z prędkością obrotową silnika spalinowego (kolor zielony i kolor czarny wykresu). W przypadku pojazdów z napędem hybrydowym bardzo istotnym parametrem jest moment hamowania regeneracyjnego. Na wykresie wyraźnie widać, że parametr ten posiada zawsze wartość ujemną. Jest to więc parametr, który występuje podczas ruchu opóźnionego pojazdu. Należy zauważyć, że największe wartości przyjmuje podczas intensywnego opóźnienia prędkości pojazdu. Wykres prędkości o bardziej pionowym spadku powoduje, że wartość momentu hamowania regeneracyjnego ma największą wartość.



Rys.16. Zapis parametrów pracy układu hybrydowego podczas drugiej próby: prędkość jazdy samochodu, prędkość obrotowa silnika spalinowego, prędkość obrotowa silnika elektrycznego MG2 i prędkość obrotowa generatora MG1

Fig.16. Recording of operating parameters for the hybrid system on a second attempt: the speed of the car, engine speed, the rotational speed of the electric motor MG2 and MG1 speed generator

Powyższy rysunek przedstawia wyniki pomiaru podczas drugiej próby. Na wykresie przedstawiono następujące parametry: prędkość pojazdu (kolor czerwony) [km/h], prędkość obrotową silnika spalinowego (kolor niebieski) [obr/min], prędkość obrotową generatora MG1 (kolor zielony) [obr/min], oraz prędkość obrotową silnika elektrycznego MG2 (kolor czarny) [obr /min]. Na uwagę zasługuje pierwsza część wykresu, gdzie silnik elektryczny MG2 posiada ujemną prędkość obrotową. Świadczy to o jeździe pojazdu do tyłu. Podczas jazdy do tyłu prędkość pojazdu rośnie (czerwony wykres), oraz

proporcjonalnie do obrotów silnika elektrycznego MG2, rosną obroty generatora MG1 (kolor zielony), ale należy zauważyć, że rosną one proporcjonalnie do pewnego momentu. Przelomowym momentem, wiążącym się z gwałtownym wzrostem prędkości obrotowej generatora MG1 jest moment uruchomienia silnika elektrycznego (wykres niebieski). W pierwszej fazie jazdy do tyłu, pojazd jest napędzany tylko i wyłącznie silnikiem elektrycznym MG2. Świadczy o tym kierunek obrotów silnika MG2. Silnik spalinowy pozostaje wyłączony a generator MG1 obraca się w normalnym kierunku generując napięcie. Jeżeli parametry monitorowane przez jednostkę sterującą napęd hybrydowy takie jak temperatura płynu chłodzącego, stan naładowania akumulatora, temperatura akumulatora i stan obwodu elektrycznego odbiegają od ustalonego poziomu zostaje uruchomiony silnik spalinowy przez generator MG1. Moment uruchomienia silnika spalinowego przez generator MG1 jest wyraźnie widoczny na wykresie. Gwałtownie wzrosła prędkość generatora MG1 (pionowa linia) oraz wzrosła prędkość obrotowa silnika spalinowego (pionowa część wykresu koloru niebieskiego). Następnym etapem jest przełączenie generatora MG1 na pracę generatora odbierającego napęd od silnika spalinowego i ładującego akumulator. Wówczas generator MG1 nie napędza ale jest napędzany przez silnik spalinowy. Silnik spalinowy napędza generator MG1 i część mocy jest przenoszona na koła mechanicznie. Moment napędowy napędzający koła pojazdu pochodzi z silnika elektrycznego MG2 i z koła wieńcowego przekładni planetarnej. Układ jest szeregowo – równoległy i część mocy jest przenoszona mechanicznie.

5. Wnioski.

Rozdział przepływu mocy w pojazdach z napędem hybrydowym jest uzależniony od wielu czynników. Strumień przepływu mocy głównie zależy od realizowanego profilu prędkości, oraz od wielu parametrów takich jak: stan naładowania akumulatora, temperatura silnika, temperatura zewnętrzna, temperatura akumulatora, oraz od odbiorników mocy takich jak klimatyzacja, lub układ wspomagania kierownicy. Przepływ mocy zmienia się dynamicznie podczas jazdy na skutek opisanych powyżej czynników. Możliwość zapisu tych parametrów i zestawienie ich z parametrami takimi jak profil prędkości oraz zużyciem paliwa umożliwi przeprowadzenie analizy energetycznej i analizę energochłonności szczegółowo opisanej w literaturze [6] pojazdów z napędem hybrydowym. Z uwagi na fakt iż praca układu hybrydowego jest zagadnieniem bardzo złożonym, zwłaszcza w przypadku Toyoty Prius niniejszy artykuł przedstawia jedynie jej uproszczoną analizę.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

MG1 power generator/maszyna elektryczna,
silnik/generator 1

MG2 electric motor/maszyna elektryczna,
silnik/generator 2

Bibliography/Literatura

- [1] Merkisz J., Mazurek S., Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.
- [2] Toyota Motor Polska, materiały serwisowe, Warszawa 2010.
- [3] Siłka W., Analiza energetyczna ruchu samochodu z napędem hybrydowym – wykład, Politechnika Opolska, Opole 2008.
- [4] Abe S., Tojima K., Kotani T., Shamoto S., Ibaraki R., Sakai A., A Development of Toyota Hybrid System, Toyota Technical Review, Vol.47 No. 2, April 1998.
- [5] Szumanowski A., Hybrid Electric Vehicle Drives Design, House of the Institute for Sustainable Technologies – NRI, Warsaw – Radom 2006.
- [6] Siłka W., Teoria Ruchu Samochodu, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2002
- [7] Elektrotechnika i elektronika samochodowa Informator techniczny „Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne” Wydanie 2010 WKiŁ.
- [8] Dzida J., The analysis of combustion engine and spring-loaded accumulator’s cooperation in hybrid drive system of vehicle. International Congress of Combustion Engines 2007, Kraków 2007.
- [9] Dzida J., Dzida J.M., Combustion engine start-up testing with use of elastic elements, and concept of mechanical stop-start system. International Congress on Combustion Engines 2009, Opole 2009.

Mr Piotr Tarkowski, DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Piotr Tarkowski – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.



Mr Paweł Sosik, MScEng – PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology .

Mgr inż. Paweł Sosik – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

