

Anna Skarbak-Żabkin, Tomasz Szczepański, Marcin Ślęzak
Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa

ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ SAMOCHODU POPRZEZ OPTYMALIZACJĘ UKŁADU REKUPERACJI ENERGII

INCREASING THE CAR ENERGY EFFICIENCY BY OPTIMIZING THE ENERGY RECUPERATION SYSTEM

Streszczenie: Układy rekuperacji energii są coraz częściej stosowane we współczesnych samochodach osobowych wyposażonych w silnik spalinowy. Dzieje się tak, ponieważ taki układ pozwala na odzyskiwanie części energii bez konieczności montowania w pojeździe dodatkowych silników elektrycznych oraz baterii akumulatorów o dużej pojemności [2]. Powstaje jednak pytanie o granice stosowalności takiego rozwiązania. Ograniczeniami są w tym przypadku warunki ruchu samochodu oraz całkowita moc odbiorników energii elektrycznej w pojeździe. W zależności od tych czynników celowe jest wyposażenie samochodu w układ rekuperacji energii o większej lub mniejszej mocy. W artykule przedstawiono wyniki symulacji działania różnych układów dla różnych warunków ruchu miejskiego. W tym celu zostały wykonane badania drogowe mające na celu reprezentowanie ruchu o różnej użyteczności pod względem możliwości odzyskiwania energii. Dla każdego rodzaju ruchu wykonano optymalizację parametrów układu. Na tej podstawie przedyskutowano zasadność stosowania układów o różnej mocy.

Abstract: Energy recovery systems are increasingly being used in modern cars equipped with the internal combustion engine. This is because such an arrangement allows the recovery of part of the energy without the need for additional mounting on the vehicle electric motors and batteries high capacity. But the question about the limits of applicability of such a solution. restrictions are in this case the conditions for the movement of the car and the total power of electricity consumers in the vehicle. Depending on these factors, it is appropriate accessories car system recuperation of more or less power. The article presents the results of simulations of various systems for a variety of urban traffic. For that purpose road tests made with a view to representing the motion of various utility in terms of energy recovery. For each type of movement performed to optimize system parameters. On this basis, we discussed the legitimacy of the use of systems with different power.

Słowa kluczowe: *rekuperacja energii, hamowanie odzyskowe, moc alternatora*

Keywords: *energy recuperation, recovery braking, power of the alternator*

1. Wprowadzenie

Rekuperacja energii elektrycznej jest procesem polegającym na odzyskiwaniu energii poprzez wykorzystanie energii kinetycznej hamującego pojazdu. Istotą rekuperacji jest zwiększanie prądu wzbudzania prądnicy (alternatora) podczas hamowania i toczenia się samochodu, tak aby akurat wtedy akumulator ładowany był bardzo intensywnie. Z kolei podczas przyspieszenia (w momentach, gdy potrzebna jest znaczna moc silnika) prąd wzbudzenia alternatora powinien być zredukowany nawet do zera. Gdy kierowca zdejmuje nogę z gazu lub hamuje, następuje załączenie alternatora i energia mechaniczna przekształcana jest na elektryczną. Gdy akumulator jest dostatecznie naładowany, alternator ponownie odłączany jest od silnika. Dzięki temu silnik pracuje przy mniejszym obciążeniu i emisja spalin zostaje zmniejszona.

Układ napędowy pojazdu dysponuje w efekcie większą mocą użyteczną, co podnosi jego efektywność energetyczną [6]. Jako hamowanie rozumiemy zmniejszenie prędkości pojazdu lub jej utrzymanie podczas jazdy w dół po pochylonym podłożu. Towarzyszy temu przyłożenie siły o zwrocie przeciwnym do kierunku jazdy [5]. Jednym z ważniejszych urządzeń wykorzystywanych przez każdy samochód jest alternator. Głównym zadaniem każdego alternatora jest zaopatrzenie w energię elektryczną instalacji, jaka jest montowana w pojeździe oraz doładowywanie akumulatora. Hamowanie oznaczało do tej pory stratę energii. Układ odzysku energii hamowania częściowo rozwiązuje ten problem, ponieważ podczas hamowania wykorzystuje energię i ładuje nią akumulator [4]. W samochodach niehybrydowych odzysk ener-

gii przy hamowaniu na dobre rozpoczął się w 2007 r., kiedy firma BMW wprowadziła do wszystkich modeli pakiet „Efficient Dynamics”. Zamiana energii mechanicznej hamującego pojazdu na energię elektryczną pozwoliła obniżyć średnie zużycie paliwa o 3%. Obecnie wielu producentów pracuje nad takimi rozwiązaniami. Stają się one na tyle popularne, że powstała nawet nowa kategoria akumulatorów samochodowych (AGM), przeznaczonych głównie do aut z odzyskiem energii. W niniejszym artykule postawiono pytanie o granice stosowalności systemów odzyskiwania energii. Warto wymienić kilka podstawowych czynników ograniczających możliwości rekuperacyjne.

- *Warunki drogowe.* Jak wiadomo, odzyskiwana energia pochodzi z energii mechanicznej nadanej uprzednio pojazdowi. W zadanej jednostce czasu energii takiej może być więcej lub mniej w zależności od warunków ruchu samochodu. Tak więc sposób poruszania się na drodze ściśle determinuje ilość energii możliwej do odzyskania w procesach hamowania [3].

- *Budowa samochodu.* Podstawowym czynnikiem warunkującym ilości energii możliwej do odzyskania w zadanych warunkach ruchu jest jego masa. To od niej zależy w największym stopniu ilość energii mechanicznej. Podobny wpływ ma również wartość momentów bezwładności obrotowych części układu jezdniego pojazdu.

- *Alternator.* Energia mechaniczna możliwa do odzyskania w ruchu drogowym nie jest rozłożona równomiernie w czasie, ale pojawia się porcjami, jedynie w czasie hamowania. Chwilowe jej wartości (rozumiane jako moc) mogą być stosunkowo duże, niekiedy przekraczając 100 kW. Odzyskanie takiej mocy wymaga odpowiednio dużego alternatora oraz specjalnego układu buforującego pozyskaną energię elektryczną, zanim trafi ona do akumulatora (zwykle jest to kondensator). Kluczowym czynnikiem ograniczającym możliwości rekuperacji energii jest w tym przypadku moc alternatora.

- *Obciążenie elektryczne.* W przypadku stosowania rekuperacji energii w samochodzie niehybrydowym, w którym jedynym źródłem napędu pojazdu jest silnik spalinowy, istotnym czynnikiem jest również możliwość odbioru energii elektrycznej. Jeśli ilość energii elektrycznej możliwej do odebrania w danym pojeździe jest niewielka, również niewielka staje się potrzeba rekuperacji energii.

Wobec powyższych ograniczeń warto zastanowić się nad praktycznym doбором niektórych parametrów układu rekuperacji, jak na przykład moc alternatora. Należy w takim przypadku rozważyć warunki drogowe, w jakich będzie się poruszał dany samochód, budowę pojazdu i rozkład energii możliwej do odzyskania w czasie oraz ilości energii możliwe do odebrania.

W tym celu zostały przeprowadzone badania drogowe, na podstawie których wykonano symulację działania układów rekuperacji energii w różnej konfiguracji (przy różnych mocach alternatora i przy różnym odbiorze energii elektrycznej).

2. Metodyka badań

Przeprowadzone badania miały dwojaki charakter: praktyczny oraz teoretyczny. W ramach doświadczeń praktycznych wykonano testy drogowe w ruchu miejskim w celu poznania rzeczywistego rozkładu energii możliwej do odzyskania w czasie jazdy. Na podstawie zebranych przebiegów wykonano symulacje teoretyczne, pokazujące możliwości konfiguracji systemu rekuperacji.

2.1. Badania drogowe

Do badań wykorzystano samochód osobowy Renault Clio z silnikiem o zapłonie samoczynnym. Jego masa własna wynosiła 1100 kg, a wraz z kierowcą i pasażerem 1230 kg. Do pomiaru warunków ruchu wykorzystano układ OBD pojazdu, a do rejestracji czytnik OBD, rejestrujący bieżącą prędkość jazdy z dokładnością do 1 km/h i z częstotliwością 1 Hz.

Badania drogowe były prowadzone w obrębie Warszawy, w godzinach popołudniowych, kiedy występuje zwiększone natężenie ruchu na drogach. Trasa przejazdów była dobierana na bieżąco w taki sposób, żeby wymusić ruch o różnym charakterze: jazda w zatorach ulicznych, jazda przy dużym natężeniu ruchu, ale bez wyraźnych zatorów oraz jazda przy stosunkowo małym natężeniu ruchu. Docelowo zarejestrowano 17212 s jazdy (prawie 5 h). W zebranych przebiegach wyraźnie widoczne były fragmenty ruchu o odmiennym charakterze.

2.2. Badania symulacyjne

W badaniach symulacyjnych poczyniono następujące założenia.

- Alternatory montowane współcześnie w samochodach mogą mieć moc 1 kW lub większą. W ramach prowadzonych symulacji brano pod

uwagę zakres mocy od 1 do 20 kW. Górna granica wydaje się w tym przypadku mocno zawyżona, ale w celu odpowiedzi na pytanie o granice stosowalności systemów rekuperacji energii rozważenie tak dużych mocy może być uzasadnione.

- *Obciążenie elektryczne.* Zakres energii elektrycznej przekazywanej do odbiorników w pojeździe został przyjęty od 0,5 kW do 2 kW. Najniższe wartości odpowiadają sytuacji, kiedy zasilane są głównie światła mijania oraz układ zapłonowy silnika i pompa paliwa. Większe wartości pobieranej energii odpowiadają uruchomieniu takich odbiorników, jak ogrzewanie elektryczne, wymuszony przepływ powietrza, albo wprowadzenie elektrycznego zasilania pompy czynnika chłodzącego i pompy oleju.

- *Akumulator.* Przyjęto akumulator o napięciu 12 V i pojemności 72 Ah, co odpowiada około 3 MJ energii. Założono ponadto, że akumulator nie będzie rozładowany bardziej, niż do połowy swojej pojemności elektrycznej, a jego początkowy stan energetyczny będzie na poziomie 2,25 MJ.

- *Układ ładowania akumulatora.* Ze względu na ograniczoną szybkość ładowania akumulatora pomiędzy alternatorem i akumulatorem umieszcza się kondensator, stanowiący bufor energii. Możliwość odzyskiwania dużych porcji energii w krótkim czasie jest wówczas uzależniona od pojemności kondensatora. W prowadzonych symulacjach pominięto ograniczenia związane z kondensatorem, przyjmując, że jego pojemność będzie wystarczająca do zachowania ciągłości rekuperacji energii w każdych warunkach. Takie założenie nie musi być zawsze słuszne i wymaga bliższego zastanowienia się w przyszłości nad problemem, jaki stwarza ograniczona pojemność kondensatora.

- *Sprawność układu ładowania.* Sprawność układu ładowania, wliczając w to alternator, kondensator oraz akumulator, przyjęto na poziomie 0,5. Wynika to z badań prowadzonych wcześniej nad samochodami elektrycznymi [1].

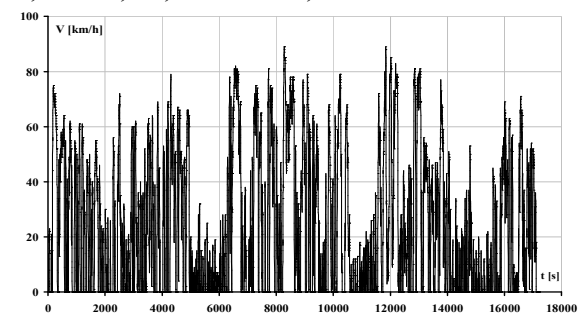
- *Odzyskiwana energia mechaniczna.* Do celów prowadzonych symulacji przyjęto uproszczenie, według którego cała energia mechaniczna potrzebna do hamowania pojazdu jest wytwarzana przez alternator. Jest to oczywiście sytuacja hipotetyczna, zakładająca istnienie na tyle rozbudowanego układu rekuperacji energii, który pozwoliłby na hamowanie samym silnikiem (alternatorem). Wymagałoby to stosowania specjalnej techniki

jazdy, alternatora o odpowiednio dużej mocy oraz specjalnego systemu sterowania. Takie rozwiązanie jest teoretycznie możliwe do zastosowania, choć w praktyce nie występuje. Celowe było jednak poczynienie takiego założenia z racji poszukiwania granic stosowalności systemu rekuperacji energii. Pozwoliło to na odpowiedź na pytanie, ile energii pojawia się w czasie rzeczywistego ruchu drogowego, którą teoretycznie można by odzyskać. Trzeba jednak podkreślić, że powyższe uproszczenie nie jest wystarczające w przypadku bardziej ogólnego spojrzenia na temat rekuperacji energii. W przyszłości planuje się przeprowadzić podobne symulacje, ale uwzględniające konieczność różnych technik hamowania (zarówno silnikiem, jak i hamulcami). Na podstawie powyższych założeń oraz wyników badań empirycznych przeprowadzono symulacje przedstawiające poziom energii w akumulatorze w czasie jazdy samochodu. Wyniki badań oraz obliczeń zostały przedstawione w rozdziale 3.

3. Wyniki badań

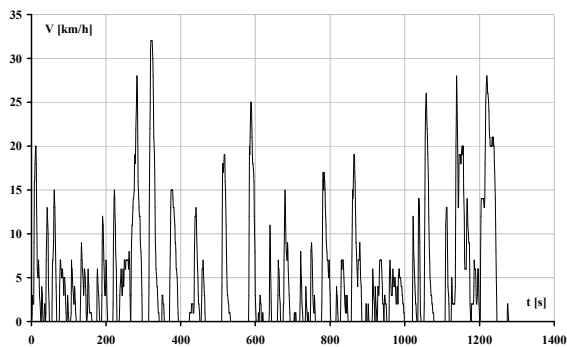
Na rys. 1. przedstawiono przebieg prędkości samochodu łącznie w czasie wszystkich testów drogowych. Widoczne są na nim poszczególne fragmenty ruchu odpowiadające różnym prędkościom średnim. W ramach analizy wyników podzielono przedstawiony przebieg na 10 fragmentów, charakteryzujących się następującymi prędkościami średnimi: 4,7 km/h, 5,4 km/h, 7,3 km/h, 15,1 km/h, 24,8 km/h, 27,5 km/h, 28,4 km/h, 30,4 km/h, 34,7 km/h, 36,9 km/h.

Na rys. 2. – 4. przedstawiono przykładowe fragmenty przebiegów prędkości, odpowiadające: 4,7 km/h, 24,8 km/h i 36,9 km/h.

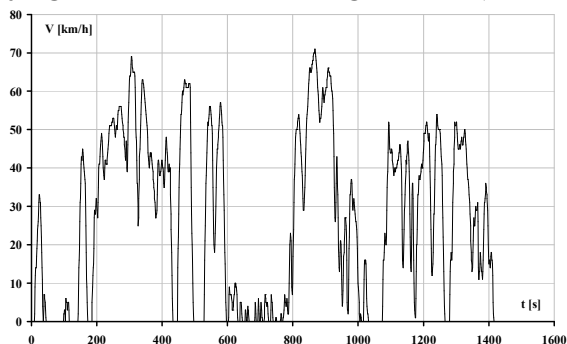


Rys. 1. Przebieg prędkości samochodu w czasie (cały test)

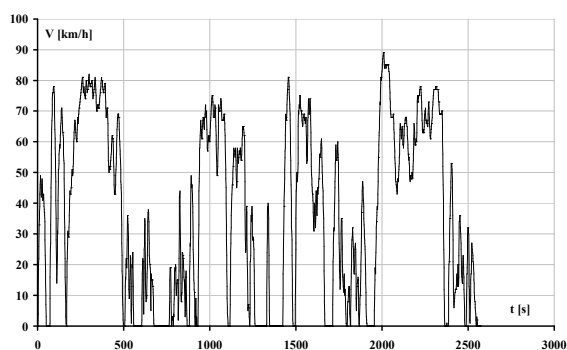
Na rys. 5. – 7. przedstawiono przebieg mocy teoretycznie możliwej do odzyskania dla fragmentów przebiegu o następujących prędkościach średnich: 4,7 km/h, 24,8 km/h i 36,9 km/h.



Rys. 2. Przebieg prędkości samochodu w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 4,7 km/h)



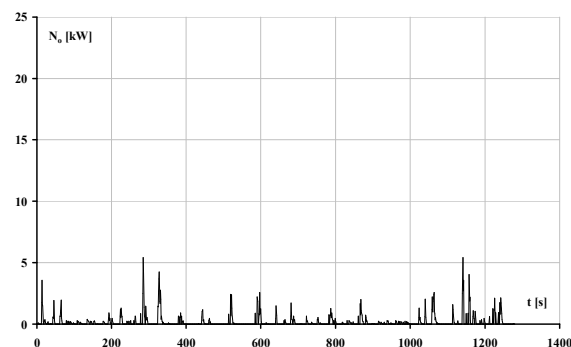
Rys. 3. Przebieg prędkości samochodu w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 24,8 km/h)



Rys. 4. Przebieg prędkości samochodu w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 36,9 km/h)

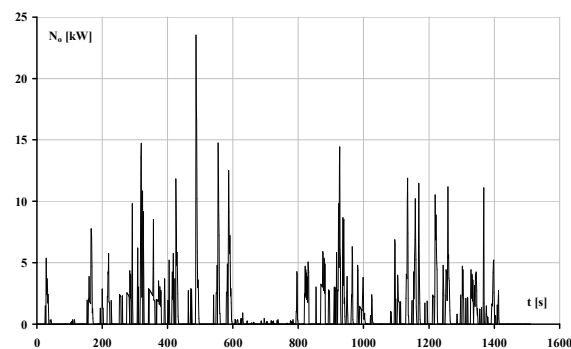
Jak widać na rys. 5., odpowiadającym średniej prędkości 4,7 km/h, moc możliwa do odzyskania jest niewielka, rzadko przekracza 5 kW. Wynika to z faktu, że przy tak małych prędkościach pojazdowi nadawana jest niewielka energia kinetyczna, a więc podczas hamowania

wystarczy niewielka energia do zatrzymania samochodu.



Rys. 5. Przebieg mocy odzyskiwanej w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 4,7 km/h)

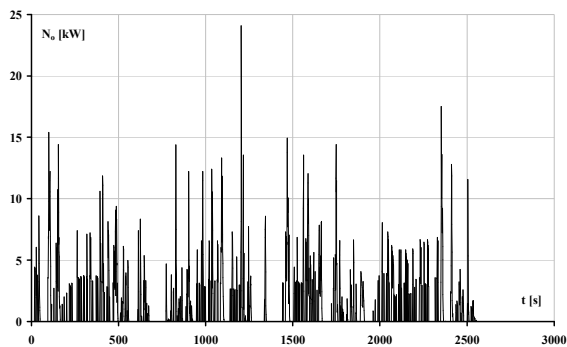
Moc widoczna na rys. 6. jest większa, sięga blisko 15 kW. Wynika to z odpowiednio większej energii kinetycznej samochodu, która występuje przy większych prędkościach jazdy. Na rys. 7. wartości mocy są porównywalne do mocy widocznych na rys. 6., ale ich występowanie jest znacznie częstsze. Oznacza to, że średnia moc generowana przy średniej prędkości jazdy 36,9 km/h jest większa, niż średnia moc generowana przy średniej prędkości jazdy 24,8 km/h. Dokładne wartości średniej mocy przy kolejnych wartościach średniej prędkości jazdy zostały ujęte w tab. 1.



Rys. 6. Przebieg mocy odzyskiwanej w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 24,8 km/h)

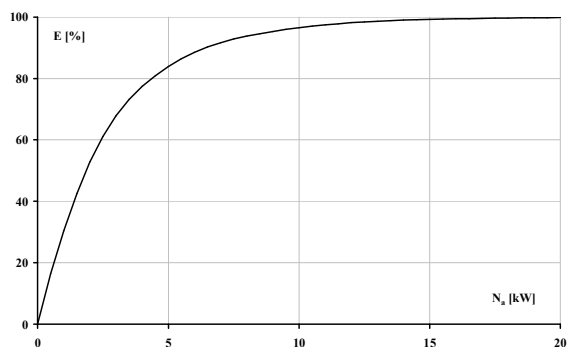
Tabela 1.

| | | | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| N_{sr} | 4,7 | 5,4 | 7,3 | 15,1 | 24,8 | 27,5 | 28,4 | 30,4 | 34,7 | 36,9 |
| V_{sr} | 186 | 205 | 354 | 648 | 951 | 898 | 821 | 1138 | 1058 | 1188 |



Rys. 7. Przebieg mocy odzyskiwanej w czasie (fragment testu dla V_{sr} równego 36,9 km/h)

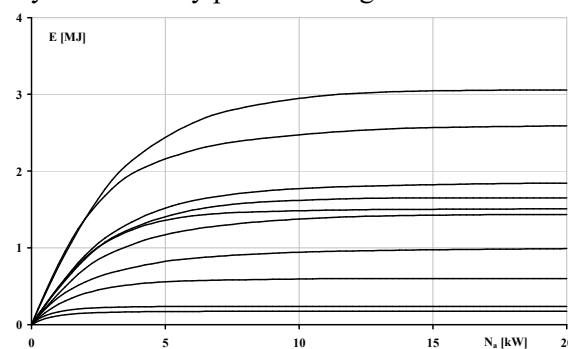
Na rys. 8. przedstawiono zależność udziału odzyskanej energii względem energii możliwej do odzyskania w dziedzinie mocy alternatora. Oznacza to, że dysponując ograniczoną mocą alternatora system rekuperacji nie jest w stanie odzyskać całej energii hamowania. Wynika to z faktu, że niektóre chwilowe wartości mocy (pokazane na rys. 5. – 7.) sięgają nawet kilkunastu kilowatów. Każda moc generowana podczas hamowania, większa od mocy alternatora, jest tracona, ponieważ nie może być przezeń wykorzystana. Tak więc dysponując alternatorem o bardzo dużej mocy 20 kW, system mógłby zaabsorbować całą niemal energię hamowania. Jest to jednak nieuzasadnione rozwiązanie z punktu widzenia ekonomicznego, ponieważ dysponując znacznie mniejszym alternatorem można odzyskać niewiele mniej energii. Na przykład alternator o mocy 5 kW mógłby odzyskać jej około 85 %.



Rys. 8. Udział energii odzyskanej w teście względem energii możliwej do odzyskania w dziedzinie mocy alternatora

Na rys. 9. przedstawiono podobne zagadnienie, ale z podziałem na pojedyncze fragmenty ruchu odpowiadające różnym średnim prędkościom samochodu. Wykres przedstawia energię odzyskaną w dziedzinie mocy alternatora. Linie położone niżej odpowiadają fragmentom ruchu

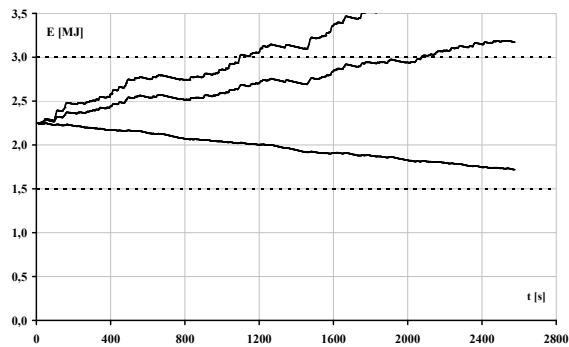
z mniejszą prędkością średnią, a położone wyżej – z większą. Jak wynika z poniższego wykresu, przy małych prędkościach średnich alternator o mocy 4 kW może odzyskać niemal całą energię hamowania. Jednak wraz ze wzrostem prędkości średniej moc alternatora, który mógłby odzyskać taką samą część energii, wyraźnie rośnie. Takie ujęcie problemu częściowo odpowiada na pytanie o granice stosowalności systemu rekuperacji energii. Widać w tym przypadku, ile energii jest teoretycznie możliwe do odzyskania w różnych warunkach ruchu drogowego. Widać również, jak dużą moc układu należy przewidzieć, aby efektywnie wykorzystywać założony procent energii hamowania.



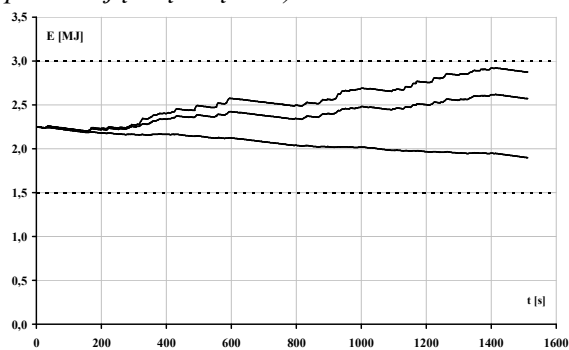
Rys. 8. Energia odzyskana w dziedzinie mocy alternatora dla różnych fragmentów testu (linie wyżej położone reprezentują większe V_{sr})

Trzeba jednak zauważyć, że rys. 7. i 8. przedstawiają wartości uśrednione w czasie. Warto więc prześledzić, jak kształtują się wybrane parametry robocze systemu rekuperacji energii w czasie jazdy samochodu w warunkach drogowych. Na rys. 9. przedstawiono przebieg stanu energetycznego akumulatora w przypadku poboru prądu przez odbiorniki elektryczne umieszczone w samochodzie na poziomie 0,5 kW oraz w przypadku jazdy ze średnią prędkością 36,9 km/h. Linie kreskowe ilustrują przyjęte granice pracy akumulatora. Linie ciągłe odpowiadają ilościom energii zgromadzonej w akumulatorze w przypadku zastosowania różnych alternatorów. Górna linia reprezentuje alternator o mocy 10 kW, środkowa o mocy 4 kW, a dolna o mocy 1 kW. Jak widać moce 4 kW i 10 kW okazują się w tej sytuacji zupełnie wystarczające. Akumulator osiąga stan graniczny, przy którym jest w pełni naładowany (linie ciągłe przecinające górną linię kreskową). Natomiast moc alternatora równa 1 kW wydaje się niewystarczająca, ponieważ akumulator zostaje stopniowo rozładowywany. Oznacza to, że w pewnym momencie konieczne będzie doda-

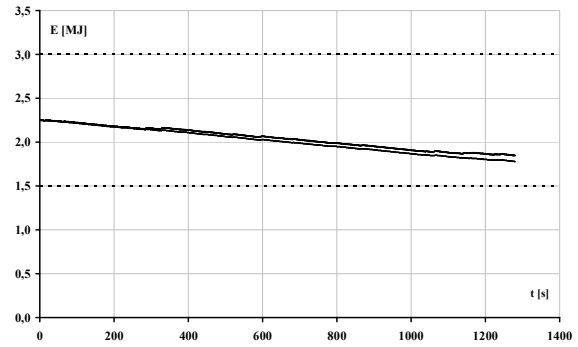
tkowe ładowanie akumulatora, z energii nie pochodzącej z rekuperacji. Na rys. 10. przedstawiono podobną sytuację, jednak tym razem średnia prędkość samochodu wynosi 24,8 km/h. Ze względu na mniejsze ilości energii możliwe do odzyskania, stan energetyczny akumulatora rośnie nieco wolniej w przypadku alternatorów o mocy 4 kW i 10 kW, ale wciąż utrzymuje się tendencja rosnąca. Alternator o mocy 1 kW również tutaj okazuje się niewystarczający, aby zapewnić ładowanie akumulatora za pomocą samej rekuperacji energii. Na rys. 11. przedstawiono podobną sytuację, ale tym razem dla prędkości średniej 4,7 km/h. Na wykresie widoczne są tylko dwie linie ciągłe, ponieważ linia odpowiadająca mocy alternatora 4 kW pokrywa się z linią dla 10 kW. Wynika to z faktu, że przy tak małych prędkościach ilość energii możliwej do odzyskania jest na tyle niewielka, że stosowanie większych alternatorów nie jest uzasadnione. We wszystkich widocznych przypadkach energia pochodząca z systemu rekuperacji okazuje się zbyt mała do utrzymania akumulatora w stanie naładowanym.



Rys. 9. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 0,5 \text{ kW}$, $V_{sr} = 36,9 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)



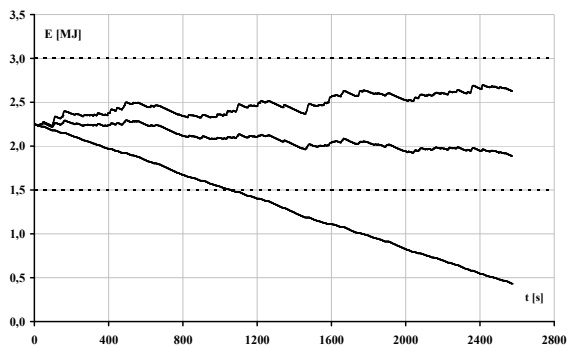
Rys. 10. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 0,5 \text{ kW}$, $V_{sr} = 24,8 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)



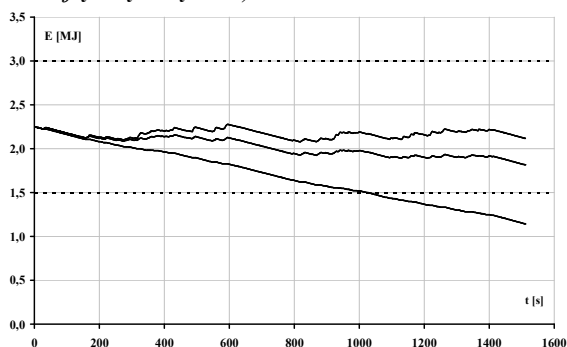
Rys. 11. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 0,5 \text{ kW}$, $V_{sr} = 4,7 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)

Powyższe przypadki dotyczyły odbioru mocy elektrycznej na poziomie 0,5 kW. Sytuacja będzie jednak wyglądała zupełnie inaczej, kiedy pobór mocy zostanie zwiększony. Na rys. 12. – 14. przedstawiono przebieg stanu energetycznego akumulatora w sytuacji poboru prądu 1 kW, odpowiednio dla prędkości średnich: 36,9 km/h, 24,8 km/h, 4,7 km/h.

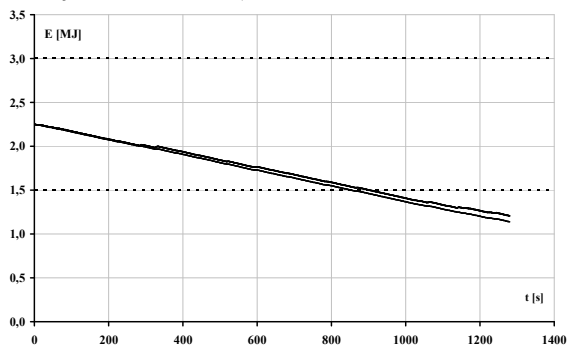
Przy prędkości średniej 36,9 km/h (rys. 12.) tylko dla alternatora o mocy 10 kW można zaobserwować tendencję rosnącą stanu naładowania akumulatora. W dwóch pozostałych przypadkach akumulator zostaje rozładowany, przy czym przy zastosowaniu alternatora o mocy 1 kW dzieje się to stosunkowo szybko. W przypadku średniej prędkości 24,8 km/h (rys. 13.) jedynie alternator o mocy 10 kW znajduje się na granicy wystarczalności. Natomiast przy prędkości średniej 4,7 km/h (rys. 14.) żadne z rozwiązań nie spełnia wymogu zachowania ciągłości ładowania akumulatora za pomocą energii pochodzącej jedynie z systemu rekuperacji. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że pobór mocy elektrycznej na poziomie 1 kW może znaleźć pokrycie w energii hamowania jedynie w przypadku takich warunków ruchu, w których średnia prędkość jazdy będzie stosunkowo duża (powyżej 25 km/h). Tymczasem jazda w zatorach ulicznych uniemożliwia efektywne korzystanie z systemu rekuperacji energii. Warto również zobaczyć, jak będzie kształtowało się powyższe zagadnienie przy poborze mocy elektrycznej na poziomie 1,5 kW. Ilustruje to rys. 15. Jak widać na rys. 15., żadna moc alternatora nie spełnia narzuconych oczekiwań. Wykres został sporządzony dla średniej prędkości jazdy równej 36,9 km/h.



Rys. 12. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 1 \text{ kW}$, $V_{sr} = 36,9 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)

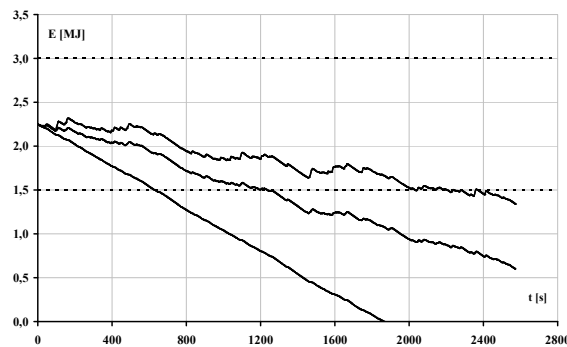


Rys. 13. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 1 \text{ kW}$, $V_{sr} = 24,8 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)



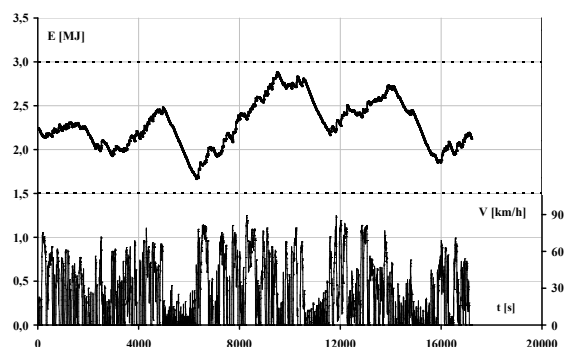
Rys. 14. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 1 \text{ kW}$, $V_{sr} = 4,7 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)

Przy mniejszych prędkościach użyteczność systemu rekuperacji energii będzie jeszcze mniejsza. Oznacza to, że pobór mocy elektrycznej na poziomie 1,5 kW jest zbyt duży w stosunku do mocy występujących podczas hamowania pojazdu w badanych warunkach ruchu drogowego. Powyższe przykłady przedstawiają przebiegi stanu energetycznego akumulatora w ramach pojedynczych fragmentów ruchu, odpowiadającym przykładowym prędkościom średnim.



Rys. 15. Przebieg stanu energetycznego akumulatora ($N_p = 1,5 \text{ kW}$, $V_{sr} = 36,9 \text{ km/h}$) dla różnych mocy alternatora (linie położone wyżej reprezentują większą moc)

Warto również zobaczyć, jak będzie kształtował się taki przebieg w dziedzinie całego drogowego testu jezdni. Przedstawia to rys. 16. Pobór mocy elektrycznej jest w tym przypadku na poziomie 0,8 kW, a zastosowany alternator ma moc 10 kW.



Rys. 16. Przebieg stanu energetycznego akumulatora (cały test, $N_p = 0,8 \text{ kW}$)

Jak widać, zastosowany (stosunkowo duży) alternator zapewnia w prezentowanych warunkach utrzymanie stanu energetycznego akumulatora w założonych granicach. Widoczne są wyraźne zmiany poziomu naładowania, odpowiadające fragmentom ruchu o różnym charakterze. W celu ułatwienia porównania przebiegu stanu energetycznego z rodzajem ruchu na wykres naniesiono również przebieg prędkości jazdy. Zmniejszanie się stopnia naładowania akumulatora odpowiada każdorazowo jeździe z mniejszą średnią prędkością.

4. Podsumowanie

Przedstawiona analiza wyników pomiarów oraz symulacji daje pewien ogólny obraz, z jakimi problemami trzeba się liczyć, tworząc założenia dla systemów rekuperacji energii w samochodach. Problemy te będą jeszcze bardziej złożone, jeśli uwzględnić fakt, że w praktyce nie cała

energia mechaniczna pojazdu może być odzyskiwana w procesach hamowania.

Na podstawie przedstawionych rozważań można sformułować następujące wnioski.

- Ilość energii mechanicznej możliwej do odzyskania w procesach hamowania jest ściśle powiązana ze średnią prędkością jazdy samochodu w warunkach drogowych.

- W przypadku rozpatrywanego samochodu i przyjętych założeń alternator o mocy 10 kW jest w stanie odzyskać około 95% całkowitej energii generowanej podczas hamowania pojazdu.

- W przypadku jazdy z mniejszymi prędkościami używanie alternatorów o większej mocy nie jest celowe, ponieważ w takim rodzaju ruchu mocy potrzebnej do hamowania pojazdu jest zbyt mało.

- W rozpatrywanych warunkach ruchu i przy poczynionych założeniach obliczeniowych pobór energii przez odbiorniki prądu w samochodzie nie powinien przekraczać około 0,8 kW, jeśli akumulator ma być ładowany jedynie za pomocą systemu rekuperacji energii.

Literatura

[1]. Chłopek Z., Szczepański T., Ekologiczne aspekty eksploatacji samochodów elektrycznych na przykładzie oceny zużycia energii, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(92)/2013.

[2]. Frydrychowicz-Jastrzębska G., Bugała A., Wybrane nowoczesne rozwiązania akumulatorów w pojazdach, Poznan University of Technology Academic Journals: Electrical Engineering, PL ISSN 1897-0737.

[3]. Jankowski A., Ślęzak M., On board diagnostics (OBD) research in conditions of chassis dynamometer and road tests, Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011.

[4]. Kuchar M., Siczek K., Zdolność odzysku energii gromadzonej w amortyzatorze w warunkach hamowania, The Archives of Automotive Engineering, Tom. 65, Nr 3, 2014, ISSN 1234/754X

[5]. Skibicki J., Pojazdy elektryczne cz.2., Wyd. Politechnika Gdańska 2012.

[6]. Szczepanek M., Rajewski P., How to improve energy efficiency of the polish fishing vessels due to energy audyt implementation., 2015, Mechanism and Machine Theory Problems of Mechanics, 1 (58)2015., ISSN 1512-0740.