

Dawid Skórzak, Wojciech Gawron
Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała

ANALIZA WPLYWU CHARAKTERYSTYKI HAMOWANIA ODZYSKOWEGO NA KOMFORT JAZDY, ZUZYCIE ENERGII ORAZ ZASIĘG POJAZDU ELEKTRYCZNEGO NA PODSTAWIE TESTÓW WLTC

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF REGENERATIVE BREAKING CHARACTERISTICS ON DRIVING COMFORT, ENERGY CONSUMPTION AND ELECTRIC VEHICLE RANGE BASED ON WLTC TESTS

Streszczenie: Zastosowanie nowoczesnego silnika elektrycznego w połączeniu z zaawansowanym sterowaniem umożliwia efektywniejsze wykorzystanie go jako generatora w pojazdach samochodowych. Praca z włączoną procedurą hamowania odzyskowego pozwala na odzyskanie części energii kinetycznej w trakcie swobodnego wytracania prędkości oraz hamowania. W artykule zaprezentowano porównanie rezultatów badań dla 10 ustawień charakterystyki odzysku energii, w testach WLTC, w trzech różnych temperaturach otoczenia. W trakcie prób drogowych uwzględniono wpływ ustawień rekuperacji energii na komfort jazdy. Celem przeprowadzanych badań było obliczenie zużycia energii elektrycznej w funkcji temperatury, całkowity bilans energii elektrycznej oraz ilość odzyskiwanej energii elektrycznej dla różnych ustawień charakterystyki odzysku energii. Autorzy artykułu podjęli próbę zdefiniowania zakresu charakterystyki rekuperacji energii hamowania, która stanowi optymalny wybór dla zapewnienia dużego zasięgu przy zachowaniu możliwie wysokiego komfortu jazdy.

Abstract: The modern electric motor application together with advanced control system enables more efficient use of it as a generator in cars. The regenerative braking allows recovery of the part of energy during free speed deceleration and braking. The article presents the comparison of WLTC test results for 10 adjustments of energy recovery characteristics in three different air temperatures. The impact of energy recuperation settings on driving comfort was taken into account during road test. The aim of the research was to estimate electric energy consumption in the temperature function, total balance energy and the amount of braking energy recuperation for different recovery settings. The authors of the article attempted to define the scope of energy recovery characteristics, which is the optimal choice ensuring large range with highest possible driving comfort.

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, WLTC, rekuperacja energii kinetycznej
Keywords: : electric vehicles, WLTC, kinetic energy recuperation

1. Wstęp

W XXI wieku elektryfikacja pojazdów samochodowych stała się bardzo popularna. Nakładane coraz większe zaostżenia dotyczące norm emisji dwutlenku węgla, tlenków azotów oraz cząstek stałych spowodowały zwrot przemysłu samochodowego w stronę produkcji pojazdów elektrycznych. Złożone systemy oczyszczania spalin komplikują budowę współczesnych silników spalinowych. Przemysł motoryzacyjny zwrócił się w stronę produkcji samochodów elektrycznych, cechujących się mniej skomplikowaną budową poszczególnych komponentów. Zwarta konstrukcja, ciągłe udoskonalanie podzespołów, sterowania oraz akumulatorów trakcyjnych spowodowała popularyzację ele-

ktryfikacji. Duży wpływ na wytwarzanie maszyn i urządzeń elektrycznych, które zastąpią w przyszłości rozwiązania spalinowe wywiera także ogólnoświatowa polityka pro-klimatyczna. Niektóre państwa wprowadzają zakaz wjazdu pojazdów o napędzie spalinowym do centrów dużych miast, promując dzięki temu transport elektryczny i ograniczając emisję spalin. Znany szereg udogodnień dla tego typu samochodów, między innymi możliwość poruszania się po buspasach oraz korzystanie z darmowych miejsc parkingowych w wyznaczonych miejscach. Rozpowszechnianie się tego typu pojazdów prowadzi do ciągłego udoskonalania technologii oraz opracowania nowych testów.

Cykl WLTC [1] (World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycles) zastąpił wcześniejszy niemiernodajny w dzisiejszych warunkach test NEDC (New European Driving Cycle), który był stosowany od lat 90. Pojazdy o napędzie hybrydowym, doładowywane zewnętrznie (OVC-HEV) oraz pojazdy elektryczne typu (PEV) są badane na podstawie laboratoryjnych cykli WLTC oraz prób drogowych z wykorzystaniem testów RDE (Real Driving Emissions). Testy te opracowano dla pojazdów spalinyowych w celu określenia zużycia paliwa oraz emisji szkodliwych substancji. W przypadku pojazdów elektrycznych testy WLTC są wykonywane głównie w celu sprawdzenia zasięgu oraz zużycia energii elektrycznej. Pojazdy przed przystąpieniem do badania dzielone są na klasy, uzależnione od stosunku mocy do masy pojazdu. Samochód poddany badaniom brał udział w próbach WLTC dla klasy 3a, w której stosunek mocy do masy wynosi powyżej 34 W/kg, litera „a” oznacza prędkość maksymalną pojazdu poniżej 120 km/h.

2. Opis badań

2.1 Cel badań

W artykule opisano próby WLTC wykonane na hamowni podwoziowej w warunkach laboratoryjnych. Dzięki badaniom można w sposób realistyczny badać zużycie energii elektrycznej w różnych temperaturach otoczenia, mając dodatkowo podgląd na zużycie energii podczas ładowania pojazdu. W samochodzie zaimplementowano sterowanie umożliwiające odzysk energii, które działa w trakcie swobodnego hamowania oraz przy użyciu hamulca nożnego. Podczas hamowania silnik elektryczny pojazdu jest wykorzystywany jako prądnica przez co zamienia energię kinetyczną pojazdu pochodzącą od toczących się kół w energię elektryczną, która doładowuje akumulator [4]. Dla uproszczenia, w dalszej części artykułu sformułowanie „odzysk energii kinetycznej” będzie tyczył się wyjaśnienia opisanego powyżej. System, który umożliwia regenerację energii wpływa znacząco na komfort jazdy. Przykładowo, jeżeli układ jest ustawiony na znaczną rekuperację energii pochodzącą z hamowania pojazdu, kierowca testowy narażony jest na stosunkowo silne przeciążenie przy każdym odpuśczeniu pedału przyspieszenia, co powoduje zmniejszenie komfortu jazdy. W tym celu wykonane zostały subiektywne testy drogowe,

które miały na celu określenie optymalnego poziomu odzysku energii hamowania przy zachowaniu możliwie najlepszego komfortu podróżowania.

2.2 Obiekt badań



Rys. 1. Pojazd badawczy

Dane techniczne testowanego pojazdu:

- trójfazowy synchroniczny silnik elektryczny z magnesami trwałymi,
- moc nominalna 45 kW,
- nominalny moment obrotowy 140 Nm,
- maksymalny moment obrotowy 250 Nm,
- bateria trakcyjna Litowo – Jonowa o pojemności 33,2 kWh
- przekładnia typu reduktor o przełożeniu 1:8,85,
- ładowarki pokładowe jednofazowe o mocy 3,5 kW łączone równolegle,
- prędkość maksymalna samochodu 100 km/h,
- masa pojazdu – 1820 kg,
- rodzaj ogumienia – 195/60/R16.

2.3 Opis stanowiska badawczego

Próby zostały wykonane w akredytowanym laboratorium, wyposażonym w hamownię podwoziową 2WD oraz 4WD firmy AVL Zoellner znajdującej się w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL. Do testów które odbywały się w temperaturach - 10 oraz 30 stopni Celsjusza wykorzystywana została komora klimatyczna WEISS WK 643/35-60/Ro, która umożliwia badania w zakresie temperaturowym od -35 do 60°C.

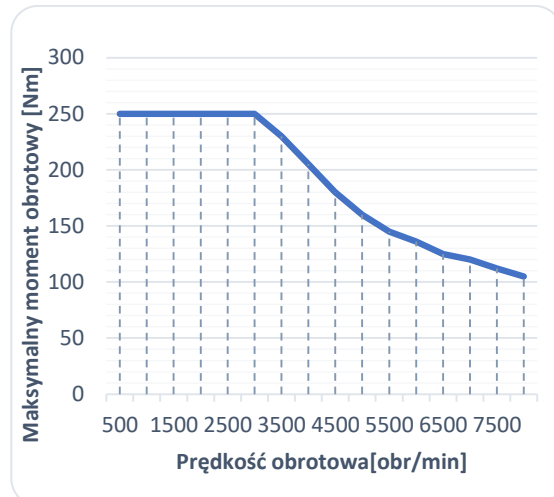


Rys. 2. Pojazd badawczy w trakcie testu na hamowni podwoziowej

W trakcie próby do pomiaru poszczególnych parametrów (napięcie oraz natężenie prądu pakietu trakcyjnego) wykorzystywano analizator mocy HIOKI 3390 oraz sondy cęgowe HIOKI CT6844 i CT6843.

2.3. Opis cyklu badawczego

Wszystkie przejazdy testowe opierały się na zmodyfikowanym cyklu WLTC [2]. Zmiany ograniczały się do przejechanego dystansu, który w tym przypadku wynosił dwukrotność cyklu WLTC czyli 46 km oraz do obniżenia prędkości w ostatniej części cyklu. Faza Extra-high wymaga rozpędzenia do prędkości 131 km/h, która była nieosiągalna dla badanego pojazdu. Ta część testu była wykonywana z maksymalną prędkością, która dla badanego samochodu wynosi 100 km/h. Pojazd z naładowaną w pełni baterią trakcyjną przejeżdżał określony wcześniej dystans a następnie był ponownie ładowany do 100% SOC (State of Charge – stopień naładowania baterii). W obu częściach testu pojazd był podłączony do analizatora mocy, z którego dane pozwoliły na obliczenie poszczególnych parametrów, opisanych w artykule. Sterowanie zaimplementowane w pojeździe elektrycznym, pozwala na dowolne ustawienie charakterystyki odzysku energii w określonym zakresie obrotowym generatora tj. od 500 obr/min do 7500 obr/min. Maksymalny dopuszczalny moment hamujący na wale silnika, przy załączonej rekuperacji energii, wynosi 125 Nm czyli 50% maksymalnego momentu obrotowego. Bazując na wcześniej wykonanych wstępnych próbach drogowych oraz zebranych informacjach [5], zostało zdefiniowane 10 strategii odzysku energii, które podlegały badaniu w trakcie testów.



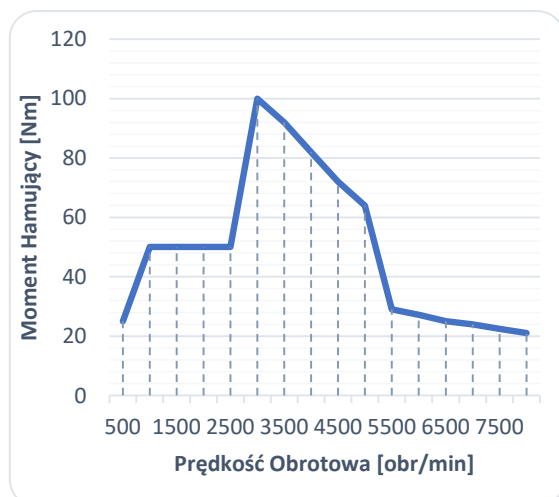
Rys. 3. Wykres maksymalnego moment obrotowego silnika

1. R50H – maksymalny odzysk energii (50%) w całym zakresie obrotowym silnika.
2. R50-10H – Odzysk energii słabnący wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (50% – 10%), wspomagany przez dodatkowe 20% przy wciśnięciu hamulca.
3. R50-10 – Odzysk energii słabnący wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (50% – 10%).
4. R10-50H – Odzysk energii zwiększany wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (10% – 50%), wspomagany przez dodatkowe 20% przy wciśnięciu hamulca.
5. R10-50 – Odzysk energii zwiększany wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (10% – 50%).
6. R35H – odzysk energii (35%) w całym zakresie obrotowym silnika. wspomagany przez dodatkowe 20% przy wciśnięciu hamulca.
7. R35 – odzysk energii (35%) w całym zakresie obrotowym silnika.
8. R20H – odzysk energii (20%) w całym zakresie obrotowym silnika. wspomagany przez dodatkowe 20% przy wciśnięciu hamulca.
9. R20 – odzysk energii (20%) w całym zakresie obrotowym silnika.
10. R0 – Brak odzysku energii.

Ze względu na problemy w sterowaniu odzyskiem energii przy niskich prędkościach obrotowych silnika i częstym awaryjnym zatrzymaniu hamowni podwoziowej, uznano, że charakterystyka rekuperacji energii hamowania będzie podlegała modyfikacji w zakresie obrotowym od 1000 do 7500 obr/min. Przy czym dla strategii o numerze od 1 do 9

poziom regeneracji dla 500 obr/min będzie wynosił stałe 10%.

(Rys. 4) Przedstawia przykładowy, wykres momentu hamującego dla charakterystyki R20H. W przedziale 5000-3000 obr/min następuje spowalnianie z użyciem hamulca zasadniczego, który wzmacnia odzysk energii o dodatkowe 20%. Należy mieć na uwadze, że moment hamujący zależy również od pozostałych czynników m.in. dopuszczalnego prądu ładowania baterii trakcyjnej.



Rys. 4. Wykres maksymalnego momentu hamującego przy odzysku energii R20H

3. Przebieg badań

3.1. Rekuperacja energii hamowania

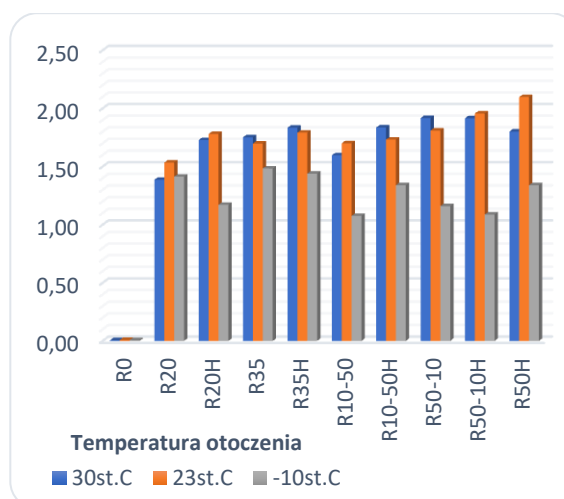
Jednym z badanych czynników był odzysk energii kinetycznej, podczas trwania cyklu. Jak wspomniano powyżej proces odzyskiwania energii uzależniony jest od sterownika silnika, który na podstawie wgranej charakterystyki podaje moment hamujący na silnik elektryczny, przez co energia zwracana jest do akumulatorów trakcyjnych. Wyniki testów dla hamowania odzyskowego podczas jazdy, zostały przeprowadzone w trzech różnych temperaturach otoczenia. (Tab. 1) prezentuje przyrost energii elektrycznej w zależności od użytej charakterystyki dla zmiennych temperatur.

Tab. 1. Tabela odzysku energii w kWh

	30°C	23°C	-10°C
R0	0,01	0,01	0,01
R20	1,39	1,53	1,41
R20H	1,73	1,78	1,17
R35	1,75	1,70	1,48

R35H	1,83	1,79	1,44
R10-50	1,60	1,70	1,08
R10-50H	1,84	1,73	1,34
R50-10	1,92	1,81	1,16
R50-10H	1,92	1,96	1,09
R50H	1,80	2,10	1,34

Na podstawie tabeli powyżej, dla lepszego zobrazowania wyników sporządzono wykres (Rys. 5).



Rys. 5. Wykres odzysku energii w kWh

Oś zorientowana poziomo przedstawia wybraną charakterystykę odzysku, oś zorientowana pionowo przedstawia energię odzyskiwaną w kWh, natomiast kolory, szary, pomarańczowy, niebieski oznaczają różne temperatury otoczenia, kolejno -10° C, 23° C, 30° C. Z powyższego zestawienia wynika, że dla najniższej temperatury tj. - 10° C charakterystyka R35 generuje największy odzysk energii kinetycznej, 1,48 kWh. Dla temperatury 23° C, przy konfiguracji R50H, największy odzysk kształtuje się na poziomie 2,10 kWh. Natomiast dla charakterystyki R50-10 w temperaturze 30° C silnik zwraca 1,92 kWh energii elektrycznej do akumulatora trakcyjnego. Zestawienie wyników pokazuje, że nadając poszczególnym charakterystykom wagi, krzywa sterująca odzyskiem energii, która najlepiej spisuje się w całym zakresie temperaturowym to R50-10H.

3.2 Bilans zużycia energii na podstawie testu

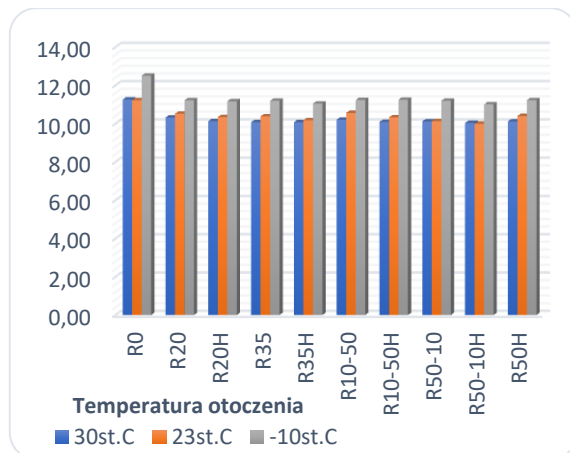
Następnym etapem testów było zestawienie wyników odzyskanej energii kinetycznej oraz energii pobranej przez samochód w czasie trwania cyklu WLTC. Dane (Tab. 2) przedstawiają całkowity bilans zużycia energii elek-

trycznej z uwzględnieniem regeneracji energii kinetycznej w trzech różnych temperaturach otoczenia dla danej konfiguracji odzysku energii.

Tab. 2. Tabela Bilansu zużycia energii na podstawie testu w kWh

	30°C	23°C	-10°C
R0	11,26	11,23	12,51
R20	10,32	10,52	11,22
R20H	10,13	10,34	11,17
R35	10,07	10,38	11,20
R35H	10,07	10,18	11,04
R10-50	10,21	10,56	11,23
R10-50H	10,09	10,33	11,25
R50-10	10,12	10,13	11,20
R50-10H	10,04	10,00	11,00
R50H	10,12	10,40	11,23

(Rys. 6) przedstawia dane z tabeli dla lepszego zobrazowania zgromadzonych wyników badań.



Rys. 6. Wykres Bilans zużycia energii na podstawie testu w kWh

Oś zorientowana poziomo przedstawia konfigurację odzysku energii, natomiast oś zorientowana pionowo przedstawia sumę zużycia i regeneracji energii elektrycznej w czasie trwania cyklu. Kolory, jak w poprzednim podrozdziale, oznaczają poszczególne temperatury otoczenia, dla których były przeprowadzane testy. Z zestawienia wynika jednoznacznie, że najlepszą konfiguracją dla bilansu energii odzyskanej i pobranej dla trzech różnych temperatur jest charakterystyka R50-10H, czyli jak wcześniej wspomniano jest to odzysk energii słabnący wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (50% do

10%) wspomagany przez dodatkowe 20% przy wciśnięciu hamulca. Jest to jednak mało komfortowa konfiguracja do użytkowania pojazdu przy niskich prędkościach, ponieważ trudno utrzymać stałą prędkość samochodu. Kierowca narażony jest na odczuwanie gwałtownych skoków momentu obrotowego.

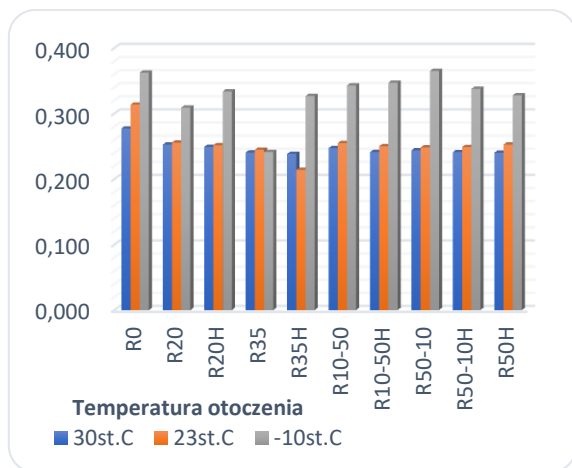
3.3. Zużycie całościowe z uwzględnieniem procesu ładowania

W kolejnej części omówiono zużycie energii elektrycznej samochodu z uwzględnieniem strat występujących podczas jego ładowania. Do komponentów, które pobierają energię w czasie ładowania pojazdu, możemy zaliczyć między innymi: elektryczne pompy układu chłodzenia, wentylator pomocniczy, który zapobiega przegrzewaniu się ładowarek oraz straty wynikające z przepływu prądu przez komponenty. W czasie trwania cyklu, konsumpcja energii elektrycznej była uzależniona od wybranej charakterystyki rekuperacji energii hamowania. W tym przypadku jednostką zużycia energii jest kWh/km, dzięki temu możemy określić zużycie energii po określonym przebiegu samochodu. Próba również została wykonana dla trzech różnych temperatur otoczenia jak w poprzednich testach. Poniżej zestawienie wyników z badań (Tab. 3).

Tab. 3. Całkowite zużycie energii z uwzględnieniem strat ładowania w kWh/km

	30°C	23°C	-10°C
R0	0,277	0,314	0,362
R20	0,253	0,256	0,309
R20H	0,249	0,252	0,333
R35	0,240	0,245	0,241
R35H	0,238	0,214	0,327
R10-50	0,247	0,255	0,343
R10-50H	0,241	0,250	0,347
R50-10	0,244	0,248	0,365
R50-10H	0,241	0,249	0,338
R50H	0,240	0,253	0,328

W celu lepszego zobrazowania wyników sporządzono wykres (Rys. 7). Na wykresie oś zorientowana poziomo przedstawia charakterystykę odzysku energii kinetycznej jak w poprzednich dwóch przypadkach, natomiast na osi zorientowanej pionowo widnieje zużycie energii po przejechaniu odcinka o długości jednego kilometra.



Rys. 7. Całkowite zużycie energii z uwzględnieniem strat ładowania w kWh/km

Do wartości zużycia energii podczas cyklu dodano straty energii elektrycznej powstałe w wyniku ładowania. W czasie testów przy konfiguracji R35 wystąpił błąd w ładowarkach, które uległy awaryjnemu wyłączeniu. Z tego względu próba dla tego typu ustawień jest niemiarodajna. Wyniki testu pokazują, że najlepiej spisuje się charakterystyka R35H. Różnice pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi nie są duże przy krótkim, jednostkowym przebiegu, natomiast mają wpływ na zasięg pojazdu.

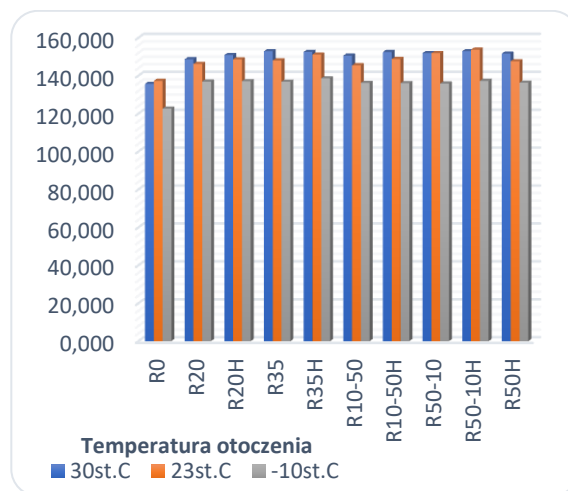
3.4. Obliczony zasięg

Ostatnią z badanych zagadnień w warunkach laboratoryjnych było obliczenie zasięgu pojazdu. Dla pojemności baterii trakcyjnej, która wynosi 33,2 kWh wykonano próby dla różnych charakterystyk odzysku energii, w trzech różnych temperaturach otoczenia. Zestawienie wyników wraz z wykresem przedstawiono poniżej (Tab. 4).

Tab. 4. Tabela obliczonego zasięgu pojazdu w kilometrach

	30°C	23°C	-10°C
R0	135.665	137.248	122.600
R20	148.668	146.179	136.878
R20H	150.885	148.618	137.061
R35	152.927	148.042	136.843
R35H	152.536	151.135	138.569
R10-50	150.581	145.470	136.165
R10-50H	152.467	148.771	136.066
R50-10	151.920	151.864	135.831
R50-10H	152.926	153.710	137.263
R50H	151.623	147.613	136.311

Analizując dane z tabeli, wynika, że w trakcie testów najlepiej spisuje się charakterystyka R50-10H oraz R35H, dla nich obliczony zasięg jest największy. Można też zauważyć pewną analogię zależną od temperatur (Rys. 8). Dla wartości powyżej 20°C zasięg znacznie zwiększa się w porównaniu do temperatur ujemnych. Wynika to z ograniczeń natężenia prądu ładowania przy rekuperacji energii hamowania. Odpowiada za to urządzenie BMS (Battery Management System), którego celem nadrzędnym jest zabezpieczenie baterii przed uszkodzeniem.



Rys. 8. Wykres obliczonego zasięgu w kilometrach

Na podstawie wyników (Rys. 8) widać, że temperatura otoczenia oddziałuje tak samo na wszystkie konfiguracje odzysku energii, przez co wyniki badań dla 23°C i 30°C są do siebie zbliżone. Można tę zależność zaobserwować również dla poprzednich testów.

3.5. Wpływ energii hamowania na komfort jazdy

Z prostych założeń wynika że najlepsza charakterystyka odzysku energii to ta, która najbardziej zwiększa zasięg pojazdu. Natomiast w rzeczywistości przeciążenia występujące podczas jazdy przy takiej charakterystyce obniżają znacząco wygodę podróżowania [3], która jest istotną cechą dla samochodów z XXI wieku. Porównując komfort jazdy użytkowanego samochodu przy różnych ustawieniach charakterystyki odzysku energii, trzech kierowców testowych z Instytutu BOSMAL dokonało przejazdów badanym pojazdem w temperaturze pomiędzy 5 - 12 stopni Celsjusza. Ocena każdego z nich jest subiektywna, ale dzięki temu można określić które charakterystyki nie nadają

się do codziennego użytku. Moment hamujący działający przy załączonym odzysku energii R50H i R50-10H jest tak duży, że uniemożliwia on płynną jazdę samochodem. Natomiast przy charakterystykach R20, R35 i R10-50 nie występuje możliwość wzmocnienia odzysku energii kinetycznej w trakcie hamowania, więc nie jest to optymalny wybór.

OK – płynna jazda, pełna kontrola nad pojazdem

NOK – Trudności w utrzymaniu prędkości, odczuwalne silne hamowanie, nieprzyjemne w czasie jazdy.

Tab. 5. Tabela subiektywnego odczucia komfortu jazdy

	kierowca		
	1	2	3
R0	OK	OK	OK
R20	OK	OK	OK
R20H	OK	OK	OK
R35	OK	OK	NOK
R35H	NOK	NOK	NOK
R10-50	NOK	OK	OK
R10-50H	NOK	OK	NOK
R50-10	OK	NOK	NOK
R50-10H	NOK	NOK	NOK
R50H	NOK	NOK	NOK

Bazując na zestawieniu danych powyżej (Tab. 5) można wywnioskować iż najbardziej komfortowym ustawieniem odzysku energii jest konfiguracja R20H.

4. Podsumowanie i wnioski

Otrzymane wyniki nie dostarczają jednoznacznych odpowiedzi w kwestii doboru charakterystyki odzysku energii. Obliczony zasięg prezentuje niewielką różnicę pomiędzy poszczególnymi próbami, nieprzekraczającą 9 kilometrów. Przy uwzględnieniu konfiguracji z wyłączoną rekuperacją energii hamowania maksymalna różnica kształtuje się na poziomie 18km. Niepomijalnym czynnikiem doboru charakterystyki odzysku energii jest komfort użytkownika samochodu. Z przeprowadzonych badań wynika że najlepszym ustawieniem jest charakterystyka R20H, która pozwala zwiększyć zasięg samochodu, od 11 km do 15 km względem jazdy z wyłączonym odzyskiem energii. Przy takiej konfiguracji komfort jazdy

jest porównywalny z konwencjonalnym samochodem spalinowym.

5. Literatura

- [1]. Dziennik Urzędowy L158 Unii Europejskiej - Opis próby zużycia energii - Załącznik 7.
- [2]. Rozporządzenie komisji (UE). 2017/1151 z dnia 1 czerwca 2017r. - Test WLTC i modyfikacja cyklu – Subzałącznik 1
- [3]. Zdzisław Juda - Hamowanie odzyskowe pojazdów z napędów elektrycznych – strategia sprawności odzysku i komfortu jazdy.
- [4]. Guoqing Xu, Weimin Li, Kun Xu, Zhibin Song – An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles.
- [5]. Boyi Xiao, Huazhong Lu, Hailin Wang, Jiageng Ruan, Nong Zhang – Enhanced Regenerative Braking Strategies for Electric Vehicles: Dynamic Performance and Potential Analysis.

Autorzy

mgr inż. Dawid Skórczak
inż. Wojciech Gawron
Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji
BOSMAL Sp. z o.o.
43-300 Bielsko-Biała, ul. Sarni stok 93