

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

WPLYW WARUNKÓW RUCHU DROGOWEGO NA ZUŻYCIE ENERGII PRZEZ SAMOCHÓD ELEKTRYCZNY

THE IMPACT OF TRAFFIC CONDITIONS ON THE ENERGY CONSUMPTION BY AN ELECTRIC CAR

Streszczenie: W artykule przedstawiono bieżące wyniki badań prowadzone przez Instytut Transportu Samochodowego przy współpracy z firmą Tesla Warszawa. Badania obejmują szereg jazd testowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego, wykonywanych na terenie miasta Warszawy oraz na terenach podmiejskich. Obiektami badań są samochody Tesla Model S oraz Model X. Opracowanie wyników dotyczy analizy czynnikowej i korelacyjnej w odniesieniu do parametrów opisujących warunki drogowe oraz ich wpływu na zapotrzebowanie energetyczne samochodu. Ponadto przygotowano model matematyczny uwzględniający między innymi zjawiska trakcyjne, występujące przy kontakcie opony z nawierzchnią drogi, wpływ warunków atmosferycznych oraz styl jazdy reprezentowany przez różnych kierowców. Model ten został zweryfikowany na podstawie prowadzonych testów drogowych. Podstawowym celem badań jest określenie, jakie charakterystyczne warunki pracy akumulatora są wymuszane przez eksploatację samochodu elektrycznego w rzeczywistym ruchu drogowym. Mają na to wpływ takie czynniki, jak: natężenie ruchu, styl jazdy kierowcy, nawierzchnia drogi, warunki pogodowe oraz parametry techniczne pojazdu. Sposób ładowania i rozładowywania akumulatora w czasie jazdy różni się bowiem znacząco od ładowania i rozładowywania w warunkach laboratoryjnych. Dlatego testy drogowe mają za zadanie pokazać, jak w praktyce funkcjonuje akumulator pojazdu elektrycznego.

Abstract: The article presents current research results conducted by the Motor Transport Institute in cooperation with Tesla Warszawa company. The tests include a number of test drives in real road conditions, realized in the city of Warsaw and in suburban areas. The test objects are Tesla Model S and Model X cars. The results are developed for factor and correlation analysis regarding the parameters describing road conditions and their impact on the energy demand of the car. In addition, the prepared mathematical model includes, among others, traction phenomena that occur when the tire contacts with road surface, weather conditions and driving style represented by different drivers. This model has been verified on the basis of realized road tests. The main purpose of the research is to define what characteristic battery conditions are enforced by operating an electric car in real traffic. It is influenced by such factors as: traffic density, driver's driving style, road surface, weather conditions and technical parameters of the vehicle. The method of charging and discharging the battery while driving varies significantly from loading and unloading in laboratory conditions. Therefore, road tests are meant to show how the battery of an electric vehicle functions in practice.

Słowa kluczowe: *samochód elektryczny, baterie litowo-jonowe, testy drogowe*
Keywords: *electric car, lithium-ion battery, road tests*

Wprowadzenie

Rozwój elektromobilności staje się coraz bardziej dynamiczny. Z roku na rok kolejni producenci samochodów włączają do swojej oferty pojazdy zasilane prądem, a w społeczeństwie samochody tego typu budzą coraz większe zainteresowanie. Warto przy tym podkreślić, że elektromobilność, to nie tylko nowa moda w motoryzacji, ale przede wszystkim duża zmiana technologiczna. Wyzwania w tym względzie dotyczą nie tylko producentów pojazdów, ale także jednostki wytwarzające energię elektryczną, dystrybutorów prądu, producentów ładowarek i wiele innych podmiotów. Powstają nowe wyzwania dla diagnostów samochodowych,

rzeczoznawców oraz dla pracowników serwisów. W samych samochodach także można zauważyć duże zmiany. Największy punkt zainteresowań przenosi się z napędu pojazdu na magazynowanie energii. Dotychczas, w samochodach spalinowych, najtrudniejszym wyzwaniem było dopracowanie napędu, aby zapewnić pojazdowi dobre właściwości użytkowe, dynamikę ruchu, ograniczyć zużycie paliwa i utrzymać się w wyznaczonych normach emisji spalin. Magazynowanie energii w postaci chemicznej, jako paliwa, było w tym przypadku prostym zagadnieniem. Tymczasem w pojazdach elektrycznych sam napęd daje większe możli-

wości i nie stanowi problemu tak złożonego i pełnego sprzecznych wymagań. Trudność występuje jednak przy konstruowaniu wydajnych akumulatorów, zarówno pod względem ich pojemności elektrycznej, masy, prądu ładowania i rozładowania oraz trwałości, jak i pod względem ceny, czy właściwości ekologicznych w całym cyklu istnienia. Zmiana w wyzwaniach technologicznych wiąże się ze zmianą w procesach badawczych. Każda nowa technologia wymaga bowiem zachowania specyficznych środków bezpieczeństwa, przestrzegania warunków eksploatacji sprzyjających bezawaryjnej i wydajnej pracy urządzeń, a także wyznaczania norm zapewniających odpowiednią jakość konstrukcji. Istotne jest więc opracowywanie nowych metod badawczych, dedykowanych szybko rozwijającym się technologiom stosowanym w samochodach elektrycznych [7]. W związku z faktem, że jednym z najważniejszych elementów samochodu staje się akumulator, w ramach prac badawczych właśnie jemu należałoby poświęcić szczególną uwagę. Można w tym względzie wymieniać co najmniej cztery grupy badań. Pierwsza z nich dotyczy względów bezpieczeństwa, w tym wycieku niebezpiecznych substancji lub emisji gazów, łatwości zapłonu, czy zabezpieczenia przed wysokim napięciem elektrycznym. Do drugiej grupy można zaliczyć badania związane z właściwościami eksploatacyjnymi. To od nich zależy realny zasięg całego samochodu, szybkość ładowania, czy dostępna moc pojazdu. Trzecia grupa badań obejmuje problemy ograniczonej trwałości baterii, czyli pogarszania się jej właściwości eksploatacyjnych w czasie. Czwarta, ostatnia grupa badań dotyczy natomiast procesów produkcji i unieszkodliwiania akumulatora, a więc jest istotna pod względem ekonomicznym. [3] W niniejszym artykule zostaną opisane badania przeprowadzone w kontekście właściwości eksploatacyjnych. Istnieją oczywiście sprawdzone metody pomiaru wielu parametrów eksploatacyjnych akumulatorów. Koncentrują się one głównie na rozładowywaniu akumulatora w warunkach statycznych, za pomocą kilku wybranych wartości prądu rozładowania, co pozwala na opracowanie odpowiedniej charakterystyki informującej o pojemności elektrycznej oraz sprawności. Warto jednak zauważyć, że w czasie rzeczywistej eksploatacji samochodu elektrycznego w warunkach ruchu drogowego praca akumulatora ma charakter dynamiczny. Prąd rozładowania zmienia się

w czasie, a dodatkowo rozładowanie akumulatora jest przeplatane z jego ładowaniem w czasie hamowania pojazdu, dzięki rekuperacji energii hamowania. Cykle ładowania i rozładowania mogą więc występować naprzemiennie nawet w okresach kilkusekundowych. Dynamiczne warunki pracy mogą w sposób istotny zmieniać na przykład rzeczywistą pojemność baterii. Dlatego wydaje się uzasadnione prowadzenie badań operacyjnych akumulatora w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych lub w warunkach zbliżonych, odwzorowujących użytkowanie w czasie jazdy. [3, 8]. Powstała koncepcja opracowania testu laboratoryjnego dla akumulatorów samochodów elektrycznych analogicznego do hamownianych testów silnikowych. W testach prowadzonych na silnikach spalinowych wyróżnić można testy statyczne, informujące o podstawowych cechach użytkowych oraz dynamiczne, wykorzystywane zazwyczaj w procedurach homologacyjnych. Te drugie bywają najczęściej przeprowadzane na hamowni podwoziowej, gdzie cały pojazd umieszczany jest na rolkach. Jednak w przypadku samochodów ciężarowych dopuszczalne jest badanie wymontowanego silnika na hamowni silnikowej. Badanie wciąż jednak ma charakter dynamiczny. Realizowany jest test obejmujący zadany przebieg prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Takie warunki mają symulować sytuację napędzania pojazdu znajdującego się w rzeczywistym ruchu miejskim. Ocenie podlega sumaryczne zużycie paliwa oraz sumaryczna emisja wybranych składników spalin w czasie całego cyklu hamownianego [2, 3]. W przypadku badań akumulatora, stanowisko laboratoryjne odwzorowywałoby przebieg obciążenia elektrycznego, symulujący typową eksploatację w ruchu drogowym. Oznaczałoby to, że akumulator w trakcie testu byłby okresowo ładowany (tak jak podczas odzysku energii hamowania). Ocenie podlegałaby całkowita pojemność akumulatora zmierzona po doprowadzeniu do jego granicznego rozładowania. W badaniach homologacyjnych silników spalinowych można wyróżnić dwa podejścia do opracowywanych przebiegów prędkości obrotowej i obciążenia: syntetyczne i rzeczywiste. W pierwszym przypadku przebiegi mają charakter teoretyczny. Obejmują przyspieszenie do zadanej prędkości, utrzymanie tej prędkości przez zadaną liczbę sekund oraz wyhamowanie pojazdu. Cykl jezdny obejmuje sekwencję kilkudziesięciu takich manewrów. Charakteryzują

się one prostą budową, ale przy tym w niedoskonały sposób odwzorowują faktyczne warunki panujące w warunkach drogowych. Natomiast w drugim przypadku przebiegi stanowią odwzorowanie rzeczywistych warunków, zarejestrowanych z przejazdów w ruchu drogowym. Wydaje się, że właśnie to ostatnie podejście powinno zostać wykorzystane przy opracowaniu testów laboratoryjnych dla akumulatorów samochodów elektrycznych, ponieważ mają one w możliwie największym stopniu odzwierciedlać pracę akumulatora w czasie rzeczywistej eksploatacji [2]. Do realizacji powyższego celu można wykorzystać istniejące już testy jezdne, wyznaczając jedynie w sposób teoretyczny, jak będzie kształtować się przebieg mocy na wyjściu z akumulatora. Trzeba jednak podkreślić, że specyfika ruchu samochodu elektrycznego może różnić się od sposobu poruszania się klasycznego pojazdu. Ma na to wpływ inna charakterystyka napędu, w tym: stosunkowo duża moc, stały moment obrotowy, brak zmiennych przełożeń, jak również układ hamowania pozwalający na odzysk energii, zachęcający do bardziej powolnego zmniejszania prędkości [3]. W kontekście tych różnic uzasadniona wydaje się potrzeba zarejestrowania nowych przebiegów opisujących ruch samochodu elektrycznego w rzeczywistych warunkach drogowych. Wobec powyższych spostrzeżeń i założeń postanowiono przeprowadzić badania obejmujące specyfikę ruchu pojazdu elektrycznego w ruchu miejskim. Ponadto opracowano model matematyczny opisujący pracę układu napędowego takiego samochodu w celu wyznaczenia warunków pracy akumulatora. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań drogowych wykonano identyfikację parametrów modelu i przedstawiono przykładowe przebiegi obciążenia elektrycznego akumulatora samochodu elektrycznego.

Model matematyczny napędu elektrycznego

Zadaniem modelu jest wyznaczenie przebiegu mocy pobieranej z akumulatora (oraz na przemian dostarczanej do niego) na podstawie przebiegu prędkości jazdy samochodu, przy znajomości podstawowych parametrów użytkowych pojazdu, stanowiących parametry modelu. Powinien więc opisywać najważniejsze zjawiska fizyczne występujące podczas przekształcania energii zawartej w baterii do energii potrzebnej do napędu kół jezdnych. Wśród tych zjawisk

można wymienić: opory toczenia wynikające z kontaktu opony z nawierzchnią drogi, opory aerodynamiczne samochodu, energię potrzebną do zmiany prędkości samochodu, ograniczoną sprawność urządzeń transmitujących energię mechaniczną, ograniczoną sprawność urządzeń przekształcających energię elektryczną, odzyskiwanie energii hamowania i ograniczenia występujące przy tym odzysku, nakładanie się energii oporów na energię napędu pojazdu oraz energii odzyskiwanej podczas hamowania. Ze względu na zmienny charakter powyższych zjawisk w czasie, zostały one sprowadzane do mocy, stanowiącej odniesienie jednostki energii do jednostki czasu. W celu zobrazowania funkcjonowania modelu powyższe zjawiska zostaną zaprezentowane na przykładzie teoretycznego przebiegu prędkości, obejmującego dwa kolejne cykle przyspieszania i hamowania pojazdu. Przebieg ten został pokazany na rys. 1. Siły oporów, odpowiednio toczenia i powietrza zostały opisane wzorami (1) oraz (2) [4].

$$F_t = f_t \cdot (1 + A_d \cdot V^2) \cdot m \cdot g \quad (1)$$

gdzie:

F_t – siła oporów toczenia,
 f_t – podstawowy współczynnik oporów,
 A_d – dodatkowy współczynnik oporów,
 V – prędkość pojazdu,
 m – masa pojazdu,
 g – przyspieszenie grawitacyjne.

$$F_o = 0,047 \cdot C_x \cdot A \cdot V^2 \quad (2)$$

gdzie:

F_o – siła oporu powietrza,
 C_x – współczynnik oporu powietrza,
 A – pole powierzchni czołowej pojazdu,
 V – prędkość pojazdu.

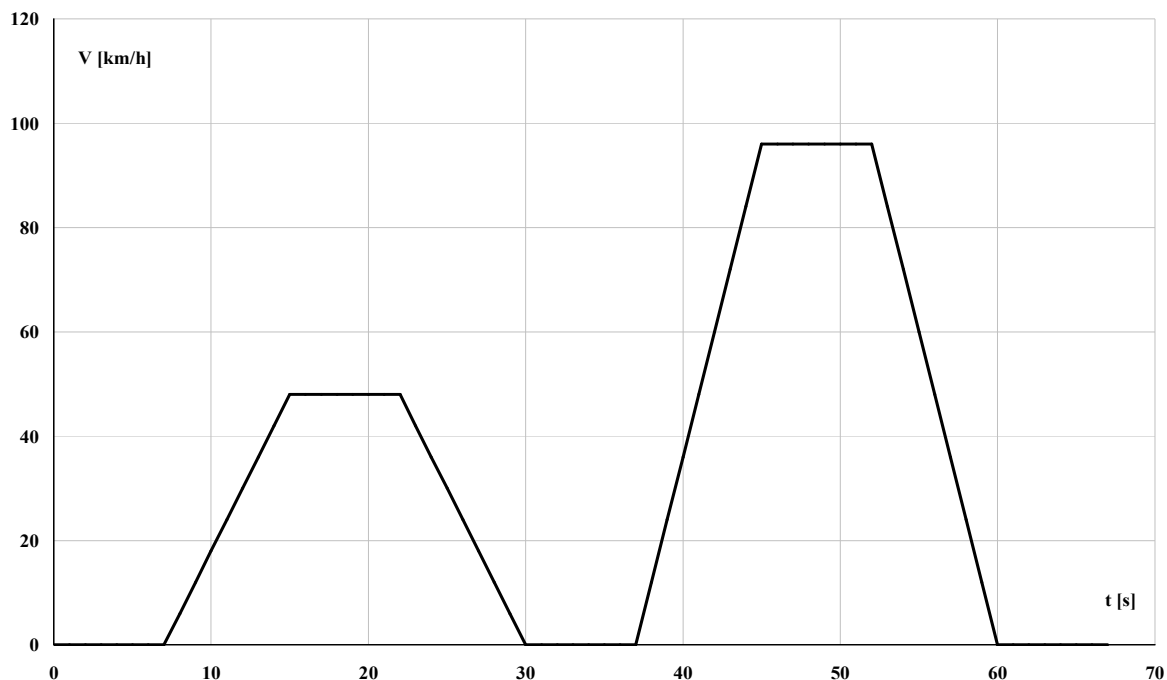
Moc sumaryczna oporów została opisana wzorem (3) [4].

$$N_o = \frac{(F_t + F_o) \cdot V}{\eta_m} \quad (3)$$

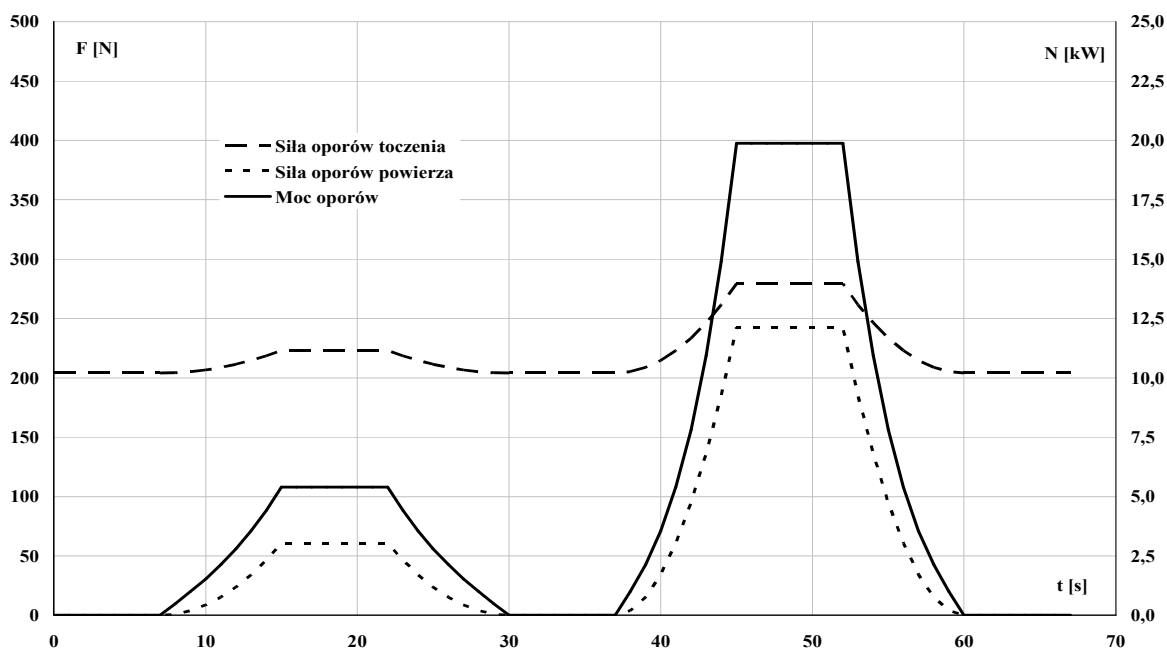
gdzie:

N_o – moc oporów,
 F_t – siła oporów toczenia,
 F_o – siła oporu powietrza,
 V – prędkość pojazdu,
 η_m – sprawność mechaniczna napędu.

Na rys. 2. przedstawiono przebieg siły oporu toczenia, siły oporu powietrza oraz mocy oporów obliczonych dla wzorcowego przebiegu prędkości z rys. 1.



Rys. 1. Przebieg teoretyczny prędkości pojazdu



Rys. 2. Przebieg teoretyczny sił i mocy oporów

Moc potrzebną do zwiększania prędkości samochodu oraz moc odzyskiwaną w trakcie hamowania można obliczyć porównując ze sobą kolejne wartości energii kinetycznej pojazdu, odniesione do jednostki czasu. Po odpowiednich przekształceniach wyrażono to wzorem (4). Na rys. 3. przedstawiono przebieg mocy służącej do zmiany prędkości (oddzielnie dla przyspieszania i hamowania) oraz przebieg prędkości.

$$N_k = \frac{m \cdot (V_t^2 - V_{t-\Delta t}^2)}{2 \cdot \Delta t} \quad (4)$$

gdzie:

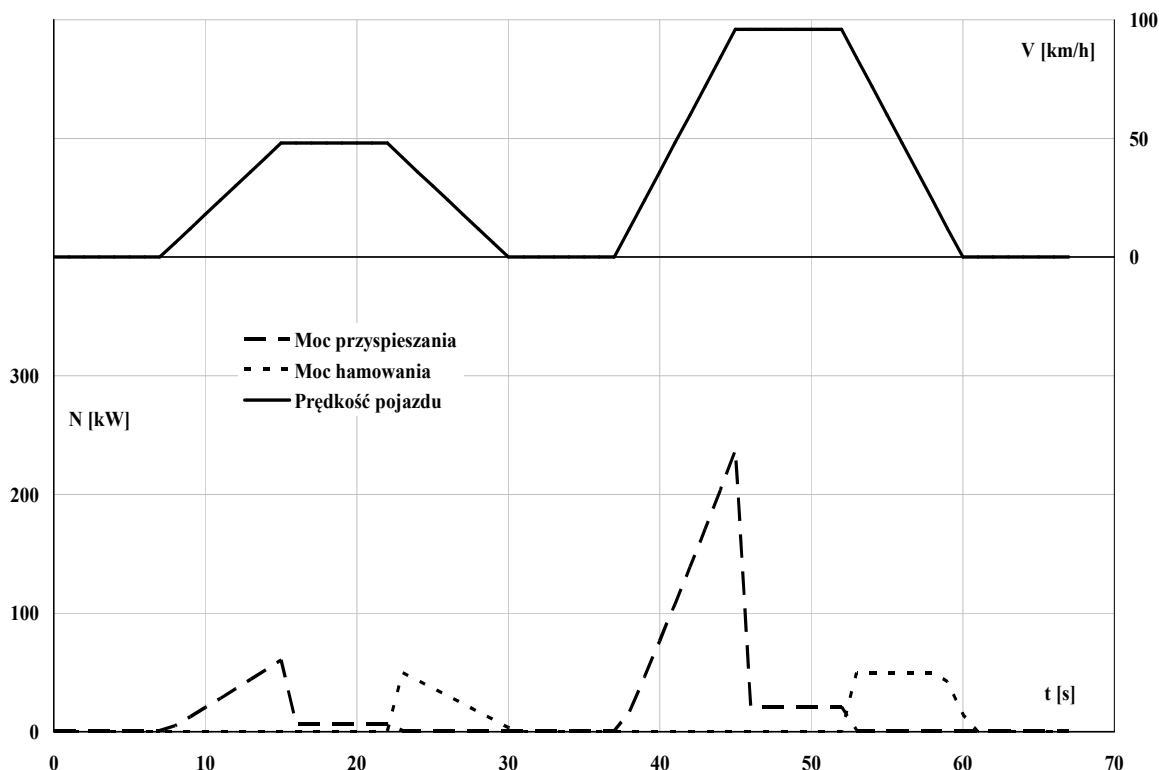
N_k – moc kinetyczna,

m – masa pojazdu,

V_t – prędkość w bieżącej chwili,

$V_{t-\Delta t}$ – prędkość w poprzedniej chwili,

Δt – okres próbkowania.



Rys. 3. Przebieg teoretyczny mocy potrzebnej do zmiany prędkości samochodu oraz prędkości samochodu

Dodatkowym czynnikiem pobierającym moc elektryczną z akumulatora jest suma odbiorników prądu znajdujących się na pokładzie samochodu. Jej wartość będzie powiększać moc pobieraną podczas przyspieszania. Warto też zauważyć, że moc oporów ruchu będzie powiększała moc potrzebną do przyspieszania i jednocześnie będzie pomniejszała moc możliwą do odzyskania podczas hamowania. Podobne zjawisko będzie wiązało się również z ograniczoną sprawnością mechaniczną układu napędowego. Kolejnym czynnikiem jest ograniczona maksymalna moc odzyskiwana z procesu hamowania, wynikająca z ograniczonej mocy urządzeń przetwarzających energię elektryczną do ładowania akumulatora [6]. Ostatnim z modelowanych zjawisk jest ograniczona sprawność samego akumulatora, która może zmieniać się wraz z mocą pobieranego prądu. Zależność opisująca sprawność akumulatora może mieć charakter funkcji kwadratowej. Analityczna postać funkcji została wyrażona wzorem (5).

$$\eta_e = w_1 \cdot N_e^2 + w_2 \cdot N_e + w_3 \quad (5)$$

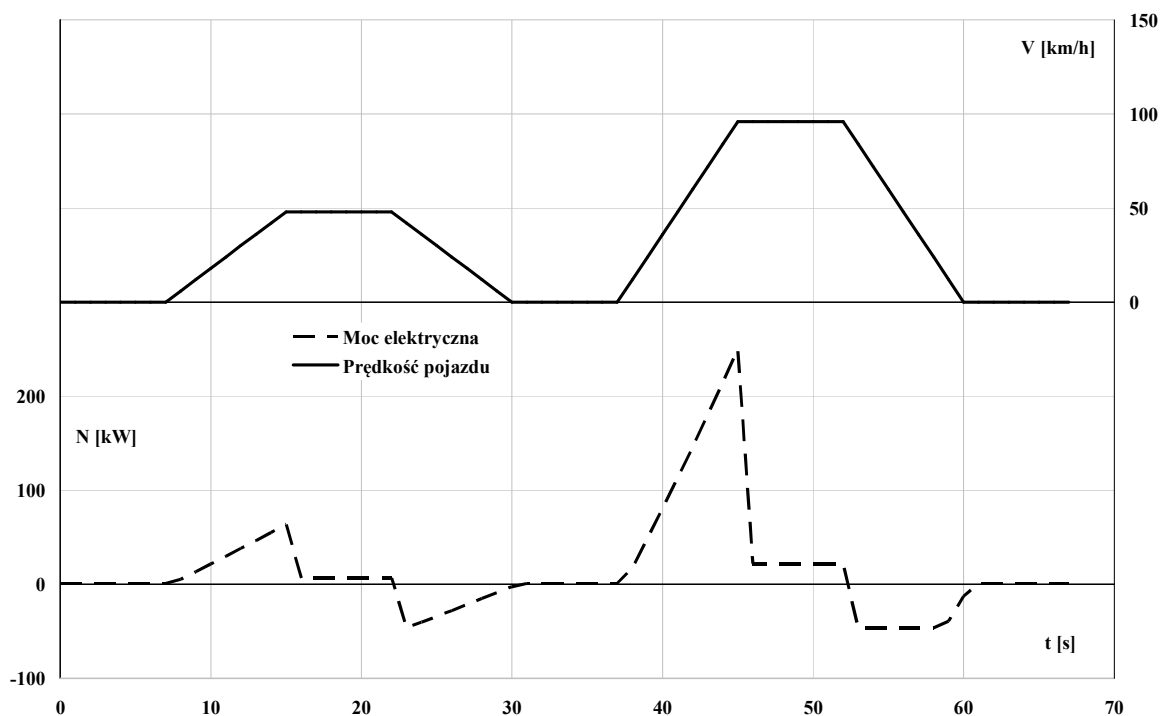
gdzie:

- η_e – sprawność baterii,
- w_1, w_2, w_3 – współczynniki sprawności,
- N_e – moc prądu.

Całokształt wymienionych zjawisk został przedstawiony na rys. 4. Znajduje się na nim obliczony przebieg mocy prądu na wyjściu z akumulatora oraz teoretyczny przebieg prędkości, stanowiący podstawę do obliczeń. W tabeli 1. Przedstawiono wartości liczbowe, które posłużyły do prezentacji modelu.

Tabela 1.

Wielkość fizyczna	Wartość liczbowe	Jednostka miary
m	2500	kg
f_t	0,008	-
A_d	0,00004	-
C_x	0,35	-
A	1,8	m^2
η_m	0,9	-
w_1	1×10^{12}	-
w_2	1×10^8	-
w_3	0,9	-



Rys. 4. Przebieg teoretyczny mocy elektrycznej oraz prędkości samochodu

Badania drogowe

Badania drogowe zostały wykonane przez Instytut Transportu Samochodowego, przy współpracy z firmą Tesla Warszawa. Do badań prezentowanych w niniejszym artykule został wykorzystany samochód Tesla Model X w wersji napędu 90D. Pojazd był wyposażony w trzy silniki elektryczne o łącznej mocy 540 KM, napędzające obydwie osie. Bateria miała pojemność 90 kWh i maksymalną moc na poziomie 350 kW. Masa własna pojazdu wynosiła 2475 kg. Samochód był także wyposażony w funkcję jazdy częściowo autonomicznej (autopilot 2. generacji, z oprogramowaniem w wersji 9.0), co było wykorzystywane w prezentowanych badaniach. Trasa przejazdu obejmowała ruch miejski, w ścisłym centrum Warszawy, wzdłuż ulic: Marszałkowskiej, al. Jerozolimskich, Towarowej i al. Solidarności. Ulice te tworzyły zamknięty obwód o kształcie zbliżonym do kwadratu, o łącznej długości trasy około 6,5 km. Długość trasy zmieniała się w zależności od zajmowanych pasów ruchu. Wysokość nad poziomem morza wynosiła 137 m i zmieniała się w zakresie +/- 6 m. Kąt nachylenia drogi nie przekraczał 1° , a więc teren był stosunkowo płaski. Na rys. 5. przedstawiono mapę z zaznaczoną trasą przejazdu.

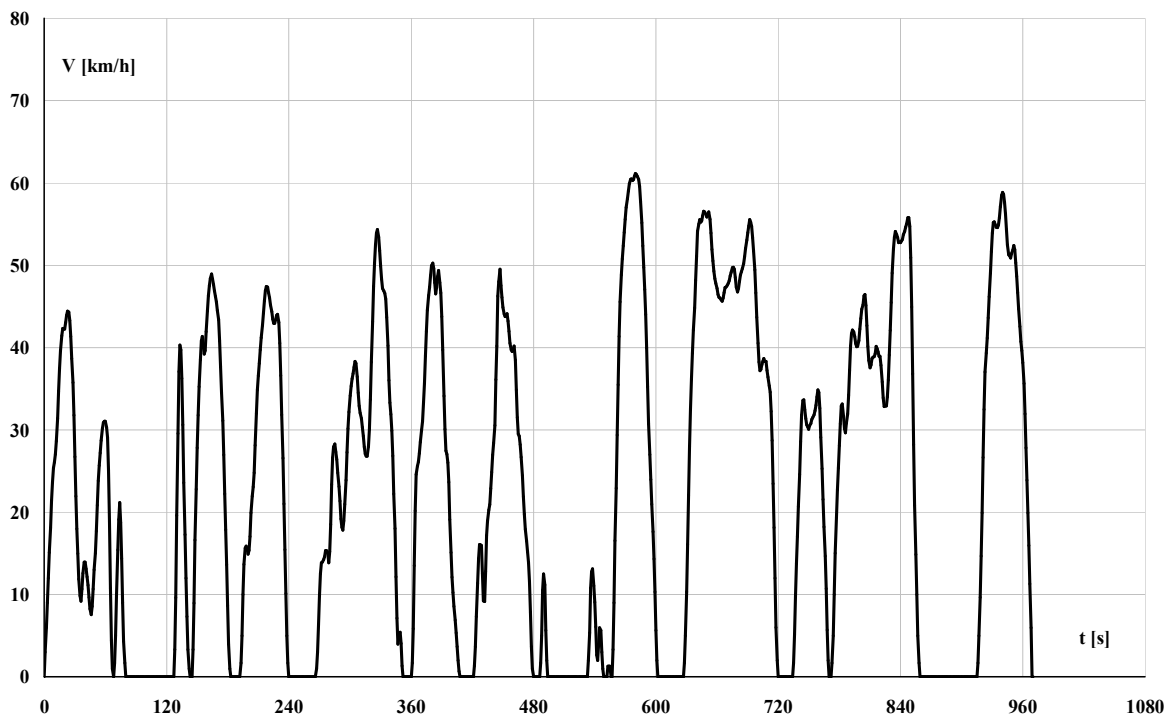


Rys. 5. Mapa z trasą przejazdu

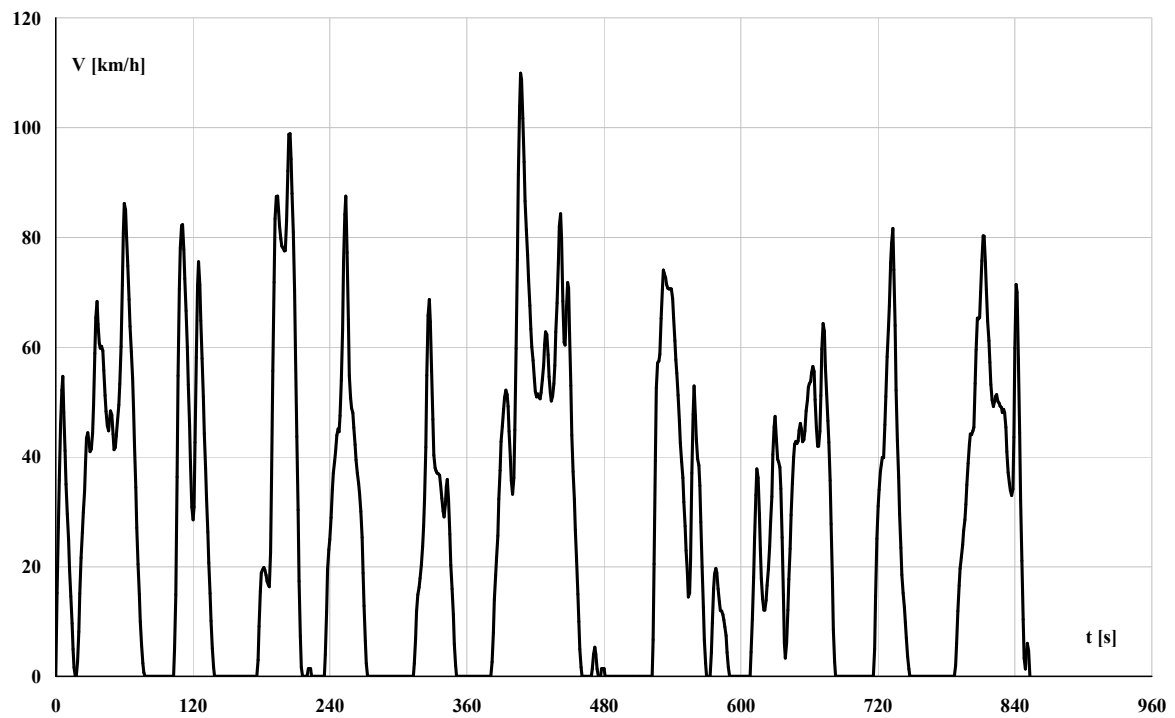
Badania były prowadzone w czasie od 5 do 27 lutego 2019 roku, w dni powszednie, w godzinach od 14.00 do 17.00, a więc w czasie stosunkowo dużego natężenia ruchu w tym miejscu. Czas pojedynczego przejazdu wahał się w granicach od 15 do 22 min. Warunki atmosferyczne w czasie jazd testowych wahały się w niewielkim stopniu, ponieważ opisywane w artykule przejazdy wykonywano jedynie w dni o założonych warunkach. Temperatura wahała się w zakresie od 8 do 13°C , ciśnienie od 970 do 995 hPa, a wilgotność powietrza od 30 do 50%. Badania wykonywano przy

prędkości wiatru nie przekraczającej 10 km/h, przy suchej nawierzchni i bez opadów atmosferycznych. W czasie badań włączone było ogrzewanie kabiny, przy stałych ustawieniach temperatury we wnętrzu na poziomie 22°C. Włączone było także oświetlenie zewnętrzne oraz ekran główny służący do śledzenia pojazdu za pomocą GPS-a i wyświetlający komunikaty z komputera pokładowego. Pozostałe odbiorniki prądu były wyłączone. Za każdym razem stopień naładowania akumulatora przed testem wynosił co najmniej 50% i nie więcej niż 80%. Do prowadzenia pojazdu wykorzystano dwóch kierowców testowych, z których każdy reprezentował dwa warianty jazdy: spokojny oraz dynamiczny. Dodatkowo wykorzystano funkcję autopilota, który pozwalał na prowadzenie samochodu przez co najmniej 67% czasu trwania przejazdu. Przez pozostały czas przejazdu kierowca testowy musiał samodzielnie kontrolować poruszanie się samochodu, realizując spokojny tryb jazdy. Przejazdy realizowane przez

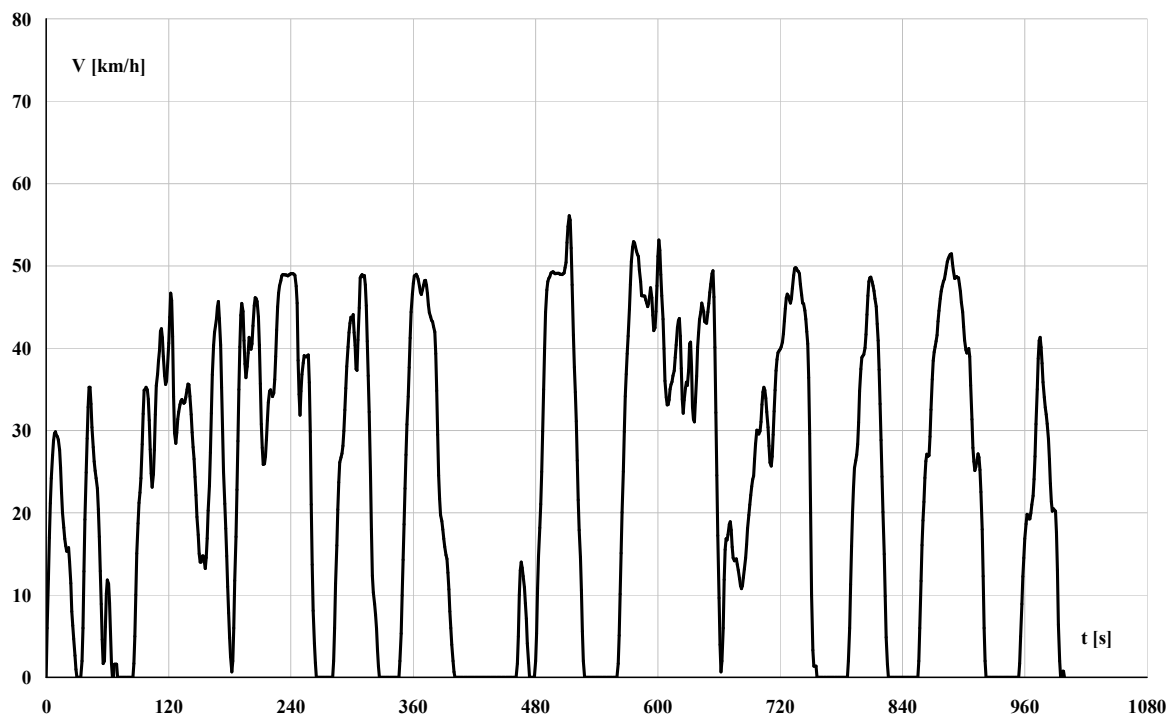
autopilota traktowane były w obliczeniach statystycznych tak, jakby był to trzeci, niezależny kierowca. Nie dysponował on jednak możliwością zmiany trybu jazdy ze spokojnego na dynamiczny. Każdy z dwóch kierowców testowych, dla każdego z dwóch trybów jazdy wykonał po trzy realizacje przejazdów (łącznie 12 testów), a dodatkowo autopilot wykonał trzy przejazdy. Łącznie stanowiło to 15 realizacji badania drogowego, odpowiadającego różnemu charakterowi jazdy. W czasie badań rejestrowano prędkość i położenie samochodu za pomocą urządzenia GPS. Jednocześnie komputer pokładowy przedstawiał średnie drogowe zużycie energii elektrycznej w skali całego przejazdu. Na rys. od 6. do 8. przedstawiono trzy przykładowe przebiegi prędkości samochodu, odpowiadające kolejno: spokojnej jeździe realizowanej przez pierwszego kierowcę, dynamicznej jeździe realizowanej przez pierwszego kierowcę oraz jeździe realizowanej przez autopilota.



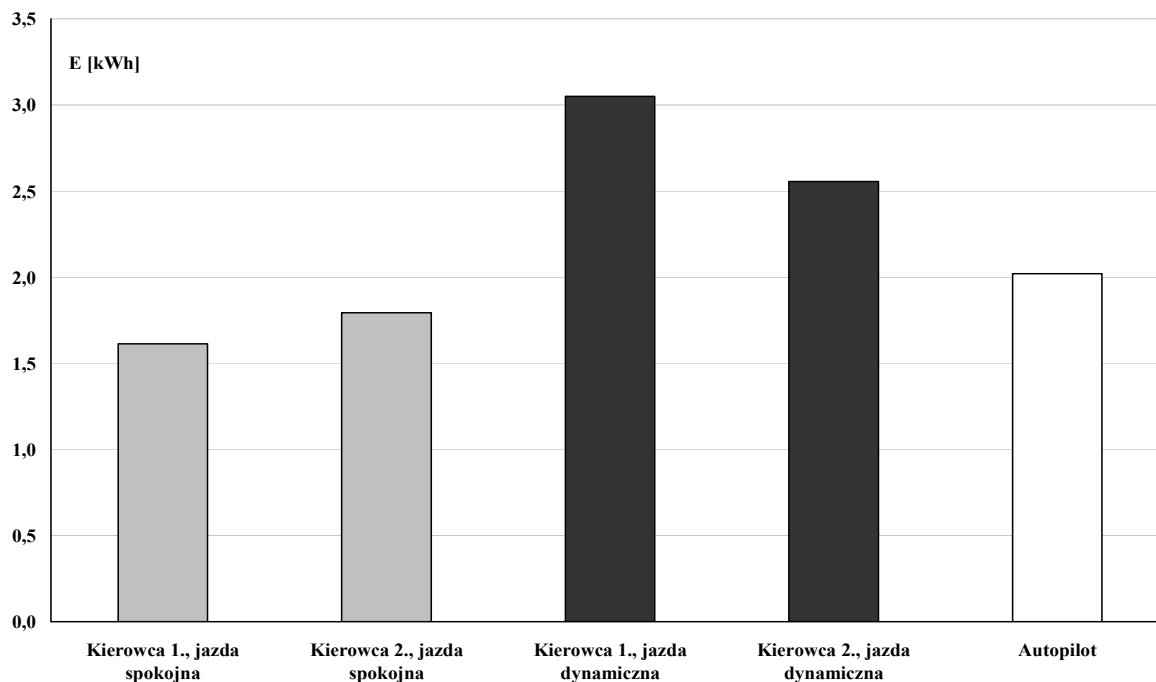
Rys. 6. Przebieg prędkości przy jeździe spokojnej



Rys. 7. Przebieg prędkości przy jeździe dynamicznej



Rys. 8. Przebieg prędkości przy jeździe realizowanej przez autopilota



Rys. 9. Porównanie średniego zapotrzebowania na energię elektryczną

Na rys. 9. zaprezentowano porównanie średniego zapotrzebowania na energię elektryczną w czasie przejazdów, przy uwzględnieniu różnych trybów jazdy dla poszczególnych kierowców. Z rys. 9. wynika, że jazda dynamiczna w przypadku obydwu kierowców miała zbliżony charakter, choć zauważalne są różnice w prowadzeniu samochodu przez dwie różne osoby. Podobnie przedstawia się sytuacja w przypadku jazdy spokojnej. Natomiast jazda z udziałem autopilota ma charakter pośredni, pomiędzy jazdą dynamiczną i spokojną.

Analiza wyników

Przygotowany model matematyczny przekształca przebieg prędkości samochodu w przebieg mocy prądu pobieranego z akumulatora. Na podstawie tego drugiego można obliczyć średnie drogowe zużycie energii, korzystając ze wzoru (6.) [3].

$$e_s = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \Delta t}{S} \quad (6)$$

gdzie:

e_s – średnie drogowe zużycie energii elektrycznej.

N_i – bieżąca moc poboru prądu w i -tej chwili,

Δt – okres próbkowania,

n – liczba punktów pomiarowych.

Średnie drogowe zużycie energii można następnie porównać z tą samą wielkością podawaną przez komputer pokładowy samochodu dla każdej realizacji testu jezdny. Będą wówczas występowały pewne rozbieżności pomiędzy wskazaniami komputera pokładowego oraz modelem matematycznym. Wynikają one z niedostatecznej dokładności doboru parametrów modelu. Istniała więc potrzeba identyfikacji parametrów modelu w taki sposób, aby w możliwie największym stopniu podawane przez niego średnie drogowe zużycie energii odpowiadało wartościom zarejestrowanym w samochodzie. Identyfikacja modelu odbywała się poprzez proces optymalizacji za pomocą algorytmu Gaussa [1]. Funkcją kryterialną było odchylenie standardowe pomiędzy wynikami z modelu i z samochodu. W tabeli 2. przedstawiono wartości identyfikowanych parametrów przed optymalizacją i po jej zastosowaniu, wraz z wybranymi wielkościami statystycznymi opisującymi różnice pomiędzy wynikami pochodzącymi z modelu i zarejestrowanymi w czasie badań.

Spośród nieopisanych wcześniej symboli:

N_s – moc stałego poboru prądu przez odbiorniki na pokładzie samochodu,

N_{ak} – maksymalna moc odzyskiwana przez układ rekuperacji energii,

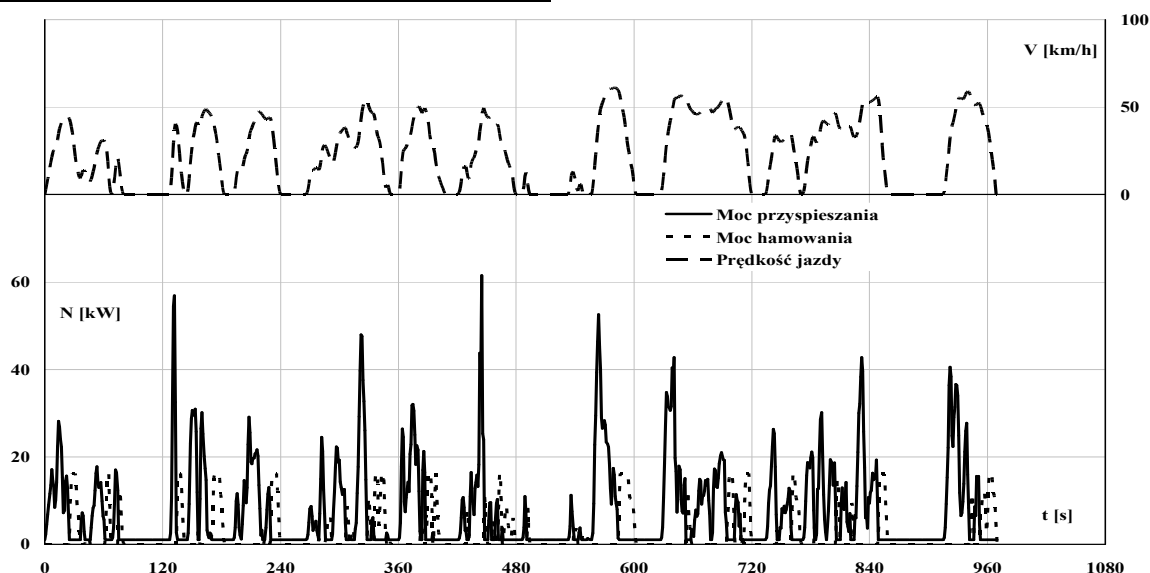
S – odchylenie standardowe (będące podstawową miarą błędów),

B_{sr} – średni błąd względny (miara dodatkowa).

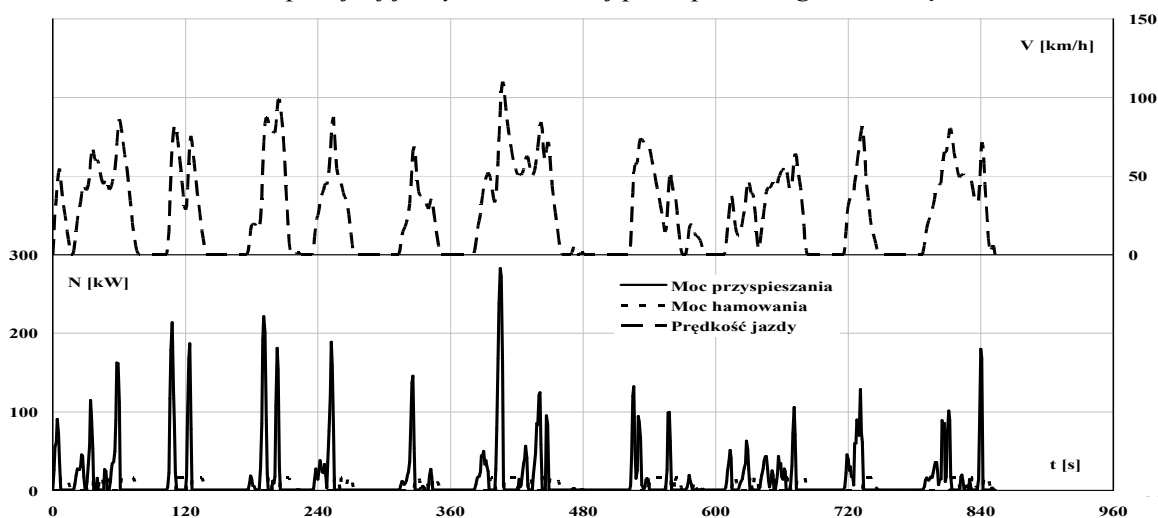
Tabela 2

Wielkość fizyczna	Wartość przed optymalizacją	Wartość po optymalizacji	Jednostka miary
m	2600	2600	kg
f_t	0,008	0,0135	-
A_d	0,0004	0,000013	-
C_x	0,3	0,2	-
A	2,4	2,5	m^2
N_s	1000	1020	W
N_{ak}	10 000	16 100	W
η_m	0,9	0,7	-
w_1	1×10^{12}	0	-
w_2	1×10^8	0	-
w_3	0,9	0,95	-
S	273	101	-
$B_{\xi r}$	13	6	%

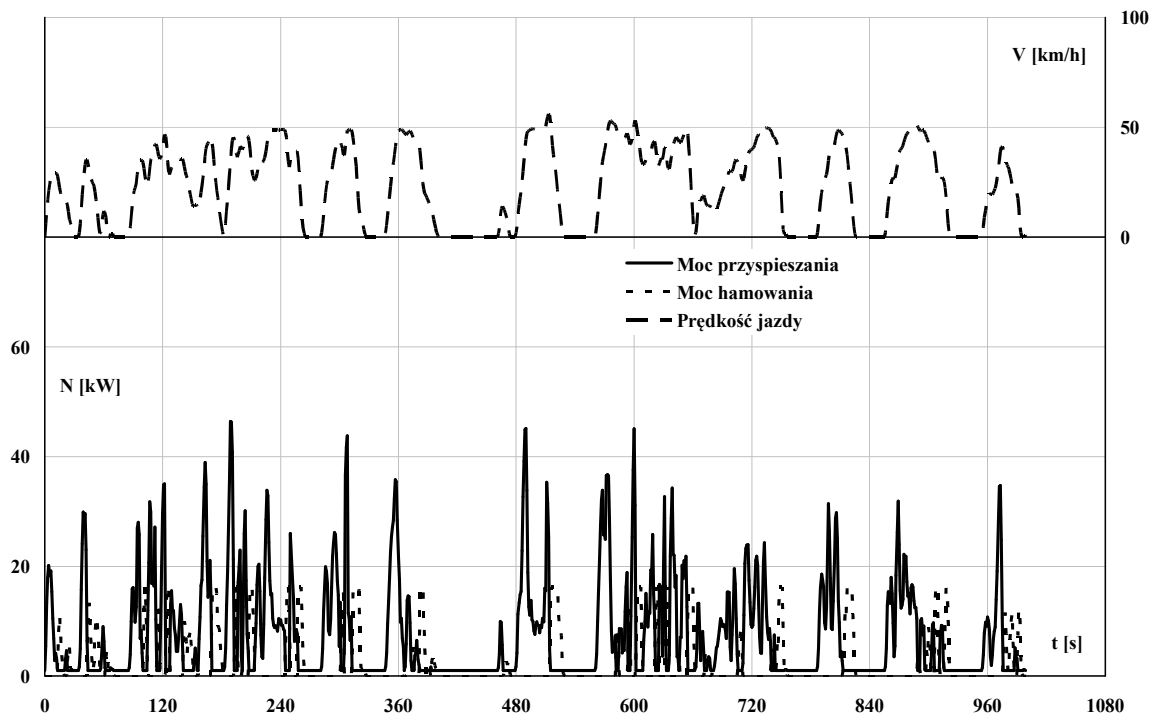
Jak widać w tabeli 3., osiągnięto zgodność pomiędzy wynikami na poziomie średniego błędu względnego wynoszącego około 6%. Wydaje się więc uzasadnione stwierdzenie, że model w zadowalającym stopniu odwzorowuje zjawiska zachodzące w układzie napędowym samochodu elektrycznego. Na rys. od 10. do 12. przedstawiono przebiegi mocy na kołach jezdnych potrzebnej do napędzania samochodu oraz mocy odzyskiwanej z procesu hamowania wraz z przebiegiem prędkości jazdy samochodu.



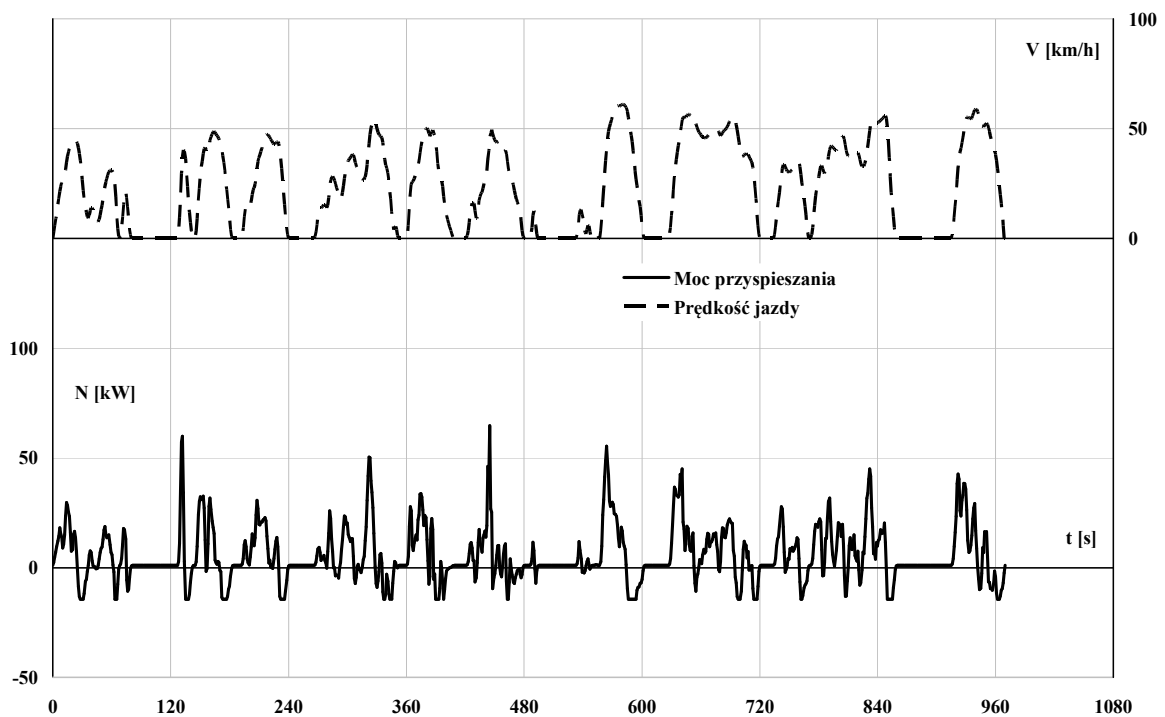
Rys. 10. Przebiegi mocy na kołach jezdnych i prędkości dla spokojnej jazdy realizowanej przez pierwszego kierowcę



Rys. 11. Przebiegi mocy na kołach jezdnych i prędkości dla dynamicznej jazdy realizowanej przez pierwszego kierowcę



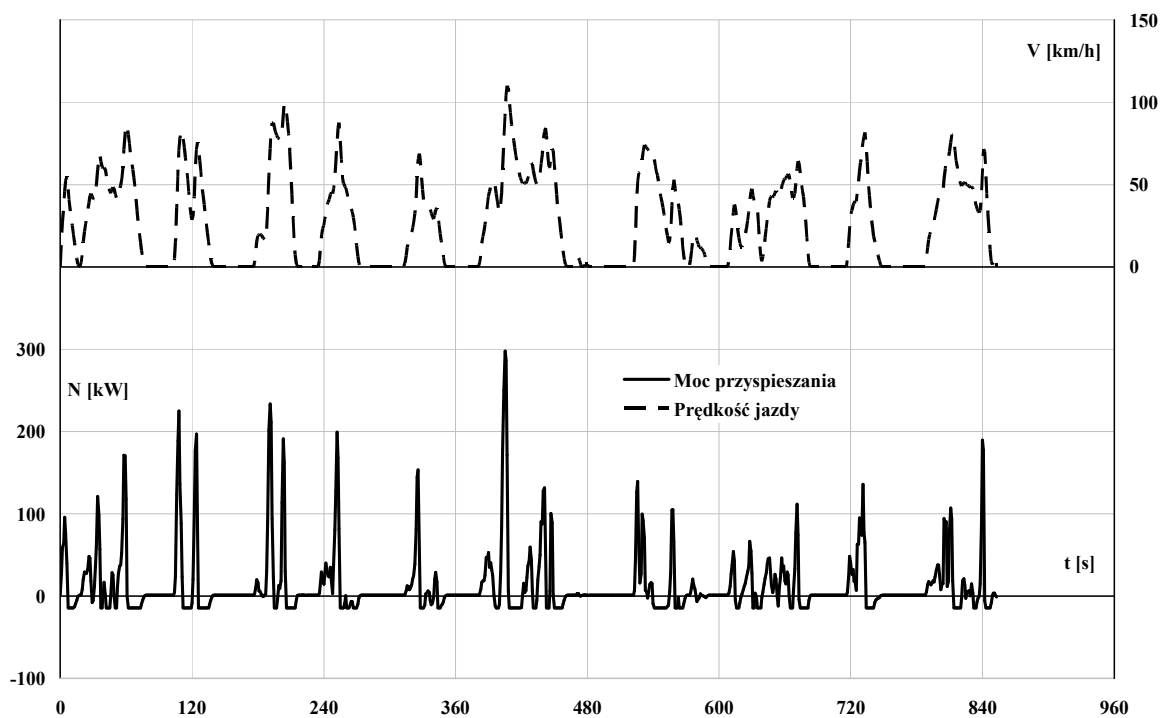
Rys. 12. Przebiegi mocy na kołach jezdnych i prędkości dla jazdy realizowanej przez autopilota



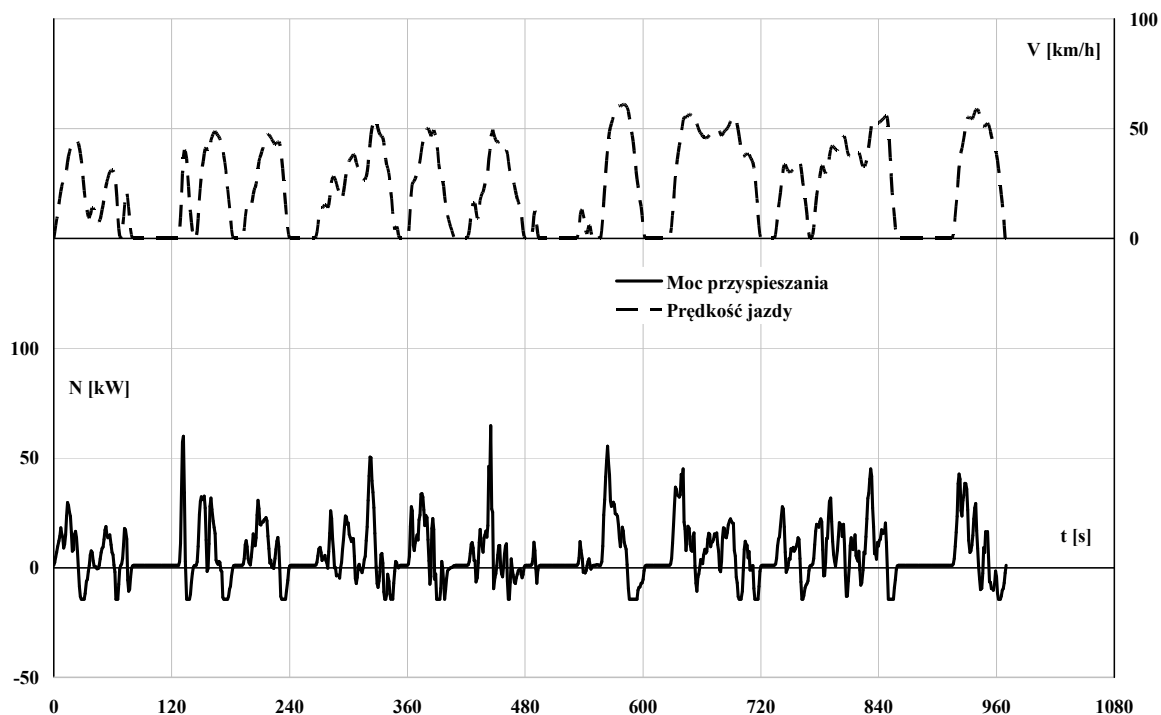
Rys. 13. Przebieg mocy pobieranej z akumulatora dla spokojnej jazdy realizowanej przez pierwszego kierowcę

Na rys. od 13 do 15 przedstawiono natomiast przebiegi mocy pobieranej z akumulatora odpowiadającej trzem przykładowym przejazdom zaprezentowanym powyżej. Przedstawione na trzech ostatnich wykresach przebiegi różnią się wartościami skrajnymi oraz średnimi.

Wynika to z faktu, że odpowiadają trzem różnym sposobom jazdy. Wynika z tego ważny wniosek, jak istotny jest charakter jazdy w kontekście zużycia energii przez samochód elektryczny [5].



Rys. 14. Przebieg mocy pobieranej z akumulatora dla dynamicznej jazdy realizowanej przez pierwszego kierowcę



Rys. 15. Przebieg mocy pobieranej z akumulatora dla jazdy realizowanej przez autopilota

Podsumowanie

Zaprezentowane na rys. od 13 do 15 przebiegi mocy prądu pobieranego z akumulatora stanowią, reprezentację typowych warunków pracy akumulatora w czasie jego eksploatacji w

rzeczywistym ruchu drogowym, w warunkach miejskich. Proponuje się, aby właśnie tego typu przebiegi były wykorzystywane w trakcie badań certyfikacyjnych, czy homologacyjnych akumulatorów [2]. Jednym ze szczególnych za-

stosowań prezentowanego modelu jest wyznaczenie zużycia energii oraz szacowanie zasięgu samochodu. W tym celu należy wprowadzić do modelu parametry odpowiadające danemu pojazdowi oraz przykładowy przebieg reprezentujący typowe warunki jazdy. Model wygeneruje dzięki temu przebieg mocy obciążającej akumulator, który należy zastosować w procedurze pomiarowej. Przeprowadzając akumulator przez zadany test kilkakrotnie, od pełnego jego naładowania do granicznego rozładowania, można wyznaczyć realną pojemność elektryczną, a także oszacować, jaki będzie zasięg samochodu wyposażonego w badany akumulator. W przypadku akumulatorów uniwersalnych, które można zamontować w różnych samochodach, można przygotować zestaw testów, wygenerowanych dla różnych parametrów samochodu oraz dla różnych warunków ruchu. Po przeprowadzeniu testów, wyniki można umieścić w tabeli opisującej, jakim zasięgiem będą odznaczały się poszczególne modele samochodów przy różnych warunkach drogowych. Opracowywane w ten sposób przebiegi można wykorzystać też do badań trwałościowych akumulatora. Testy mogą być wykonywane przy różnych temperaturach otoczenia w laboratorium, ale za każdym razem przebieg obciążenia akumulatora będzie odwzorowywał rzeczywiste warunki eksploatacji, przy uwzględnieniu parametrów pojazdu, w którym bateria będzie montowana.

Piśmiennictwo

- [1]. Brandt S.: Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe, PWN, Warszawa 1999.
- [2]. Chłopek Z., Szczepański T.: *A method of synthesizing vehicle-driving tests based on an analysis of typical tasks performed by an internal combustion engine*, Archiwum Motoryzacji, 3/2017 PIMOT, Warszawa
- [3]. Chłopek Z., Szczepański T.: *Ekologiczne aspekty eksploatacji samochodów elektrycznych na przykładzie oceny zużycia energii*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, 2013.
- [4]. Lanzendoerfer J., Szczepaniak C.: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [5]. Skarbak-Żabkin A., Szczepański A.: *Impact of the driver behavior on the energy recuperation In an electric vehicle*, Journal of KONES, 2017.
- [6]. Skarbak-Żabkin A., Szczepański T., Ślęzak M.: *Zwiększenie efektywności energetycznej samochodu poprzez optymalizację układu rekuperacji energii*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, KOMEL, 2017.
- [7]. Skarbak-Żabkin A., Szczepański T., Świdorski A.: *Limitations associated with recuperation of energy in the non-hybrid cars resulting from the real conditions of urban traffic*, 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017.
- [8]. Szczepański T., Skarbak-Żabkin A., Dziedziak P.: *Impact of the road conditions on the amount of braking energy*, Combustion Engines, 2017