

Article citation info:

Hajduga A, Kieracińska A. The Use of Variable-Speed Mechanical Transmission in Electric Drives. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 75(1): 0-0, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL75.ART3>

The Use of Variable-Speed Mechanical Transmission in Electric Drives

Zastosowanie wielobiegowej przekładni mechanicznej w napędzie elektrycznym

ARKADIUSZ HAJDUGA¹, ANNA KIERACIŃSKA²

Przemysłowy Instytut Motoryzacji (PIMOT)
Politechnika Warszawska

Summary

Electric vehicles are now a viable alternative to their combustion counterparts. Despite their obvious advantages, one prominent disadvantage is their limited driving range, which strongly depends on the operating conditions. Therefore, it seems purposeful to adapt the configuration of the electric drive to obtain its high efficiency regardless of the operating conditions of the drive, which will in turn reduce the energy consumption without increasing the energy storage capacity of the electrochemical battery.

This article will describe the impact of the applied variable-speed transmission on the electric power consumption. The use of variable-speed transmission solutions in electric drives allows to adapt the electrical machine's operating parameters to the load conditions to keep its operating efficiency as close to high-performance parameter range as possible. A computer simulation study has been carried out to verify the influence of applying an additional element of the drive train system on the energy consumption. The study compares two setups with different transmission types used. Namely, one configuration features a constant-speed transmission drive whilst the other a transmission allowing the selection of three speeds. The results obtained on the basis of computer simulation confirmed the positive impact of the variable-speed transmission on energy consumption in

Streszczenie

Pojazdy z napędem elektrycznym są dziś realną alternatywą dla pojazdów spalinowych. Pomimo ich niewątpliwych zalet istotną niedogodnością jest ich ograniczony zasięg jazdy, który silnie zależy od warunków eksploatacji. Celowe, zatem wydaje się dostosowanie konfiguracji napędu elektrycznego w taki sposób, aby bez względu na warunki eksploatacji

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warsaw, Poland; e-mail: arkadiusz.hajduga@simr.pw.edu.pl

² Przemysłowy Instytut Motoryzacji (PIMOT), ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warsaw, Poland; e-mail: a.kieracińska@pimot.eu

napęd uzyskiwał możliwie wysokie sprawności, co wpłynie na zmniejszenie zużycia energii, bez konieczności zwiększania pojemności energetycznej baterii elektrochemicznej.

W artykule przedstawiono wpływ zastosowania przekładni wielobiegowej na zużycie energii elektrycznej. Dzięki wyposażeniu napędu elektrycznego w przekładnię wielobiegową istnieje możliwość dopasowania parametrów pracy maszyny elektrycznej do warunków obciążenia w taki sposób, by sprawność jej pracy znajdowała się możliwie blisko obszaru najwyższej sprawności. W celu weryfikacji wpływu zastosowania dodatkowego elementu w układzie napędowym na zużycie energii przeprowadzono komputerowe badania symulacyjne. W badaniach porównano dwie struktury różniące się zastosowaną przekładnią, tj. w pierwszej konfiguracji zastosowano przekładnię o stałym przełożeniu zaś w drugiej konfiguracji przekładnię pozwalającą na wybór trzech przełożeń. Uzyskane na drodze symulacji komputerowych wyniki potwierdziły pozytywny wpływ przekładni wielobiegowej na zużycie energii zarówno w miejskich jak i pozamiejskich warunkach eksploatacji, przy czym w pierwszym przypadku zmniejszeni to było znaczące. Wskazuje to wyraźnie, że w przypadku pojazdów eksploatowanych w miastach korzystne jest zastosowanie napędu elektrycznego wyposażonego w przekładnię wielobiegową.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, przekładnia wielobiegowa, zasięg jazdy, badania symulacyjne, modelowanie matematyczne

1. Wstęp

Obecnie pojazdy z napędem elektrycznym stają się coraz bardziej popularne i są alternatywą dla pojazdów z klasycznym napędem spalinowym. Z roku na rok na rynku dostępnych jest coraz więcej modeli właśnie z napędem elektrycznym. Dodatkowo można zauważyć, że nie są to modele pierwotnie wyposażone w napęd klasyczny, do których to napęd elektryczny jest tylko adaptowany, ale są to nowe konstrukcje, specjalnie projektowane wyłącznie dla zastosowania napędu elektrycznego. Większość z nich stanowią pojazdy, w których źródłem napędu jest bateria elektrochemiczna, ale można znaleźć również modele zasilane przez ogniwo paliwowe. Spośród wielu modeli, jako jedne z pierwszych należy wymienić: Mitsubishi i-MiEV [1] i Tesla Roadster [2]. Bardzo mocno zaangażowane są w rozwój rynku samochodów elektrycznych: Renault (Zoe, Twizy, Kangoo Z.E., Fluence Z.E., Kangoo Express Z.E.) [3-7], Nissan (Leaf, e-NV200) [8, 9], BMW (i3, ActiveE) [10, 11], Chevrolet (Volt, Spark EV) [12, 13]. Ale również inne wiodące firmy coraz mocniej angażują się w rozwój pojazdów elektrycznych wprowadzając w swojej ofercie modele z tego typem napędu, czyli Fiat (500E [14]), Honda (FCX, FIT [15, 16]), Mercedes-Benz (SLS AMG Coupé Electric Drive, Vito E-CELL, Klasa B Napęd elektryczny [17-19]), Ford (Transit Connect EV, Focus Electric [20, 21]), inteligentny (Smart Napęd elektryczny [22]), Toyota (iQ EV, RAV4 EV [23, 24]), Volkswagen (e-golf, e-up! [25, 26]), Citroen (Berlingo Electric, C-Zero [27, 28]).

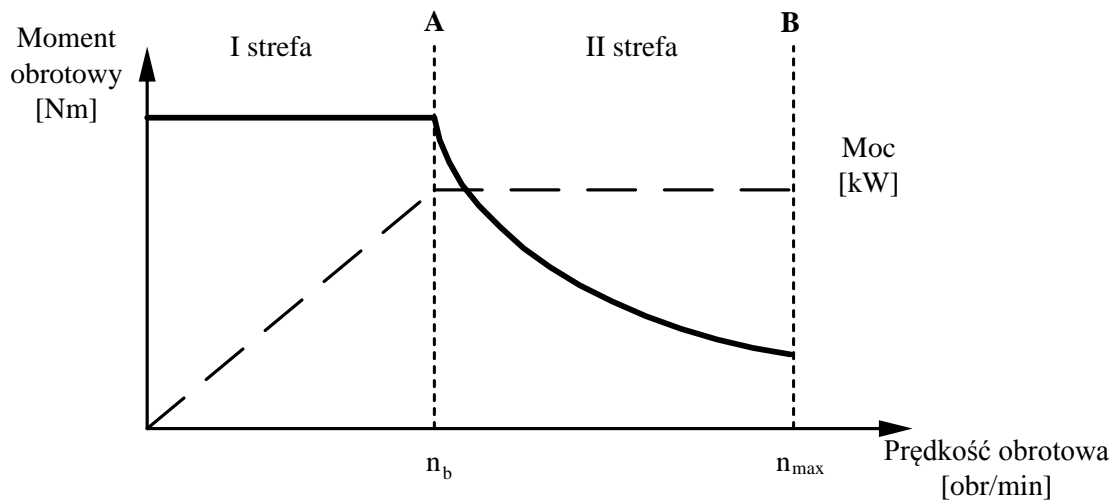
Jak widać rozwój elektrycznych środków transportu drogowego nie ogranicza się wyłącznie do małych pojazdów miejskich, które z racji warunków eksploatacji idealnie nadają się do introdukcji tego typu napędu, ale również do samochodów sportowych, limuzyn czy nawet samochodów dostawczych. Można, zatem powiedzieć, że napęd elektryczny może być zastosowany praktycznie w każdym rodzaju samochodzie, z wyłączeniem dużych samochodów ciężarowych.

Pomimo różnych typów pojazdów, jak również różnych wymagań wynikających z przeznaczenia danego typu pojazdu, struktura napędu elektrycznego jest w każdym przypadku identyczna. Energia elektryczna, konieczna do napędu pojazdu, zgromadzona jest w baterii akumulatorów elektrochemicznych, najczęściej typu Li-Ion (chyba, że mamy do czynienia z napędem z ogniwoem paliwowym jak ma to miejsce w przypadku Mercedes-Benz

Vito E-CELL [29]). Energia elektryczna przekazywana jest poprzez układ sterowania (falownik) do maszyny elektrycznej (najczęściej z magnesami trwałymi typu PMS lub BLDC), gdzie zamieniana jest na energię mechaniczną, która z kolei poprzez przekładnię mechaniczną trafia do kół napędowych. Taka konfiguracja wynika bezpośrednio z własności trakcyjnych zespołu maszyna elektryczna-układ sterowania.

2. Analiza wpływu konfiguracji napędu elektrycznego na warunki pracy maszyny elektrycznej

Na rysunku 1 przedstawiono teoretyczną charakterystykę maszyny elektrycznej sterowanej inwerterowo z wykorzystaniem metody PWM (Pulse Width Modulation).



Rys. 1. Charakterystyka maszyny elektrycznej sterowanej metodą PWM (Pulse Width Modulation)

Na przedstawionej na rysunku 1 charakterystyce maszyny elektrycznej sterowanej metodą PWM widoczne są dwie strefy. W strefie pierwszej widać wyraźnie, że wartość momentu obrotowego maszyny elektrycznej jest stała zaś moc mechaniczna rozwijana przez maszynę elektryczną rośnie liniowo wraz ze wzrostem jej prędkości obrotowej. W strefie drugiej z kolei to moc mechaniczna rozwijana przez maszynę elektryczną jest stała, zaś jej moment obrotowy maleje hiperbolicznie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, tak, aby w tym zakresie zmian prędkości obrotowej moc maszyny elektrycznej była utrzymana na stałym poziomie.

W pierwszej strefie regulacji prędkość obrotowa maszyny elektrycznej jest stosunkowo mała (od 0 do n_b). Taki stan rzeczy w przypadku napędu pojazdu odpowiada jeździe z małymi prędkościami dodatkowo charakteryzującej się częstymi przyspieszeniami i hamowaniami. Można zatem powiedzieć, że zapotrzebowanie na moment maszyny elektrycznej jest związane głównie z oporami bezwładności pojazdu, które to wymagają od maszyny elektrycznej dostarczenia stosunkowo wysokich wartości momentu obrotowego. W tym miejscu należy zaznaczyć, że moment obrotowy i moc maszyny elektrycznej dostępne są od zerowej prędkości obrotowej. W drugiej strefie regulacji (od n_b do n_{max}) ruch pojazdu staje się coraz bardziej ustabilizowany i nie ma potrzeby realizacji większych przyspieszeń. Dlatego też zapotrzebowanie na moment obrotowy maszyny elektrycznej związane jest głównie z oporami toczenia i oporami aerodynamicznymi pojazdu. Moment obrotowy maszyny elektrycznej w tym przypadku może osiągać znacznie mniejsze wartości niż dla jazdy z małymi prędkościami.

Na podstawie literatury związanej z teorią ruchu samochodów [30,31] można stwierdzić, że przedstawiona charakterystyka maszyny elektrycznej w pełni pokrywa się z charakterystyką idealnego źródła napędu (silnika), a kształt momentu obrotowego i mocy odpowiada optymalnemu polu podaży momentu obrotowego oraz optymalnemu polu podaży mocy. Można, zatem powiedzieć, że z punktu widzenia własności trakcyjnych pojazdu maszyna elektryczna sterowana metodą PWM jest idealnym źródłem momentu napędowego dla pojazdu.

Przedstawione własności maszyny elektrycznej sterowanej w odpowiedni sposób sprawiają, że struktura napędu elektrycznego może przyjąć bardzo prostą postać. Maszyna elektryczna, zasilana z baterii elektrochemicznej poprzez falownik (inwerter), połączona jest z kołami napędowymi poprzez przekładnię główną oraz jedno przełożenie pozwalające na realizację jazdy pojazdu z prędkością maksymalną.

Wartość przełożenia całkowitego dopasowującego prędkość, przy której maszyna elektryczna rozwija moc maksymalną do maksymalnej prędkości jazdy pojazdu można wyznaczyć z następującej zależności:

$$i_c = \frac{n_{ME}}{n_{kmax}} = \frac{n_{ME} r_d \pi}{30 v_{max}} \quad (1)$$

gdzie:

i_c - całkowite przełożenie mechaniczne

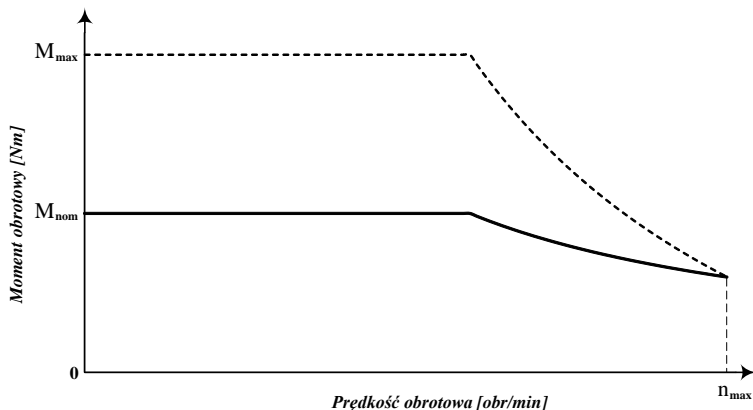
n_{ME} - prędkość maszyny elektrycznej odpowiadająca prędkości maksymalnej pojazdu,

v_{max} - prędkość maksymalna pojazdu,

r_d - promień dynamiczny koła napędowego.

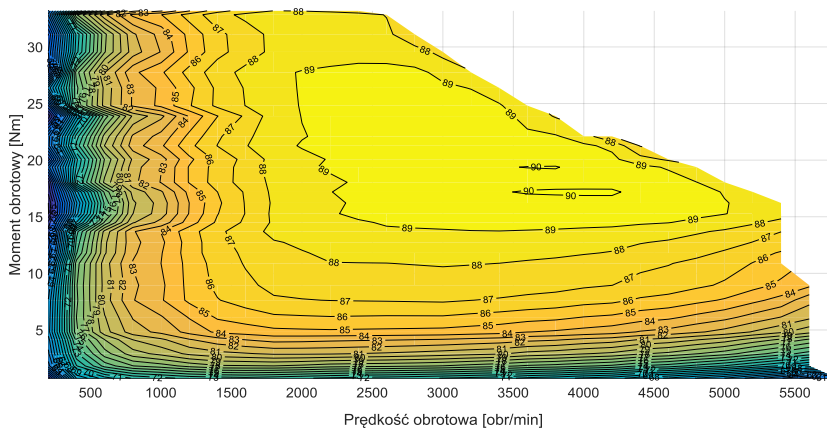
Taką strukturę, w ogólnej formie, posiadają wszystkie samochody elektryczne dostępne obecnie na rynku. Przełożenie całkowite pomiędzy maszyną elektryczną a kołami napędowymi zastosowane w układzie napędowym wymienionych wyżej samochodów waha się w zakresie od 7 do około 10.

Bardzo istotną cechą maszyn elektrycznych podnoszącą ich atrakcyjność, jako źródła napędu dla pojazdu oraz w pozytywny sposób wpływającą na ich własności trakcyjne jest zdolność do przeciążenia momentem (prądem). Dotyczy to szczególnie pierwszej strefy regulacji gdzie moment obrotowy maszyny elektrycznej przez krótki czas może być zwiększony nawet trzykrotnie w stosunku do momentu nominalnego właściwego dla ciągłej pracy maszyny elektrycznej. Z uwagi na trwałość, a przede wszystkim na warunki termiczne, w jakich pracuje maszyna elektryczna w stanie przeciążenia czas pracy maszyny elektrycznej musi być ograniczony. W drugiej strefie regulacji zdolność do przeciążenia maszyny elektrycznej maleje i w okolicach prędkości maksymalnej zanika. Na rysunku 2 przedstawiono ideę przeciążania maszyny elektrycznej na charakterystyce mechanicznej, przy zachowaniu ograniczenia na wartość prądu maksymalnego.



Rys. 2. Idea przeciążania maszyny elektrycznej

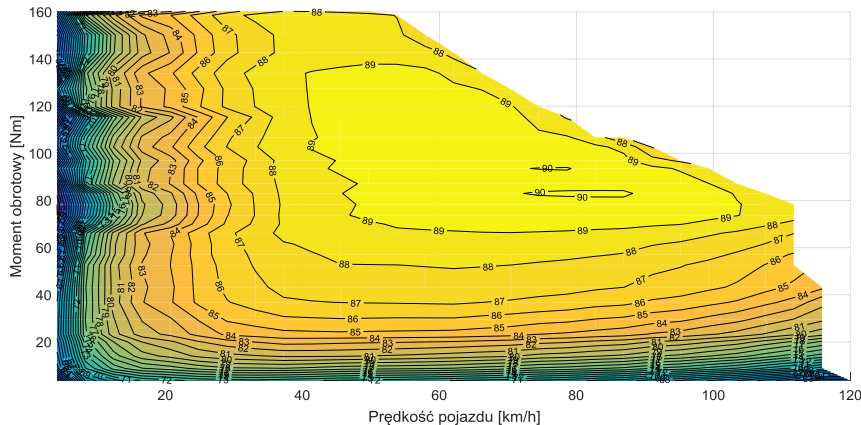
Poza bardzo dobrymi własnościami trakcyjnymi współczesne maszyny elektryczne charakteryzują się również wysoką sprawnością konwersji energii elektrycznej na energię mechaniczną oraz energii mechanicznej na energię elektryczną. Właśnie dzięki pracy maszyn elektrycznych w trybie prądnicowym możliwe staje się odzyskiwanie energii kinetycznej pojazdu w czasie hamowania rekuperacyjnego. Bardzo dobrym przykładem może być maszyna synchroniczna, która, ze względu na wysoką sprawność pracy, jest szczególnie predysponowana do zastosowania w napędzie elektrycznym pojazdów. W pewnych zakresach prędkości obrotowych i momentów obrotowych charakteryzuje się ona bardzo wysoką sprawnością przekraczającą 85%, uwzględniając sprawność układu sterowania. Jednakże istnieją również zakresy prędkości obrotowych i momentów obrotowych, dla których sprawność jest znacznie niższa. Jak już wspomniano w pojeździe elektrycznym energia z baterii elektrochemicznych zamieniana jest na energię mechaniczną przez maszynę trakcyjną (i odwrotnie w przypadku hamowania rekuperacyjnego) przy udziale układu sterowania. Łatwo zatem wysnuć wniosek, że zużycie energii elektrycznej z baterii elektrochemicznych będzie silnie zależało właśnie od warunków pracy maszyny trakcyjnej. Na rysunku 3 przedstawiono przykładową charakterystykę rozkładu sprawności maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi sterowanej metodą PWM w zależności od jej momentu i prędkości obrotowej.



Rys. 3. Przykładowa mapa sprawności maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi (PMSM)

Widać wyraźnie, że biorąc pod uwagę sprawność pracy maszyny elektrycznej zakres momentu obciążenia powinien mieścić się pomiędzy 50% a 100% nominalnego momentu maszyny, przy czym najkorzystniejszy obszar sprawności znajduje się w okolicach 75% momentu nominalnego. Należy również zauważyć, że wysoka sprawność jest osiągnięta raczej dla wyższych prędkości obrotowych przekraczających 50% prędkości maksymalnej. Przy czym obszar najwyższej sprawności zlokalizowany jest w okolicach 65% wspomnianej prędkości maksymalnej. Należy się zatem spodziewać, że z punktu widzenia sprawności zamiany energii elektrycznej na energię mechaniczną korzystniej jest pracować, przy tej samej mocy, z większą prędkością niż z większym momentem.

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę sprawności maszyny elektrycznej odniesioną do prędkości jazdy pojazdu z napędem elektrycznym, dla którego wartość przełożenia całkowitego dobrana została tak, aby pojazd mógł rozwijać maksymalną prędkość jazdy w okolicach 120 km/h.

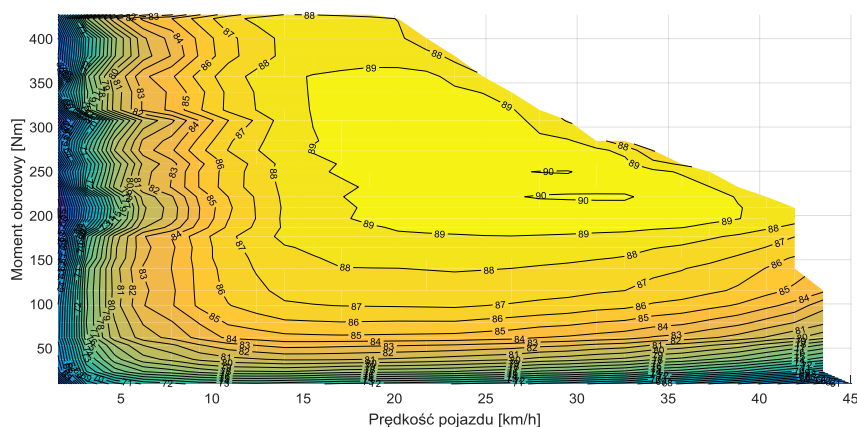


Rys. 4. Mapa sprawności maszyny elektrycznej odniesiona do prędkości jazdy pojazdu przy zastosowaniu jednego, stałego przełożenia

Widać zatem, że w przypadku struktury napędu elektrycznego ze stałym przełożeniem wynikającym z zapewnienia jazdy z założoną maksymalną prędkością jazdy obszar akceptowalnej sprawności znajduje się powyżej 50 km/h, zaś najwyższą sprawność można osiągnąć poruszając się z prędkością w okolicach 85 km/h. Jeżeli weźmiemy pod uwagę miejskie warunki eksploatacji, które charakteryzują się stosunkowo niską prędkością jazdy i częstymi przyspieszeniami to stwierdzimy, że wymuszają one pracę maszyny trakcyjnej w zakresie niskich wartości prędkości obrotowej i wysokich wartości momentu obrotowego. Obszar ten w porównaniu do najlepszej sprawności wykazuje mniejszą sprawność o około 5%.

Na uwagę zasługuje również wartość rozwijanego momentu obrotowego, który w przypadku przyspieszeń, jak również przypadków zwiększonego oporu ruchu pojazdu elektrycznego, może być niewystarczający do ich spełnienia. Jak wcześniej wspomniano maszyny elektryczne charakteryzują się czasową zdolnością przeciążania prądem, a więc również momentem. Czas pracy maszyny elektrycznej w takim przypadku zależy od wielokrotności przeciążenia w odniesieniu do momentu nominalnego. Oczywiście jest, że im większy prąd przeciążenia, tym możliwy do zrealizowania czas pracy maszyny elektrycznej krótszy. Pociąga to za sobą konieczność dodatkowego uważnego śledzenia stanów pracy maszyny elektrycznej tak, aby nie dopuścić do zbyt długiej pracy w stanie przeciążenia, które może doprowadzić do jej uszkodzenia. Chcąc, zatem uniknąć takiej sytuacji, w napędzie elektrycznym ze stałym przełożeniem, należy przewymiarować zastosowaną maszynę elektryczną, tak, aby pracowała krótkotrwale z niewielkim przeciążeniem i to w wyłącznie w ekstremalnych warunkach obciążeniowych. Nie bez znaczenia w przypadku napędu elektrycznego, z uwagi na wykorzystanie energii elektrycznej zgromadzonej w baterii elektrochemicznej, jest sprawność pracy maszyny w stanie przeciążenia. Należy się spodziewać, że będzie ona niższa niż w obszarze określonym krzywą momentu nominalnego. W stanie pracy maszyny przy dwukrotnym przeciążeniu sprawność może się zmniejszyć o 5% do 8% [32], co jest głównie związane ze wzrostem strat w układzie elektrycznym maszyny elektrycznej oraz inwertera. Biorąc pod uwagę fakt niskich zakresów sprawności dla obszaru pracy maszyny trakcyjnej właściwego dla miejskich warunków eksploatacji, sprawność pracy maszyny elektrycznej w odniesieniu do jej najlepszego obszaru zmniejszy się aż o 10%, co niewątpliwie wpłynie na zwiększenie zużycia energii elektrycznej z baterii akumulatorów elektrochemicznych.

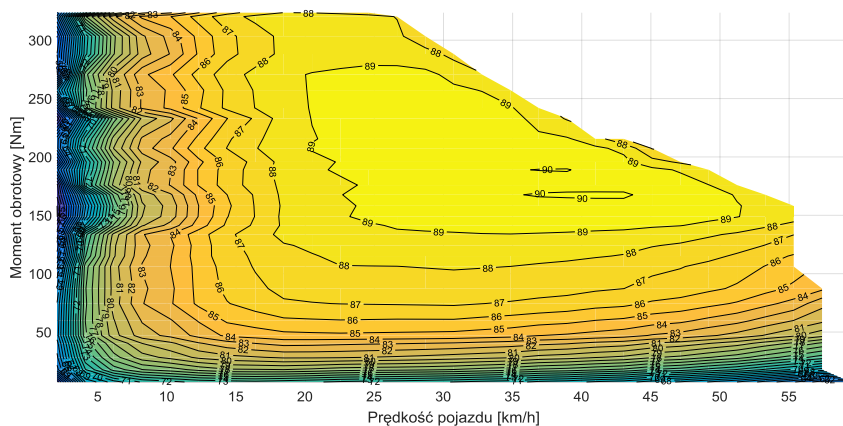
Podniesienie sprawności pracy maszyny trakcyjnej wymaga „przesunięcia” jej punktów pracy w kierunku obszaru o największej sprawności również dla niższych prędkości jazdy. Dopasowanie charakterystyki maszyny trakcyjnej do wymaganej maksymalnej prędkości jazdy pojazdu elektrycznego stało się możliwe poprzez dobór przełożenia mechanicznego. W podobny sposób, z tym, że przy innej wartości przełożenia całkowitego, można dopasować charakterystykę maszyny elektrycznej dla zakresu prędkości jazdy właściwych dla miejskich warunków eksploatacji. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę maszyny elektrycznej odniesioną do zakresu prędkości ograniczonego prędkością 50 km/h.



Rys. 5. Mapa sprawności maszyny elektrycznej odniesiona do prędkości jazdy pojazdu przy zastosowaniu stałego przełożenia ograniczającego prędkość maksymalną do ok. 50 km/h.

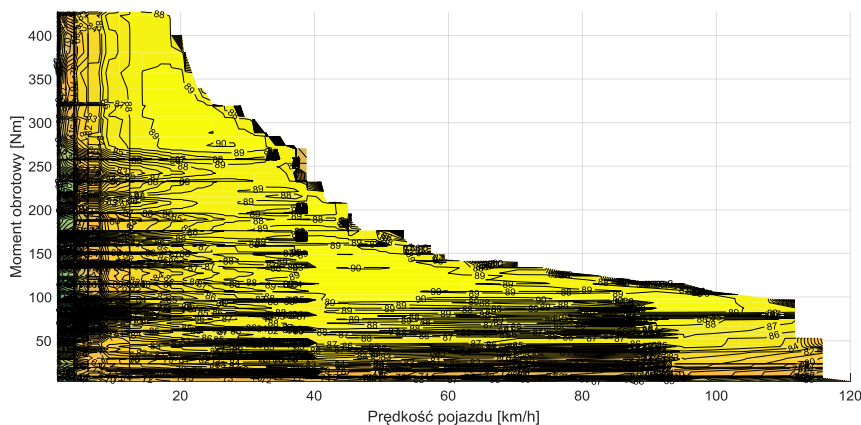
Z przedstawionej na rysunku 5 mapy sprawności widać wyraźnie, że w odniesieniu do mapy przedstawionej na rysunku 4, obszar najwyższych sprawności pracy maszyny elektrycznej dostępny jest już od prędkości 15 km/h. Dodatkowo układ napędowy dysponuje bardzo wysokim momentem obrotowym przy jednoczesnym braku konieczności przeciążania prądowego maszyny elektrycznej oraz jej układu sterowania. Należy zauważyć również, że dla tak określonych parametrów układu napędowego maszyna elektryczna pracuje w obszarze bardzo wysokiej sprawności.

Jeżeli dobierzemy kolejne przełożenie w celu dostosowania obszaru najwyższej sprawności do zakresu prędkości pojazdu pomiędzy 40 km/h i 60 km/h, to możemy powiedzieć, że praktycznie cały zakres prędkości od 15 km/h aż do 100 km/h zawiera obszar pracy maszyny elektrycznej charakteryzujący się bardzo wysoką sprawnością jej pracy. Przykładową charakterystykę sprawności maszyny elektrycznej dla takiego przełożenia odniesionej do prędkości jazdy pojazdu elektrycznego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Mapa sprawności maszyny elektrycznej odniesiona do prędkości jazdy pojazdu przy zastosowaniu przełożenia pozwalającego na pracę maszyny elektrycznej z wysoką sprawnością w zakresie prędkości od 40 km/h do 60 km/h

Z przeprowadzonych analiz wynika, że wystarczające jest zastosowanie, w przedstawionym przykładzie, trzech przełożeń mechanicznych, aby zapewnić w bardzo szerokim zakresie prędkości jazdy pojazdu elektrycznego wysoką sprawność pracy maszyny elektrycznej. Dodatkowym atutem takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania wysokich wartości momentu obrotowego na wyjściu układu napędowego bez konieczności znacznego przeciążania maszyny elektrycznej. W takim wypadku wykorzystanie tej własności maszyny elektrycznej sterowanej metodą PWM może być ograniczone jedynie do przypadków charakteryzujących się wysokim zapotrzebowaniem na moment napędowy szczególnie przy niskiej prędkości np. pokonywanie wzniesień. Zestawiając ze sobą charakterystyki przedstawione na rysunkach 5, 6 oraz 4 tj. dla przełożenia pozwalającego na realizację jazdy pojazdu elektrycznego z maksymalną prędkością, otrzymamy charakterystykę momentu maksymalnego możliwego do osiągnięcia przy pomocy maszyny elektrycznej (której charakterystykę przedstawiono na rysunku 3) przedstawioną na rysunku 7.



Rys. 7. Mapa sprawności maszyny elektrycznej odniesiona do prędkości jazdy pojazdu przy zastosowaniu trzech przełożeń.

Wartości i liczba przełożeń mechanicznych będą zależały od parametrów pojazdu, warunków eksploatacji czy parametrów zastosowanej maszyny elektrycznej i muszą być analizowane i dobierane indywidualnie dla danego przypadku.

Jeżeli dla uproszczenia sprowadzimy maszynę elektryczną z magnesami trwałymi do równoważnej maszyny prądu stałego to moc elektryczną pobieraną z akumulatorów elektrochemicznych w stanie ustalonym można wyrazić następująco:

$$\begin{aligned} (U_b I_b) \eta_{CU} &= U_s I_s = c \phi \omega I_s + R I_s^2 \quad \text{- praca silnikowa} \\ U_b I_b &= (U_s I_s) \eta_{CU} = c \phi \omega I_s - R I_s^2 \quad \text{- praca prądnicowa} \end{aligned} \quad (2)$$

Moment elektromagnetyczny maszyny elektrycznej opisany jest następująco:

i jednocześnie moment obrotowy na wyjściu maszyny elektrycznej jest związany następującą zależnością:

$$M_e = M_m + M_{strm} \quad (3)$$

Jeśli założymy, że moment strat mechanicznych wynosi

$$M_{strm} = c_1 + c_2 \omega^2 \quad (4)$$

to moc baterii w zależności od trybu pracy napędu można ostatecznie wyrazić jako:

$$(U_b I_b) \eta_{CU} = U_s I_s = M_m \omega + c_1 \omega + c_2 \omega^3 + R I_s^2 \quad (5)$$

$$U_b I_b = (U_s I_s) \eta_{CU} = M_m \omega - c_1 \omega - c_2 \omega^3 - R I_s^2 \quad (6)$$

gdzie:

U_b, I_b - napięcie i prąd baterii elektrochemicznej;

U_s, I_s - napięcie i prąd silnika;

η_{CU} - sprawność układu sterowania;

Stąd moce obciążające baterię w czasie przyspieszania i jazdy ustalonej oraz w czasie hamowania można wyrazić w następującej ogólnej postaci:

$$N_{b_p} = \frac{N_m}{\eta_m \eta_{RI} \eta_{CU}} \quad (7)$$

$$N_{b_h} = N_m \eta_m \eta_{RI} \eta_{CU} \quad (8)$$

uwzględniając: sprawność mechaniczną układu napędowego, straty w miedzi w uzwojeniach maszyny elektrycznej oraz sprawność układu sterowania pracą maszyny elektrycznej.

Jeżeli przedstawione równania wyrażające moce dla trybów silnikowego i generatorowego maszyny elektrycznej w napędzie elektrycznym bez przekładni, zastosujemy dla przypadku z wielostopniową przekładnią to przy zachowaniu identycznych warunków prędkościowo - momentowych na wyjściu z układu napędowego otrzymamy, co następuje:

$$N_{b_p}^i = \frac{N_m^i}{\eta_i \eta_m^i \eta_{RI}^i \eta_{CU}^i} \quad (9)$$

$$N_{b_h}^i = N_m^i \eta_i \eta_m^i \eta_{RI}^i \eta_{CU}^i \quad (10)$$

uwzględniając dodatkowo sprawność mechaniczną przełożenia dodatkowego.

Przyjmując jednakowe prędkościowo-momentowe warunki na wyjściu układu napędowego, dla obu konfiguracji napędu elektrycznego otrzymamy w każdej chwili równość:

$$N_m = N_m^i \quad (11)$$

Ponieważ, przyjmujemy jednakowe warunki obciążenia układów napędowych to możemy tę zależność zastosować również w odniesieniu do energii mechanicznej na wyjściu układu napędowego, tj.

$$E_m = E_m^i$$

Zatem, aby zastosowanie dodatkowej przekładni wielobiegowej było uzasadnione musi zaistnieć

przypadek $E_{b_p} > E_{b_p}^i$ oraz $E_{b_h} < E_{b_h}^i$, czyli że energia wydatkowana w cyklu z baterii elektrochemicznej dla układu napędowego z dodatkową wielobiegową przekładnią musi być mniejsza niż dla układu bez takiej przekładni. W przypadku zaś energii zgromadzonej w baterii

elektrochemicznej w wyniku procesu hamowania rekuperacyjnego to energia w przypadku zastosowania przekładni dodatkowej musi być większa niż w przypadku jej braku w napędzie elektrycznym.

Będzie to miało miejsce, gdy:

$$\frac{1}{\eta_m \eta_{RI}^2 \eta_{CU}} > \frac{1}{\eta_i \eta_m^i \eta_{RI}^i \eta_{CU}^i} \quad \text{oraz} \quad \eta_m \eta_{RI}^2 \eta_{CU} < \eta_i \eta_m^i \eta_{RI}^i \eta_{CU}^i \quad (12)$$

Wynika stąd, że sprawność zastosowanej przekładni wielobiegowej w odniesieniu do napędu elektrycznego bez takiej przekładni przy jednakowych warunkach obciążeniowych na kołach napędowych powinna zawierać się w przedziale:

$$\frac{\eta_m \eta_{RI}^2 \eta_{CU}}{\eta_m^i \eta_{RI}^i \eta_{CU}^i} < \eta_i < 1 \quad (13)$$

Spełnienie tego kryterium gwarantuje osiągnięcie mniejszego zużycia energii elektrycznej z baterii elektrochemicznej a przez to zwiększenie zasięgu jazdy pojazdu z napędem elektrycznym, w którym zastosowano dodatkową, wielobiegową przekładnię mechaniczną.

3. Symulacyjne badania porównawcze

Przeprowadzony tok rozumowania daje podstawę sądzić, że zastosowanie w napędzie elektrycznym większej liczby przełożeń, która może być wybierana w zależności od warunków eksploatacyjnych pojazdu przyniesie korzyści w postaci zmniejszenia zużycia energii elektrycznej z baterii akumulatorów elektrochemicznych.

W celu sprawdzenia prawdziwości tego stwierdzenia najkorzystniej jest przeprowadzić badania symulacyjne dla różnych konfiguracji napędu elektrycznego, które pozwolą na porównanie parametrów pracy wybranych elementów układu napędowego, szczególnie zaś zużycia energii baterii. Aby zachować poziom odniesienia dla późniejszego porównania we wszystkich konfiguracjach przyjęto jednakowy cykl obciążeń napędu reprezentowany przez wybrany statystyczny cykl jazdy oraz jednakowe parametry pojazdu i układu napędowego w tym zespole maszyna elektryczna - bateria akumulatorów elektrochemicznych.

Ponieważ celem badań jest określenie jedynie parametrów jakościowych, a nie ilościowych dla analizowanych przypadków, w celu usprawnienia procesu obliczeniowego, wybrano najprostsze, ale jednocześnie wystarczająco dokładne modele matematyczne komponentów napędu. W badaniach wykorzystano dane czterobiegowej skrzyni przekładniowej z samochodu klasy Fiat Seicento, gdyż wydaje się, że właśnie taki typ pojazdu ma największe szanse znaleźć w krótkim czasie zastosowanie, jako środek transportu w aglomeracjach miejskich.

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem danych zamieszczonych w tabeli 1.

Tabela 1. Dane wykorzystane do badań symulacyjnych

Dane pojazdu	
Masa pojazdu [kg] (bez baterii)	950
Współczynnik oporów toczenia f_t [-]	0.01
Współczynnik oporów aerodynamicznych c_x [-]	0.45
Pole powierzchni czołowej A [m ²]	1.52
Promień dynamiczny koła r_d [m]	0.297
Przełożenie przekładni głównej i_g [-]	3,96
Przełożenia przekładni mechanicznej	
I	3.8
II	2.25

III	1.55
IV	1.1
Maszyna elektryczna PM	
Napięcie DC [V]	144
Moc ciągła [kW]	25
Maksymalna prędkość obrotowa [obr/min]	5500
Maksymalny moment [Nm]	115
Bateria akumulatorów elektrochemicznych	
Napięcie [V]	144
Pojemność nominalna [Ah]	105

Pojazd wraz z układem napędowym został zamodelowany z wykorzystaniem środowiska Matlab Simulink®. Do wyznaczenia modelu obliczeniowego wykorzystano modele matematyczne poszczególnych komponentów napędu elektrycznego.

Opory ruchu pojazdu

Siłę oporów ruchu można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$F = F_t + F_w + F_p + F_b \quad (14)$$

gdzie:

F - siła oporów ruchu;

F_t - siła oporów toczenia;

F_w - siła oporów wzniesienia;

F_p - siła oporów powietrza;

F_b - siła oporów bezwładności.

Ograniczając się do ruchu po drodze płaskiej można pominąć opory wzniesienia. Stąd opory ruchu pojazdu można wyrazić przez sumę oporów toczenia, powietrza i bezwładności

Siła oporów toczenia zależy od warunków, jakie panują na styku opony i drogi. Siłę tę wyznacza się na podstawie następującej zależności.

$$F_t = mgf \quad (15)$$

gdzie:

m - masa pojazdu;

f - współczynnik oporów toczenia.

Siłę oporów powietrza można wyznaczyć na podstawie następującej zależności:

$$F_p = 0,047c_xAv^2 \quad (16)$$

gdzie:

c_x - współczynnik oporów aerodynamicznych;

A - pole powierzchni czołowej pojazdu;

v - prędkość pojazdu wyrażona w km/h.

Siła oporów bezwładności związana jest z wpływem masy pojazdu w czasie przyspieszania i hamowania. Wartość jej można wyznaczyć za pomocą następującej zależności:

$$F_b = m\delta \frac{dv}{dt} \quad (17)$$

$$\delta = 1 + \frac{I_{me} i_0^2 \eta_T + \sum I_k}{mr_d^2} \quad (18)$$

gdzie:

δ – zastępczy współczynnik mas wirujących;

i_0 – całkowite przełożenie mechaniczne w układzie napędowym;

I_{me} – moment bezwładności maszyny elektrycznej;

I_k – moment bezwładności kół pojazdu;

η_T - sprawność układu transmisji momentu;

r_d - promień dynamiczny koła napędowego.

W przypadku ruchu pojazdu po płaskiej drodze wyrażenie na siłę oporów przyjmie postać:

$$\begin{cases} M_{ME} i_0 \eta_T \frac{1}{r_d} = mgf + 0,047c_x A v^2 + m\delta \frac{dv}{dt} & \text{dla napędzania} \\ M_{ME} i_0 \frac{1}{\eta_T} \frac{1}{r_d} = mgf + 0,047c_x A v^2 - m\delta \frac{dv}{dt} & \text{dla hamowania} \end{cases} \quad (19)$$

Model silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Synchroniczna maszyna z magnesami trwałymi może być opisana poprzez następujący zestaw równań związanych z wirującym z prędkością synchroniczną wirnikiem, na którym umieszczone są magnesy trwałe:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + Ri_d = u_d \\ \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + Ri_q = u_q \end{cases} \quad (20)$$

gdzie: $\psi_d = L_d i_d + \psi_{fd}$; $\psi_q = L_q i_q$; $\psi_{fd} = M_{df} \Theta_f$ - stały strumień magnesów trwałych związany z osią d; M_{df} - odpowiednie indukcyjności wzajemne; Θ_f - potencjał magnetyczny magnesu trwałego; L_d, L_q - indukcyjności osi d oraz q; i_d, i_q - prądy osi d i q; R - rezystancja stojana, ω - prędkość kątowa wirnika.

Moment elektromagnetyczny wyrażony jest następującą zależnością:

$$M_e = \frac{3}{2} p \left((L_d i_d + M_{df} \Theta_f) i_q - L_q i_d i_q \right) \quad (21)$$

gdzie:

p - liczba par biegunów,

$$P = \frac{3}{2} (u_q i_d + u_d i_q) \quad (22)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_l \quad (23)$$

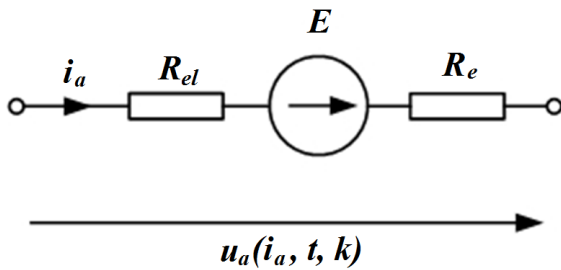
M_e - moment elektromagnetyczny silnika,

M_l - zewnętrzny moment obciążenia.

Przedstawiony model matematyczny maszyny synchronicznej pozwala na wyznaczenie parametrów pracy maszyny elektrycznej w odniesieniu do jej parametrów elektrycznych oraz zastosowanej metody sterowania. Dlatego też może być wykorzystywany zarówno do analiz napędu mających na celu ocenę ilościową oraz jakościową warunków i parametrów pracy maszyny elektrycznej w analizowanym napędzie. W przypadku oceny napędu pod względem jakościowym, w tym szczególnie, kiedy już zdefiniowano konkretną maszynę elektryczną, dopuszczalne jest, z uwagi na uproszczenie modelu obliczeniowego układu napędowego, a tym samym również całego procesu obliczania parametrów napędu, wykorzystanie map sprawności maszyny elektrycznej takiej jak np. przedstawiona na rysunku 3. Ponieważ mapy te zostały wyznaczone doświadczalnie, poprzez pomiary laboratoryjne, dlatego w bardzo dobry sposób opisują przemiany energetyczne dla danej maszyny. Mogą one z powodzeniem być wykorzystane do wyznaczenia mocy elektrycznej wymaganej od baterii elektrochemicznej, szczególnie, kiedy zdeterminowane są warunki obciążenia układu napędowego. Taki stan ma miejsce, kiedy posługujemy się porównawczymi cyklami jazdy.

Model baterii elektrochemicznej

Schemat zastępczego obwodu elektrycznego baterii elektrochemicznej przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat zastępczy baterii elektrochemicznej wyrażony poprzez siłę elektromotoryczną E oraz nieliniowe rezystancje elektrod R_e i elektrolitu R_{el} zależne od pojemności dyspozycyjnej baterii (reprezentowanej przez stopień naładowania k); $u(i_a, t, k)$ - napięcie na zaciskach baterii; t - czas; k - współczynnik stanu naładowania baterii; i_a - prąd chwilowy baterii (znak + dla wyładowania; - dla ładowania) [33,34]

Zgodnie ze schematem zastępczym baterii elektrochemicznej przedstawionym na rysunku 8 napięcie na zaciskach baterii może być wyrażone następującą zależnością:

$$u(i_a, t, k) = E(i_a, \tau, k) - i_a(t)R_w(i_a, t, \tau, k) \quad (24)$$

gdzie:

$E(i_a, \tau, k)$ - chwilowa wartość siły elektromotorycznej;

$R_w(i_a, t, \tau, k)$ - chwilowa wartość nieliniowej rezystancji wewnętrznej;

$i_a(t)$ - wartość chwilowa prądu baterii (znak + dla wyładowania; - dla ładowania).

Zmianę stopnia naładowania baterii elektrochemicznej reprezentowaną przez współczynnik k można opisać następującą zależnością:

$$k' = k - Q_{tn}^{-1} \int_{t_i}^{t_i+m} \eta_A(i_a, \tau) i_a(t) dt \quad (25)$$

gdzie:

k - początkowy stopień naładowania

Q_{tn} - pojemność w pełni naładowanej baterii elektrochemicznej w warunkach nominalnych;

$\eta_A(i_a, \tau)$ - współczynnik użyteczności energii zmagazynowanej w baterii elektrochemicznej

związany z występowaniem zjawiska Peukert'a i wyrażony następującą zależnością:

$$\eta_A(i_a, \tau) = \left(\frac{i_a(t)}{I_n} \right)^{-\beta(\tau)} \quad (26)$$

Kiedy chwilowa wartość prądu jest mniejsza od wartości nominalnej współczynnik przyjmuje wartości większe od 1. Wykładnik β zależny jest od typu baterii elektrochemicznej.

Aby tak przedstawiony model matematyczny baterii elektrochemicznej był funkcjonalny konieczna jest znajomość charakterystyk siły elektromotorycznej oraz nieliniowej rezystancji wewnętrznej danej baterii. Charakterystyki te można wyznaczyć na podstawie charakterystyk czasowych napięcia na zaciskach baterii przy wyładowaniu i ładowaniu różnymi wartościami prądów, otrzymanych w wyniku prowadzenia pomiarów laboratoryjnych [33, 34].

Model mechanicznej, wielobiegowej skrzyni przekładniowej

W przypadku przekładni mechanicznej modelowaniu poddano jedynie parametry energetyczne takiej przekładni polegające na uzależnieniu sprawności, z jaką przekładnia pracuje, od wartości przełożenia.

W przypadku mechanicznych przekładni zębatych sprawność, z jaką następuje transmisja momentu napędowego można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$\eta_i = 1 - k\mu \frac{1}{z_1} (1 - i); \quad (27)$$

$$\text{gdzie } k = \frac{8}{\pi \sin^2 2\alpha}$$

oraz

μ – współczynnik tarcia międzyzębnego;

α – kąt przyporu

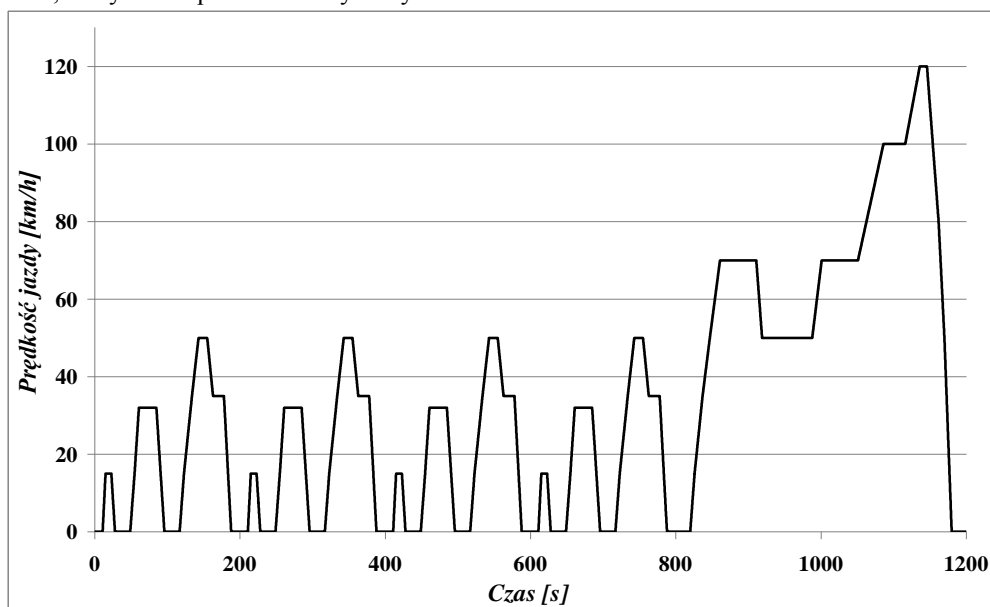
z_1 – liczba zębów zębnika

i – przełożenie kinematyczne przekładni

4. Badanie wpływu struktury napędu elektrycznego na zużycie energii elektrycznej

Wykorzystując przedstawione modele matematyczne komponentów napędu elektrycznego przeprowadzono porównawcze badania symulacyjne dla napędu wyposażonego w przekładnię stałą oraz przekładnię wielobiegową. Ponieważ badania symulacyjne miały na celu wyznaczenie głównie parametrów energetycznych, dlatego na tym etapie pominięto proces synchronizacji w czasie zmiany przełożenia przekładni wielobiegowej, przyjmując w uproszczeniu, że zmiana przełożenia następuje w sposób automatyczny, pod obciążeniem bez wpływu na warunki prędkościowo – momentowe na kołach napędowych. Takie podejście wymusza przyjęty cykl jazdy, w którym nie wyszczególniono fazy zmiany przełożenia, a która to w istotny sposób wpływa na warunki prędkościowo-momentowe układu napędowego pojazdu.

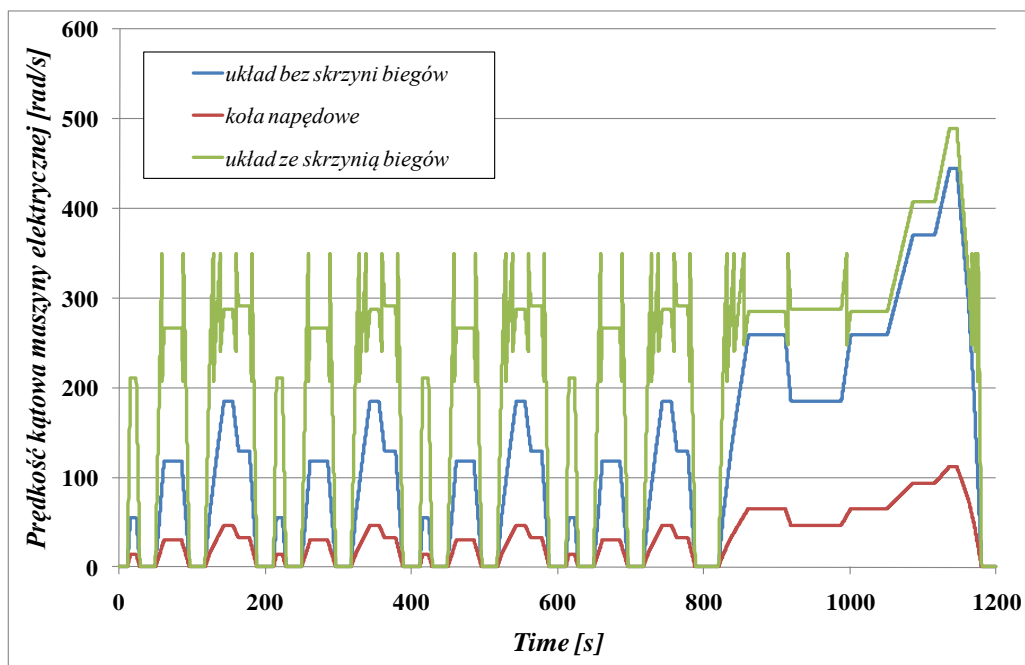
Badania porównawcze zostały przeprowadzone dla statycznego, rozszerzonego cyklu jazdy ECE, który został przedstawiony na rysunku 9.



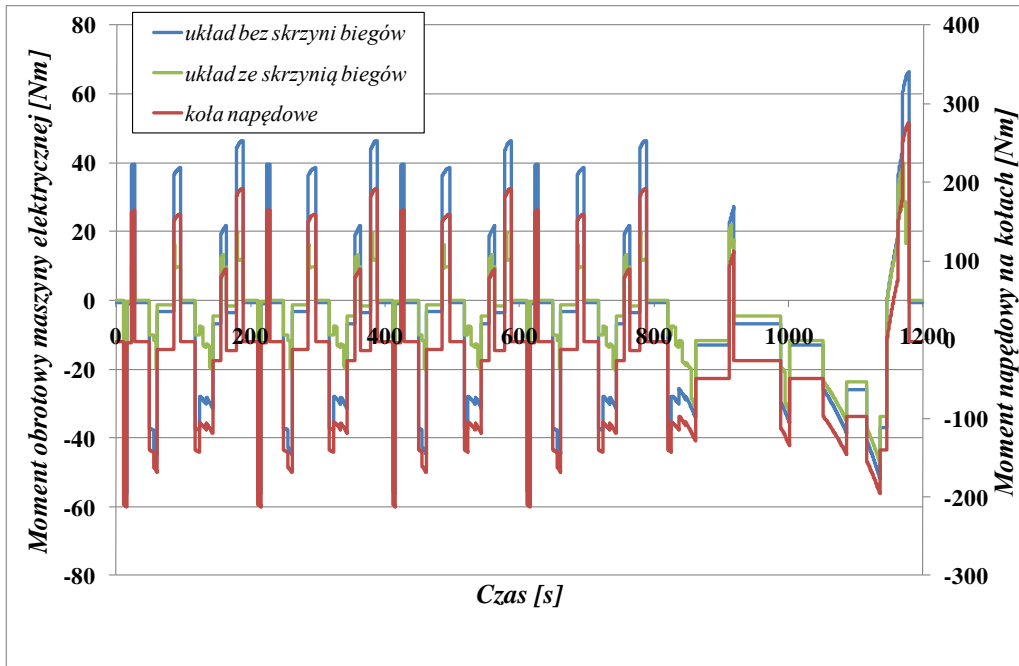
Rys. 9 Statystyczny, rozszerzony cykl jazdy ECE

O wyborze cyklu jazdy zdecydował fakt, że odwzorowuje on zarówno jazdę w warunkach miejskich odpowiednią dla poruszania się w aglomeracjach miejskich oraz w warunkach pozamiejskich, tj. w czasie jazdy po autostradach i obwodnicach miejskich z większymi prędkościami.

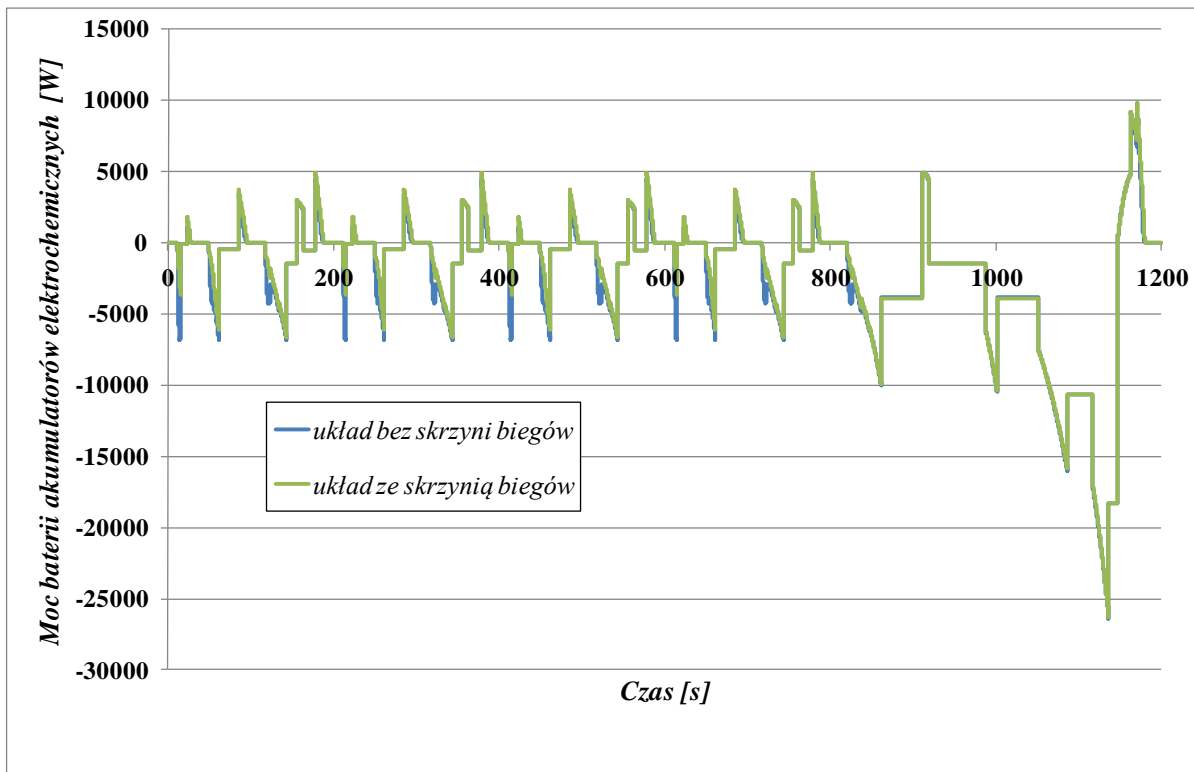
Na rysunkach od 10 do 19 przedstawiono uzyskane wyniki symulacji komputerowych dla poszczególnych komponentów napędu elektrycznego, w którym zastosowano wielostopniową przekładnię mechaniczną oraz dla równoczesnego porównania elektrycznego układu napędowego z maszyną elektryczną przyłączoną bezpośrednio do kół napędowych za pośrednictwem reduktora o stałym przełożeniu. Założono prędkościowe kryterium dla zmiany przełożenia, które zostało określone w ten sposób, by maszyna elektryczna pracowała w zakresie prędkości obrotowych, dla których występuje obszar największej sprawności.



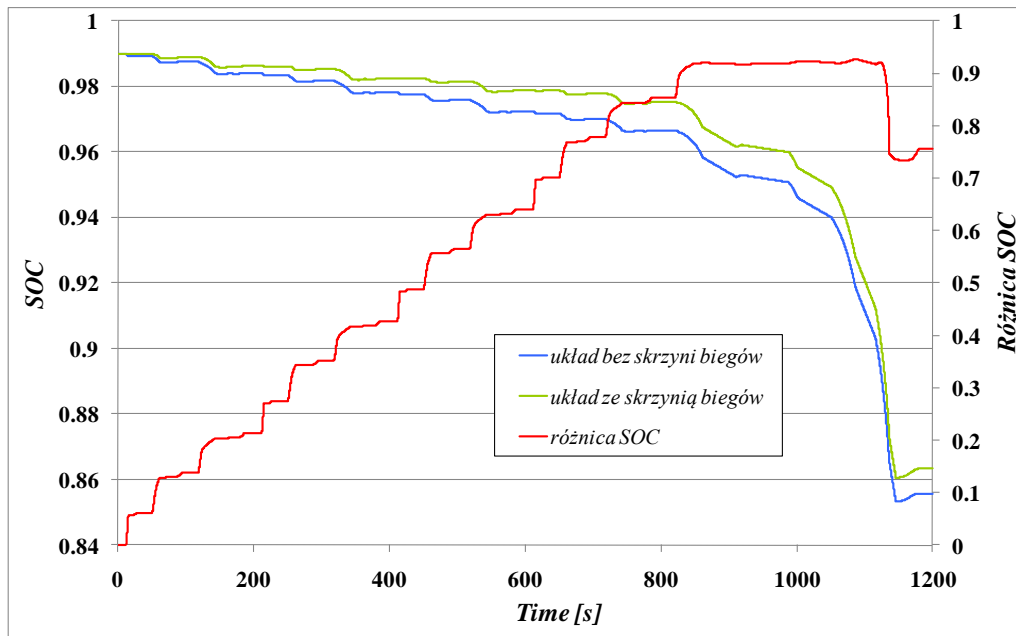
Rys. 10. Przebieg prędkości kół napędowych oraz maszyny elektrycznej w elektrycznym układzie napędowym z przekładnią wielostopniową oraz bez dodatkowej przekładni



Rys. 11. Przebieg momentów na kołach napędowych oraz maszyny elektrycznej w elektrycznym układzie napędowym z przekładnią wielostopniową oraz bez dodatkowej przekładni

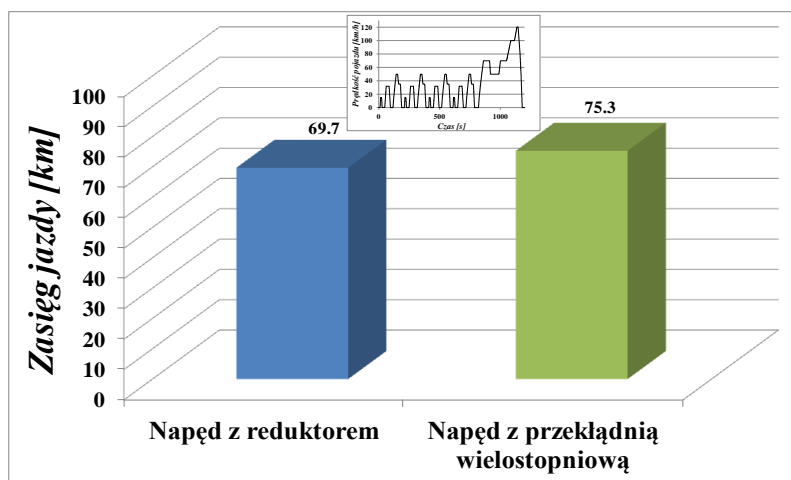


Rys. 12. Przebieg mocy baterii elektrochemicznej w elektrycznym układzie napędowym z przekładnią wielostopniową oraz bez dodatkowej przekładni



Rys. 13. Przebieg zmian stopnia naładowania (SOC) baterii elektrochemicznej w elektrycznym układzie napędowym z przekładnią wielostopniową oraz bez dodatkowej przekładni

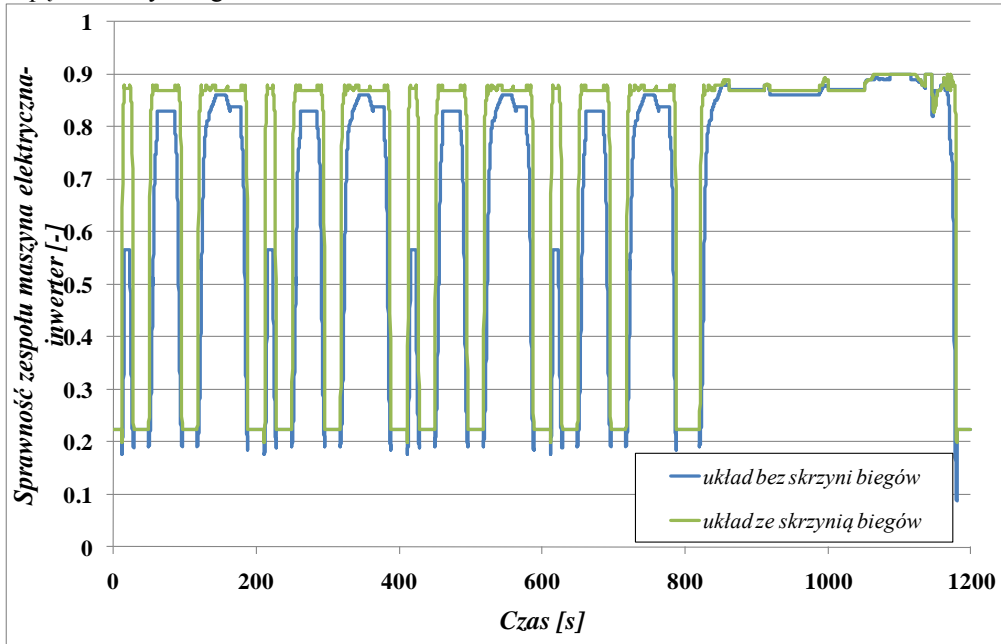
Jak widać z przeprowadzonych badań symulacyjnych zastosowanie dodatkowej wielostopniowej przekładni mechanicznej pomiędzy silnikiem elektrycznym a kołami napędowymi powoduje mniejsze wyladowanie baterii elektrochemicznej. Taki stan rzeczy w istotny sposób będzie przekładać się na zasięg jazdy pojazdu. Na rysunku 14 przedstawiono porównanie zasięgu jazdy analizowanych konfiguracji napędu elektrycznego pojazdu poruszającego się zgodnie z cyklem jazdy przedstawionym na rysunku 9. Jak widać zastosowanie dodatkowej przekładni wielobiegowej zwiększa zasięg jazdy.



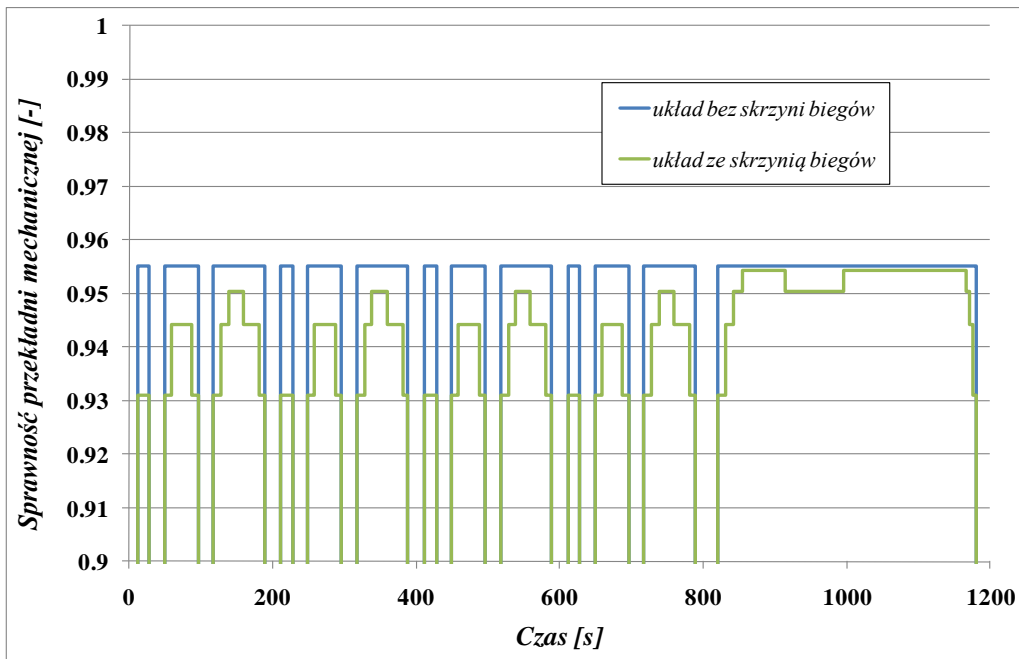
Rys. 14. Porównanie zasięgu jazdy pojazdu z napędem elektrycznym z przekładnią wielostopniową oraz bez dodatkowej przekładni

Zwiększenie zasięgu jazdy, pomimo zastosowania w układzie napędowym dodatkowego elementu w postaci wielostopniowej skrzyni przekładniowej, jest, zatem wynikiem

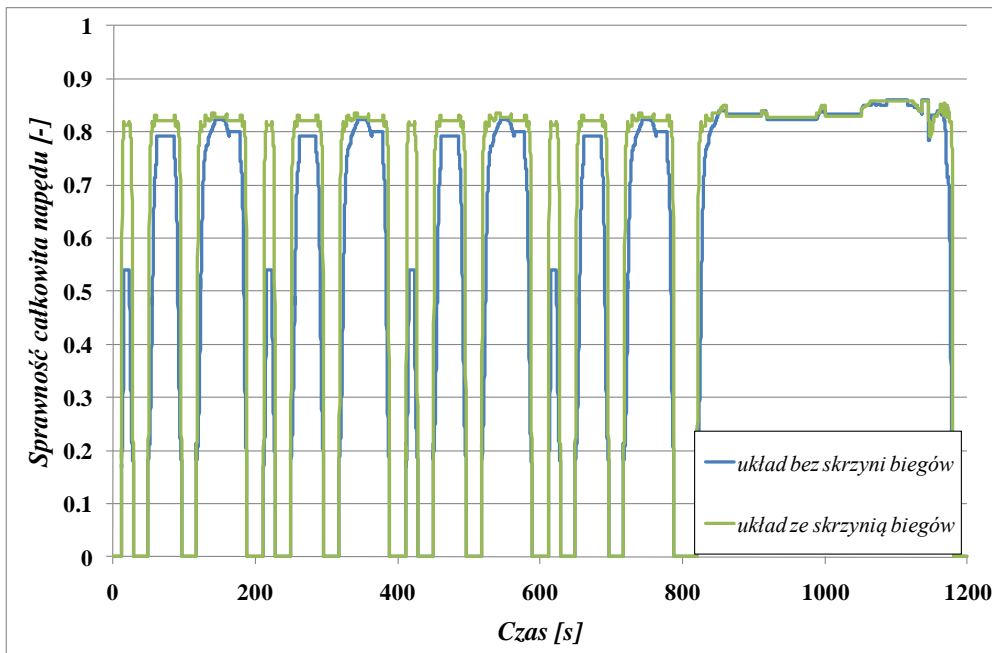
korzystniejszego rozkładu sprawności chwilowych poszczególnych komponentów napędu jak również sprawności całkowitej napędu. Na rysunkach od 15 do 17 przedstawiono sprawności chwilowe w cyklu jazdy z rysunku 9 dla zespołu maszyna elektryczna - inwerter, dla przekładni mechanicznej oraz wynikową wartość chwilowej sprawności całkowitej napędu elektrycznego.



Rys. 15. Przebieg sprawności zespołu maszyna elektryczna – inwerter



Rys. 16. Przebieg sprawności przekładni mechanicznej

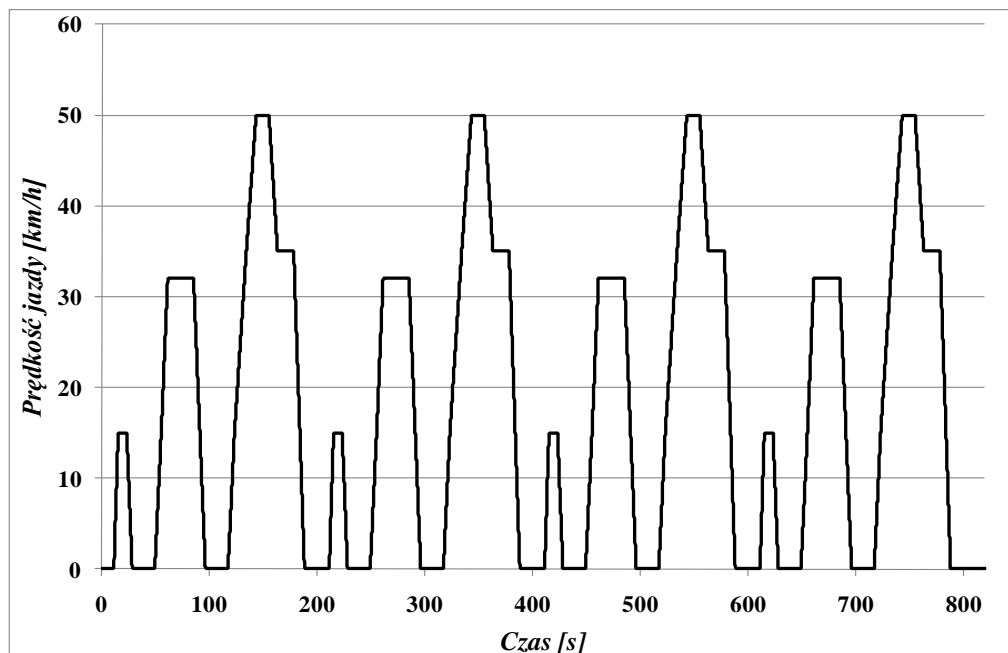


Rys. 17. Przebieg sprawności całkowitej napędu elektrycznego

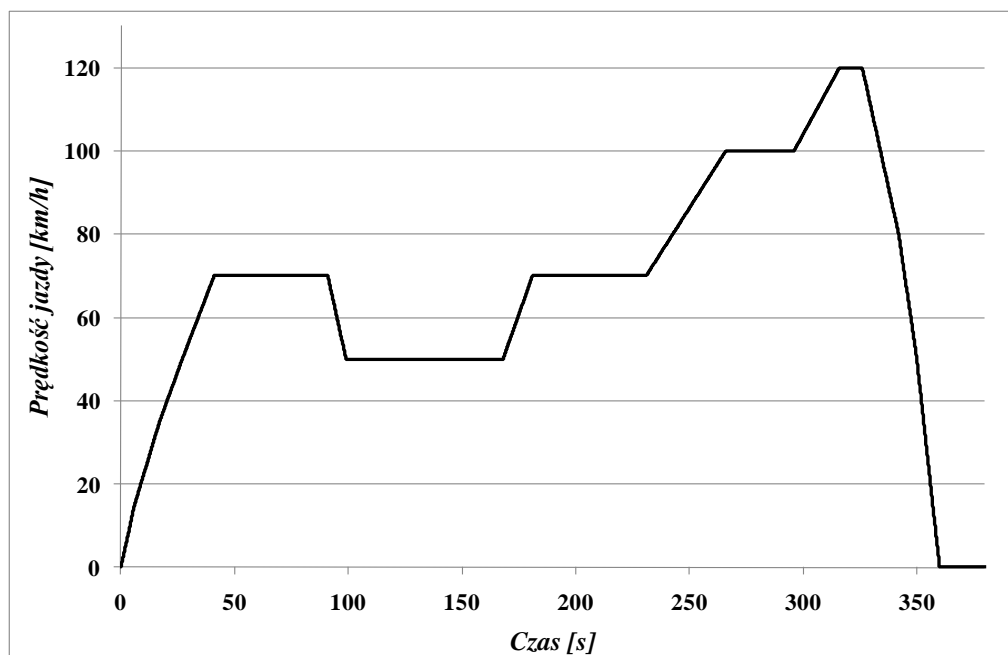
Porównując przebiegi sprawności maszyny trakcyjnej z magnesami trwałymi uwzględniając sprawność układu sterowania (rysunek 15) oraz sprawności całkowitej napędu (rysunek 17) widać, że w przypadku napędu z przekładnią wielostopniową sprawność jest wyższa. W konsekwencji o około 8% zwiększył się zasięg jazdy pojazdu z przekładnią wielostopniową (patrz rysunek 14). Otrzymana wartość wydaje się być niewielka i wprost nie dowodzi korzyści stosowania przekładni wielostopniowej. Taki sam wynik można uzyskać dla prostszego w swojej konstrukcji i sterowaniu napędu elektrycznego z reduktorem przy odpowiednim zwiększeniu pojemności baterii elektrochemicznych.

5. Badanie wpływu warunków eksploatacji na zużycie energii w zależności od konfiguracji napędu elektrycznego

Na rysunku 13 dodatkowo przedstawiono krzywą obrazującą przebieg różnicy w stopniu wyładowania baterii elektrochemicznej pracującej w porównywanych elektrycznych układach napędowych zgodnie z cyklem przedstawionym na rysunku 9. Łatwo zauważyć, że w pierwszej części widoczny jest wyraźny wzrost tej różnicy obrazujący korzyści wynikające z zastosowania przekładni wielostopniowej w napędzie elektrycznym. Jednak w końcowej części cyklu ta różnica utrzymuje się na pewnym stałym poziomie. Aż wreszcie na samym końcu cyklu ulega zmniejszeniu. Takie zachowanie jest bezpośrednio związane z warunkami eksploatacyjnymi, które są odwzorowane przez cykl jazdy. Odpowiada to dokładnie częściom cyklu reprezentującym jazdę miejską i jazdę poza miastem. Można by, zatem wnioskować, że większe korzyści przynosi zastosowanie przekładni mechanicznej o zmiennym przełożeniu w warunkach miejskich niż w pozamiejskich. W celu sprawdzenia poczynionego spostrzeżenia cykl z rysunku 9 rozdzielono właśnie na jazdę miejską oraz pozamiejską i przeprowadzono badania symulacyjne mające na celu wyznaczenie zasięgu jazdy w zależności od warunków eksploatacyjnych. Cykle odpowiadające warunkom miejskim i poza miejskim przedstawiono na rysunkach 18 i 19.



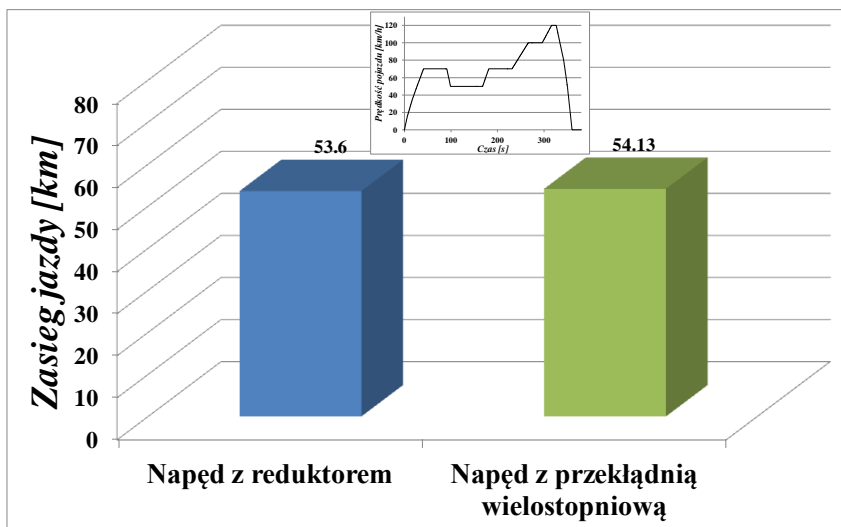
Rys. 18. Miejskie warunki eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym



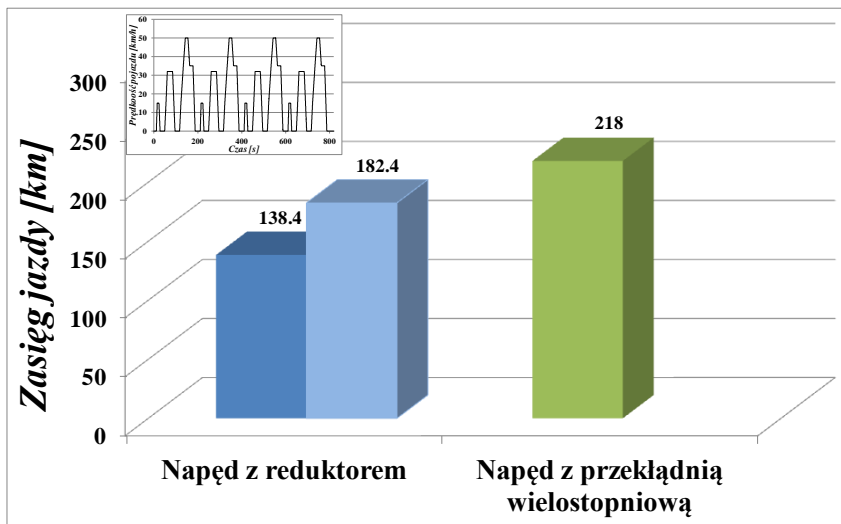
Rys. 19. Pozamiejskie warunki eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym

Widać, więc, że cykl przedstawiony na rysunku 9 odwzorowuje dwa diametralnie różne warunki eksploatacji pojazdu elektrycznego. W zakresie od 0 do 800 sekund (patrz rysunek 18) cykl przedstawia warunki typowe dla pojazdów poruszających się w aglomeracjach miejskich, zaś w zakresie od 800 do 1200 sekund (patrz rysunek 19) mamy do czynienia z warunkami zbliżonymi do poruszania się pojazdu poza miastem. Biorąc pod uwagę całkowitą energię cyklu należy stwierdzić, że tylko 11,4% tej energii przypada na

eksploatację w warunkach miejskich, zaś aż 88,6% odpowiada warunkom eksploatacji pojazdu poza miastem. Taka dominacja warunków pozamiejskich sprawia, że cykl ten w sposób niewystarczający reprezentuje warunki miejskie i z punktu widzenia zużycia energii tak naprawdę odpowiada praktycznie warunkom pozamiejskim, które charakteryzują się jazdą praktycznie ze stałą prędkością i bardzo niewielkim udziałem hamowania rekuperacyjnego. Można, zatem powiedzieć, że zarówno napęd z przekładnią wielostopniową jak również ten wyposażony w reduktor pracowały praktycznie w takich samych warunkach tj. przy stałym przełożeniu (patrz rysunek 17). Jest to przyczyną tak małej różnicy w zasięgu jazdy pojazdu, gdyż tylko w czasie przyspieszania i hamowania napęd z wielobiegową przekładnią charakteryzował się wyższą sprawnością. Dlatego, aby zbadać wpływ przełożenia na zużycie energii w zależności od warunków eksploatacji przeprowadzono badania symulacyjne dla rozdzielonego cyklu NEDC na część miejską (0 do 800 sekund) i część pozamiejską (800 do 1200 sekund).



Rys. 20. Zasięg jazdy dla pozamiejskiej części cyklu NEDC



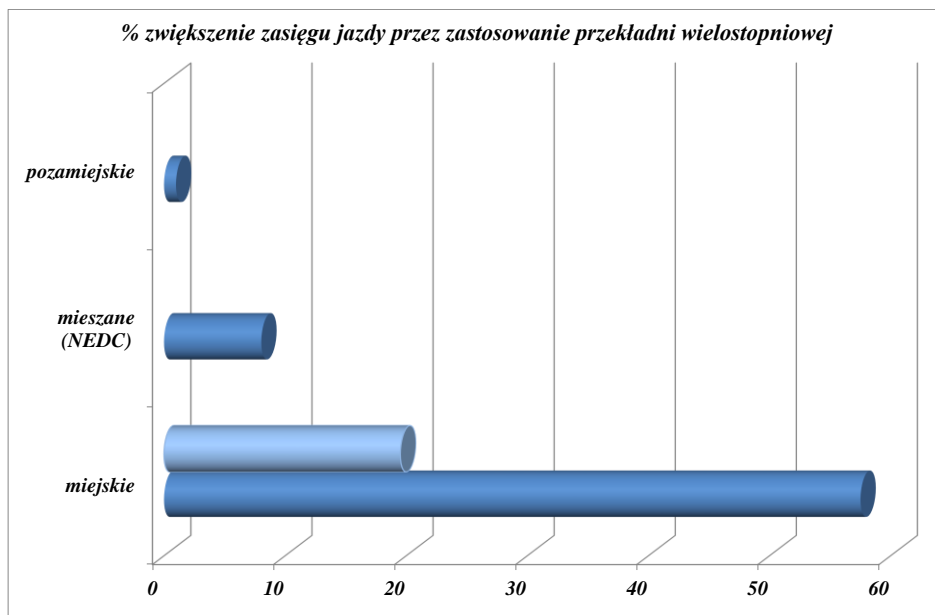
Rys. 21. Zasięg jazdy dla miejskiej części cyklu NEDC

Wyniki uzyskane dla pozamiejskiej części cyklu NEDC (patrz rysunek 20) są praktycznie identyczne dla obu konfiguracji napędu elektrycznego. Łatwo, więc na ich podstawie wysnuć wniosek, że dla takich warunków eksploatacji zastosowanie przekładni wielostopniowej jest nieuzasadnione.

W celu zachowania poziomu odniesienia, badania symulacyjne napędu elektrycznego dla części miejskiej cyklu NEDC zostały wykonane dla identycznych danych jak w przypadku części pozamiejskiej. Widać wyraźnie, że w tym przypadku zastosowanie przekładni wielostopniowej zaowocowało zwiększeniem zasięgu jazdy pojazdu aż o 57% w stosunku do napędu z reduktorem (patrz rysunek 21). Zatem dzięki zastosowaniu właściwych przełożeń mechanicznych możliwe jest prawie dwukrotne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej poprzez ograniczenie momentu obrotowego, a przez to również prądu maszyny trakcyjnej.

Ponadto wykazano, jak ważną kwestią jest taki dobór przełożeń, aby w danych warunkach eksploatacyjnych uzyskać możliwie najmniejsze zużycie energii elektrycznej. Znajduje to potwierdzenie w uzyskanych wynikach. Przełożenie reduktora, które jest dobre dla jazdy w warunkach pozamiejskich jest niesatysfakcjonujące dla jazdy w warunkach miejskich. Aby poprawić zużycie energii elektrycznej takiego napędu w warunkach miejskich konieczny jest wybór innej wartości przełożenia, który powoduje zmniejszenie różnicy pomiędzy napędem z przekładnią wielostopniową i napędem z reduktorem do 19,5%. Jednakże w takim przypadku układ napędowy z reduktorem dopasowanym do warunków miejskich nie może być eksploatowany w warunkach pozamiejskich. Wynika stąd, że aby pojazd z napędem elektrycznym mógł być eksploatowany w różnych warunkach musi mieć, co najmniej 2 przełożenia. Warunek ten całkowicie spełnia napęd z przekładnią wielostopniową.

Różnicę procentową pomiędzy uzyskanymi zasięgami jazdy dla pojazdu z napędem elektrycznym z przekładnią wielostopniową i reduktorem eksploatowanych w różnych warunkach pokazano na rysunku 22.



Rys. 22. Wpływ zastosowania przekładni wielostopniowej na zasięg jazdy pojazdu elektrycznego w zależności od warunków eksploatacji

Widać więc, że dzięki zastosowaniu przekładni wielostopniowej maszyna elektryczna pracuje w zakresie wyższych sprawności, co znacząco wpływa na zużycie energii, a to z kolei bezpośrednio przekłada się na zwiększenie zasięgu jazdy pojazdu z napędem elektrycznym.

6. Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że stosując w napędzie elektrycznym dodatkowy element, jakim jest przekładnia wielobiegowa, można zmniejszyć zużycie energii elektrycznej. Jednocześnie widać, że dobór odpowiedniej wartości przełożenia mechanicznego jest kluczowy z uwagi na zwiększenie zasięgu jazdy, przy czym niemożliwe jest osiągnięcie zadowalającego wyniku stosując tylko jedną wartość przełożenia. Konieczne jest zastosowanie przekładni mechanicznej, która umożliwi wybór wartości przełożenia z co najmniej trzech przełożeń. Jednakże o zasadności stosowania przekładni wielobiegowej w napędzie elektrycznego pojazdu decydują warunki eksploatacji. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wyraźnie widać, że w przypadku jazdy poza miastem wpływ dodatkowej przekładni mechanicznej jest praktycznie znikomy. W przypadku cyklu mieszanego można uznać, że jest już korzystny. Zaś w przypadku warunków miejskich można zaobserwować już znaczące zwiększenie zasięgu jazdy pojazdu elektrycznego przez dodanie przekładni mechanicznej o zmiennym przełożeniu. Uzyskane wyniki pokazują, że przy tych samych parametrach energetycznych baterii elektrochemicznej możliwy jest znaczący wzrost zasięgu jazdy. W przypadku pojazdu eksploatowanego wyłącznie w warunkach miejskich, kiedy zwiększenie zasięgu jazdy nie jest celem nadrzędnym, zastosowanie przekładni wielobiegowej pozwala na ograniczenie parametrów energetycznych baterii elektrochemicznej w tym szczególnie jej pojemności nominalnej. Z uwagi na wyjątkowo nieliniowy charakter parametrów energetycznych baterii elektrochemicznej, z dużym prawdopodobieństwem możemy oczekiwać, w przypadku napędu z przekładnią wielobiegową, możliwości ograniczenia pojemności nominalnej baterii elektrochemicznej nawet o 40%. Wpłyne to nie tylko na zmniejszenie objętości i masy baterii, ale przede wszystkim jej ceny. Docelowo to właśnie w przypadku tej grupy pojazdów, tj. pojazdów miejskich należy stosować przekładnie mechaniczne o zmiennym przełożeniu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz komputerowych można stwierdzić, że stosowanie przekładni w napędzie elektrycznym ma sens, wtedy, kiedy sprawność przetwarzania energii elektrycznej w przypadku napędu z przekładnią jest większa niż w przypadku napędu bez przekładni. Jest to szczególnie widoczna dla pojazdu eksploatowanego w warunkach miejskich. Po pierwsze dzięki przekładni wielostopniowej możliwe jest zapewnienie pracy maszyny trakcyjnej w obszarze o największej sprawności, co powoduje wzrost całkowitej sprawności napędu elektrycznego. Po drugie, dzięki większej liczbie przełożeń przekładni wielostopniowej łatwiej można dopasować właściwe przełożenie do danych warunków eksploatacji, a przez to wpływać na zmniejszenie zużycia energii.

Wszystko to daje podstawę sądzić, że mimo świetnych własności trakcyjnych współczesnych maszyn elektrycznych stosowanych w napędzie elektrycznym, doposażenie go w przekładnię mechaniczną pozwalającą na wybór różnych wartości przełożeń warunki pracy maszyny elektrycznej zostaną znacznie poprawione.

Ze względu na szeroki zakres dostępnych wartości przełożenia mechanicznego, najbardziej predysponowana do takiego zastosowania wydaje się być przekładnia o ciągłej zmianie przełożenia (Continuously Variable Transmissions – CVT). Wśród wielu rozwiązań konstrukcyjnych najlepszym szczególnie ciekawie prezentuje się przekładnia pasowa (V-belts) z paskiem kewlarowym lub z włókna węglowego. Jednakże stosunkowo wysoki koszt oraz mniejsza niż w przypadku przekładni zębatych sprawność, spowodowana tarciem przez pasek na powierzchniach stożkowych kół tej przekładni są istotnymi wadami jej aplikacji w praktyce. Dodatkowo należy rozwiązać system odpowiedzialny za ustawianie żądanej wartości przełożenia mechanicznego, specjalnie dedykowany do napędu elektrycznego, ponieważ obecnie większość rozwiązań wykorzystuje do tego celu najczęściej układ

hydrauliczny. Innym bardzo ciekawym rozwiązaniem przekładni o ciągłej zmianie przełożenia jest Electric Variable Transmission (EVT) [37]. Rozwiązanie to składa się z maszyny elektrycznej zintegrowanej z układem elektromagnetycznym przypominającym przekładnię planetarną o dwóch stopniach swobody. Moment obrotowy przekazywany jest przez pole magnetyczne. Niestety na chwilę obecną jest to rozwiązanie koncepcyjne i wydaje się być bardziej przystosowane do napędu hybrydowego z silnikiem spalinowym.

Drugą grupą są przekładnie zębate. Spośród wielu rozwiązań szczególnie łatwe do adaptacji w napędzie elektrycznym wydają się być systemy typu Dual-Clutch [38] czy przekładnie planetarne [39]. Ich sterowanie w przypadku napędu elektrycznego będzie praktycznie takie samo jak w przypadku napędu spalinowego, do którego są dedykowane. Kwestią otwartą pozostaje liczba oraz wartości przełożeń takiej przekładni, które muszą być ustalone indywidualnie, gdyż zależą od parametrów pojazdu oraz od warunków jego eksploatacji.

Z uwagi na powszechność stosowania warte uwagi są również przekładnie manualne z synchronizatorem [40,41,42]. Jednakże ich zastosowanie w napędzie elektrycznym wymaga zautomatyzowania ich pracy. Dlatego konieczne jest wyposażenie przekładni wielostopniowej w odpowiedni system sterowania z odpowiednim aktuatorem pozwalające na realizację zadanej strategii sterowania. Zarówno układ sterowania jak również strategia sterowania muszą uwzględniać zjawiska zachodzące podczas zmiany przełożenia. Dotyczy to szczególnie procesu synchronizacji, który to realizowany jest przez synchronizator.

Literatura

- [1] Mitsubishi i-MiEV. Available from: <http://www.press.mitsubishi.pl/www/aktualnosc/68-i-miev-w-polskiej-ofercie/2>.
- [2] Tesla Roadster. Available from: <http://www.teslamotors.com/>.
- [3] Renault Fluence Z.E. Available from: <http://www.renault.pl/swiat-renault/ekologia/auta-elektryczne/fluence-kangoo-ze-prezentacja-wersje-produkcyjne/>.
- [4] Renault Kangoo Express Z.E. Available from: http://samochodelektryczne.org/renault_kangoo_express_ze.htm.
- [5] Renault Kangoo Z.E. Available from: <http://www.renault.pl/samochody-nowe/samochody-elektryczne/kangoo-ze/kangoo-ze-2013/>.
- [6] Renault Twizy. Available from: <http://www.renault.pl/samochody-nowe/samochody-elektryczne/twizy/twizy/>.
- [7] Renault Zoe. Available from: <http://www.renault.pl/samochody-nowe/samochody-elektryczne/zoe/zoe/>.
- [8] Nissan e-NV200. Available from: <http://www.env200.com/>.
- [9] Nissan Leaf. Available from: <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/>.
- [10] BMW ActiveE. Available from: http://samochodelektryczne.org/bmw_activee.htm.
- [11] BMW i3. Available from: <http://www.bmw.pl/pl/pl/newvehicles/i/i3/2013/showroom/drive.html>.
- [12] Chevrolet Spark EV. Available from: <http://www.chevrolet.com/spark-ev-electric-vehicle/specs/trims.html>.
- [13] Chevrolet Volt. Available from: <http://www.chevrolet.com/volt-electric-car/specs/trims.html>.
- [14] FIAT 500e. Available from: <http://www.fiatusa.com/en/500e/>.
- [15] Honda FCX. Available from: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/>.
- [16] Honda FIT. Available from:

- http://www.hondanews.info/news/en/auto/4120831eng?utm_source=HMW&utm_medium=rss.
- [17] Mercedes-Benz B-Class Electric Drive. Available from: <http://www.mbusa.com/mercedes/vehicles/class/class-B>.
- [18] Mercedes-Benz SLS AMG Coupé Electric Drive. Available from: http://www.mercedes-amg.com/webspecial/sls_e-drive/eng.php.
- [19] Mercedes-Benz Vito E-Cell. Available from: http://www2.mercedes-benz.co.uk/content/unitedkingdom/mpc/mpc_unitedkingdom_website/en/home_mpc/van/home/new_vans/models/vito_639/e-cell/facts/technical_data.html.
- [20] Ford Connect EV. Available from: <http://www.pluginamerica.org/vehicles/ford-transit-connect-ev>.
- [21] Ford Focus Electric. Available from: http://focuselectric.fordmedia.eu/factsheets/Ford-FocusElectric_green_EU.pdf.
- [22] SMART Electric Drive. Available from: <https://www.smart.com/pl/pl/index/smart-fortwo-electric-drive.html>.
- [23] Toyota iQ EV. Available from: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html>.
- [24] Toyota RAV4 EV. Available from: http://pressroom.toyota.com/releases/2012+toyota+rav4ev+california.htm?view_id=35924
- [25] Volkswagen e-Golf. Available from: <http://media.vw.com/release/855/>.
- [26] Volkswagen e-up! Available from: <http://www.volkswagen.co.uk/new/e-up-nf/home>.
- [27] Citroën Berlingo Electric. Available from: <http://www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/berlingo/berlingo-electrique.html>.
- [28] Citroën C-Zero. Available from: <http://www.citroen.pl/technologie/full-electric.html>.
- [29] Mercedes-Benz Vito E-Cell. Available from: http://www2.mercedes-benz.co.uk/content/unitedkingdom/mpc/mpc_unitedkingdom_website/en/home_mpc/van/home/new_vans/models/vito_639/e-cell/facts/technical_data.html.
- [30] Arczyński S. Mechanika ruchu samochodu. WNT. 1993.
- [31] Siłka W. Teoria ruchu samochodu WNT. 2002.
- [32] Pellegrino G, Vagati A, Boazzo B, Guglielmi P. Comparison of Induction and PM Synchronous motor drives for EV application including design examples.
- [33] Szumanowski A. Fundamentals of hybrid vehicle drives. 2000; Warsaw-Radom.
- [34] Szumanowski A. Hybrid Electric Power Train Engineering and Technology, Modeling, Control and Simulation. Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), USA. 2013.
- [35] Lovas L, Play D, Mariligeti J, Rigal J F. Mechanical Behaviour Simulation for Synchromesh Mechanism Improvements. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering. 2006; Vol. 220: 919-945.
- [36] Sandooja A. Double Indexing Synchronizer To Amplify the Synchronizer Capacity. Technical Report 2012-01-2003, SAE International. 2012.
- [37] Ding Q, Quan L, Zhu X, Liu J, Chen Y. Development of a new two-rotor doubly salient permanent magnet motor for hybrid electric vehicles. Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference on 20-23 Aug. 2011. 2011: 1-4.
- [38] Hong S, Ahn S, Kim B, Lee H, Kim H. Shift control of a 2-speed dual clutch transmission for electric vehicle. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE. 1202-1205. 9-12 Oct. 2012.
- [39] Mousavi R, Saman M, Boulet B. Modeling, simulation and control of a seamless two-speed automated transmission for electric vehicles. American Control Conference (ACC), 4-6 June 2014, 2014: 3826-3831.

- [40] Hajduga A, Roszczyk P. Analiza strategii sterowania napędem elektrycznym z wielobiegową zautomatyzowaną przekładnią mechaniczną, w: Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów , Instytut Logistyki i Magazynowania, Vol. 4, 2015: 3602-3616
- [41] Jun-qiang X, Guang-ming X, Yan Z. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE , vol., no., pp.1,4, 3-5 Sept. 2008.
- [42] Ren Q, Crolla D A, Morris A. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance. Vehicle Power and Propulsion Conference. VPPC '09. IEEE , 7-10 Sept. 2009: 1260-1265.
- [43] Szumanowski A. Hybrid electric vehicle drives design Edition based on URBAN BUSES. Warsaw-Radom. 2000.
- [44] Szumanowski A. Akumulacja energii w pojazdach. WKŁ. Warsaw. 1984.