mgr inż. Marcin Nikoniuk

Department of Information Technology and Mechatronics in Transport
Warsaw University of Technology,
Faculty of Transport,
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
Email: marcin.nikoniuk@wt.pw.edu.pl

dr hab. inż. Maciej Kozłowski

Department of Information Technology and Mechatronics in Transport
Warsaw University of Technology,
Faculty of Transport,
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
Email: mkozlo@wt.pw.edu.pl

Własności energetyczne układu zasilania bezstykowego modelu laboratoryjnego pojazdu PRT (Personal Rapid Transit)

Keywords: *PRT, układ zasilania bezstykowego, symulacja, zakładane eksploatacyjne warunki ruchu*

Abstract: Artykuł prezentuje wyniki badań własności eksploatacyjnych układu zasilania bezstykowego zastosowanego w modelu demonstracyjnym pojazdu PRT, wykonanym w ramach projektu ECO Mobilność. Przedstawiono obszar zastosowań transportowych systemu szynowego automatycznych środków transportu PRT. Opisano rozwiązanie układu napędowego pojazdu PRT konstrukcji ECO Mobilność – napęd za pomocą indukcyjnego silnika liniowego, zasilanie bezstykowe dynamiczne oraz układ rekuperacji z zastosowaniem superkondensatora. Zaprezentowano mapy sprawności elektrycznej silnika linowego i układu zasilania bezstykowego. Przedstawiono sposób ich wykorzystania w obliczeniach zużycia energii trakcyjnej metodą przejazdów teoretycznych. Przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych dla toru próbnego w skali. Przedstawiono wyniki obliczeń projektowych parametrów układu zasilania dla planowanej linii demonstratora o wymiarach rzeczywistych.

1. Wstęp

Rozwiązania transportowe z zastosowaniem pojazdów typu PRT (Personal Rapid Transit) nie są nowe [1]. Pojazd PRT jest automatycznym środkiem transportu szynowego. Zazwyczaj pojazdy PRT poruszają się na kołach ogumionych po specjalnych układach torowych [26]. Również w Polsce zastosowania transportowe PRT były przedmiotem wyczerpujących analiz [5]. Obecnie jednak nastąpił ponowny wzrost zainteresowania tego typu środkami transportu ze względu na pojawienie się koncepcji „podcar" stanowiącej pomysł rozszerzenia zakresu użytkowania tego typu automatycznego pojazdu szynowego na obszary dróg kołowych publicznych [27]. Wprowadzenie tej koncepcja może być oparte na dwóch różnych poziomach automatyki sterowania ruchem pojazdu. Na poziomie niższym oznaczanym zazwyczaj Level 3 [29] pojazdy poruszają się po wyodrębnionych pasach ruchu dróg publicznych nazywanych „drogami wirtualnymi" ze względu na konieczność budowy specjalnej infrastruktury i układów komunikacji V2I [10]. Na poziomie najwyższym, oznaczanym Level 5 pojazdy powinny poruszać się jako pojazdy autonomiczne. Pojazdy

PRT, poruszające się zgodnie z ideą „podcar" również po drogach kołowych publicznych staną się w obszarach miejskich elementem sieci zautomatyzowanych środków transportu ATN [8]. Tego typu pojazdy będą stanowiły w przyszłości syntezę automatycznego pojazdu szynowego i kołowego. W obszarach gęstej zabudowy o dużym natężeniu ruchu będą mogły poruszać się po wydzielonych specjalnie dla nich wybudowanych torach, aby w obszarach podmiejskich charakteryzujących się małym natężeniem ruchu kołowego wykorzystać infrastrukturę drogową.

Artykuł jest poświęcony opisowi układu zasilania zastosowanego w „polskiej" wersji PRT, wykonanej jako model fizyczny w skali w ramach projektu ECO Mobilność. Ten projekt nie doczekał się jeszcze realizacji dla zastosowań transportowych tym nie mniej wykonano badania układów sterowania na torze próbnym dla pojazdów w skali. Fragment toru w skali był ostatnio prezentowany na targach w Hanowerze na „naukowym" stanowisku polskim „Scitech Poland" [7, 28].

Omawiany układ zasilania jest układem zasilania bezstykowego – dynamicznego, co oznacza możliwość dostarczania energii do pojazdu w czasie ruchu w przeciwieństwie do układów stacjonarnych, w których energia dostarczana jest jedynie w czasie postoju pojazdu. Zastosowany silnik napędowy to silnik indukcyjny liniowy. To rozwiązanie układowe ilustruje jedną z wielu możliwości, które można stosować do napędu i zasilania tego typu pojazdów. Układy zasilania mogą być równie dobrze wykonane jako stykowe z puntami zasilania w miejscach postoju. Silniki napędowe mogą być wykonywane jako bezszczotkowe, indukcyjne i umieszczane w kołach lub jako jednostki centralne. Natomiast układ zasilnia bezstykowego ma tą niewątpliwie zaletę, że jest układem bezpiecznym [23, 30]. Energia zasilająca jest przekazywana indukcyjnie z uzwojenia pierwotnego rozłożonego wzdłuż toru ruchu – podobnie jak trzecia szyna w metrze. Zasadnicza różnica między zasilaniem stykowym za pomocą trzeciej szyny, a bezstykowym indukcyjnym polega na tym, że „szyna" zasilania bezstykowego jest izolowana, a przez to bezpieczna.

2. Schemat przetwarzania energii układu napędu pojazdu PRT z układem zasilania bezstykowego, silnikiem liniowym i superkondensatorem

Schemat układu napędu pojazdu PRT z układem zasilania bezstykowego, silnikiem liniowym i superkondensatorem prezentuje rys. 1, gdzie oznaczono:

- część stacjonarną – podstacja trakcyjna: SE – sieć elektroenergetyczna, TS – transformator sieciowy, PS – diodowy prostownik sieciowy, PR – przekształtnik rezonansowy, KR1 - kondensatory obwodu rezonansowego po stronie pierwotnej, TD – transformator dopasowujący

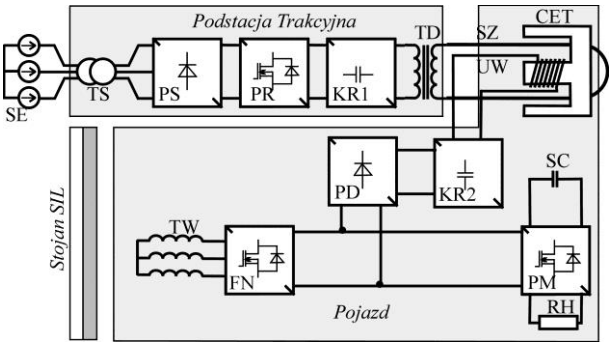
- część pojazdową: układ zasilania bezstykowego (CET), SZ – uzwojenie pierwotne układu bezstykowego przekazywania energii, UW - uzwojenie wtórne układu bezstykowego przekazywania energii, KR2 – kondensatory obwodu rezonansowego po stronie wtórnej, PD – prostownik diodowy, FN – falownik napędowy, PM – przekształtnik dwukierunkowy dla zasobnika energii oraz przekształtnik rezystora hamującego, SC – zasobnik superkondensatorowy, RH – rezystor hamowania, silnik indukcyjny liniowy (SIL)

Rys. 2 przedstawia schemat przyrostów energii, które można powiązać z wyodrębnionymi układami podczas ruchu pojazdu. Ponadto przyjęto, że:

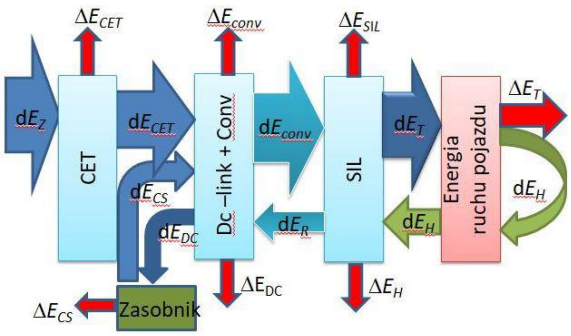
- Energia transformatora CET jest energią elektryczną prądu jednofazowego sinusoidalnie zmiennego nieodkształconego o częstotliwości 50 kHz. Przyrosty tego typu energii oznaczono symbolami: dE_Z – zasilania strony pierwotnej CET, dE_{CET} – strony wtórnej CET, dE_{CS} – rozładownia superkondensatora, dE_{DC} – ładowania superkondensatora, ΔE_{CET} – strat układu CET, ΔE_{CET} – strat superkondensatora.

- Energia zasilająca silnik jest energią elektryczną prądu trójfazowego sinusoidalnie zmiennego nieodkształconego o częstotliwości regulowanej poprzez falownik. Przyrosty tego typu energii oznaczono następująco dE_{conv} – zasilania silnika, dE_R – rekuperacji, ΔE_{SIL} – straty silnika, ΔE_R – rekuperacji.
- Energia napędowa ma postać energii mechanicznej. Przyrosty energii oznaczono: dE_T – trakcyjna, dE_H – kinetyczna, ΔE_T – strat mechanicznych.

Rys. 3 prezentuje model fizyczny pojazdu PRT w skali 1:4 na stanowisku do badań laboratoryjnych układu zasilania i sterowania ruchem wykonanym na Wydziale Transportu. Przedstawiony na rysunku pojazd znajduje się na zwrotnicy. Z boku pojazdu widoczny jest transformator CET z otwartym obwodem magnetycznym w kształcie litery E. Obwód magnetyczny jest otwarty, aby pojazd mógł swobodnie opuścić pętlę uzwojenia pierwotnego. Sekcja uzwojenia pierwotnego jest widoczna za pojazdem. Odcinek drogi na zwrotnicy pojazd pokonuje w trybie zasilania za pomocą superkondesatorowego zasobnika energii.

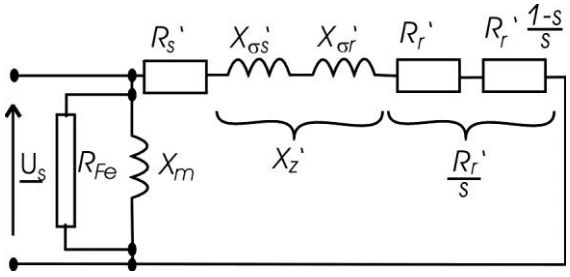


Rys. 1. Schemat blokowy układu zasilania: część stacjonarna oraz pojazdowa



Rys. 2. Schemat przetwarzania energii układu napędu pojazdu PRT

Rys. 3. Model fizyczny pojazdu PRT na stanowisku laboratoryjnym



Rys. 4. Uproszczony obwodowy schemat zastępczy opisujący przyjęty do obliczeń model silnika liniowego

3. Model silnika indukcyjnego liniowego

Własności energetyczne komponentów układu napędu pojazdu w stanie ustalonym można opisać za pomocą sprawności, współczynnika mocy i strat mocy, następująco:

$$\eta = \frac{P_m}{P_c} \tag{1}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^{\,2} + Q_c^{\,2}}} \tag{2}$$

$$P_c = P_m + \Delta P \tag{3}$$

gdzie: P_m – moc na wale, P_c – całkowita moc czynna, ΔP – straty mocy, Q_c – moc bierna.

Moc mechaniczna silnika liniowego może być ponadto określona jako iloczyn siły i prędkości:

$$P_m = F_{lin} v_{lin} \tag{4}$$

Do teoretycznego opisu powyższych zależności zastosowano model obwodowy silnika o najprostszej postaci, znanej z modelowania statycznego stanu pracy silnika obrotowego dla warunków zasilania prądem sinusoidalnie zmiennym nieodkształconym. Schemat elektrycznego obwodu zastępczego modelu przedstawia rys. 4. Występujące na nim parametry oznaczono następująco: R_s – rezystancja uzwojeń strony pierwotnej, R_r – rezystancja uzwojeń strony wtórnej, X_z – reaktancja zastępcza strony wtórnej (składająca się z reaktancji rozproszenia i stojana i wirnika), R_{FE} – rezystancja zastępcza strat w żelazie (na prądy wirowe i histerezę), X_m – reaktancja magnesowania. Indeks ‘ oznacza przeliczenie wartości parametru strony wtórnej do wartości strony pierwotnej. O zastosowaniu tak prostego modelu przesądziła jego użyteczność, rozumiana tu jako możliwość uzyskania wystarczająco małej rozbieżności opisu teoretycznego charakterystyk trakcyjno – energetycznych silnika zastosowanego w napędzie fizycznym na stanowisku laboratoryjnym. Należy jednak zaznaczyć, że silnik liniowy (w przeciwieństwie do obrotowego) ma otwarty obwód magnetyczny. W silniku liniowym duże znaczenie mają pasożytnicze zjawiska krańcowe i brzegowe, które w silnikach obrotowych można pominąć. Szczelina magnetyczna silnika liniowego jest znacznie szersza od szczeliny w silniku obrotowym. Efektem tych zjawisk jest zmniejszenie sprawności silników indukcyjnych liniowych i wzrost zapotrzebowania mocy biernej dla wytworzenia strumienia magnetycznego. Opracowanie modelu matematycznego silnika indukcyjnego liniowego opisującego te dodatkowe zjawiska jest procesem złożonym, który doczekał się wielu opracowań teoretycznych [20], również w obszarze teorii sterowania [2, 24, 11].

Dla przyjętego schematu zastępczego możliwe jest sformułowanie następującego zestawu wzorów:

a) Całkowita moc czynna składa się z mocy elektromagnetycznej wirnika i strat mocy w żelazie:

$$P_c = P_m + \Delta P = F_l V_s + pm \frac{U_s^{\,2}}{R_{Fe}} \tag{4}$$

b) Moc bierna pobierana jest na wytworzenie strumienia magnesowania i strumieni rozproszenia:

$$Q_c = \frac{sF_l V_s}{s_K} + pm \frac{U_s^{\,2}}{X_m} \tag{5}$$

c) Siła jest funkcją poślizgu opisaną wzorem Klossa:

$$F_l = \frac{2F_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} = \frac{2F_K s_K s}{\left(s_K^{\,2} + s^2\right)} \tag{6}$$

gdzie: V_s – prędkość liniowa synchroniczna, m – liczba faz, p – liczba par biegunów, U_s – napięcie zasilania stojana. F_K – siła krytyczna, s_K – poślizg krytyczny, s - poślizg

Dla przyjętego sposobu opisu mocy czynnej i biernej, określenia sprawności (1) i współczynnika mocy (2) można sprowadzić do postaci:

$$\eta = \frac{V_l}{V_s + m\dfrac{U_s^{\,2}}{F_l R_{Fe}}} \tag{7}$$

$$\cos\varphi = \frac{F_l V_s + m\dfrac{U_s^{\,2}}{R_{Fe}}}{\sqrt{\left(F_l V_s + m\dfrac{U_s^{\,2}}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\dfrac{sF_l V_s}{s_K} + m\dfrac{U_s^{\,2}}{X_{mi}}\right)^2}} \tag{8}$$

4. Mapa sprawności modelu silnika indukcyjnego liniowego

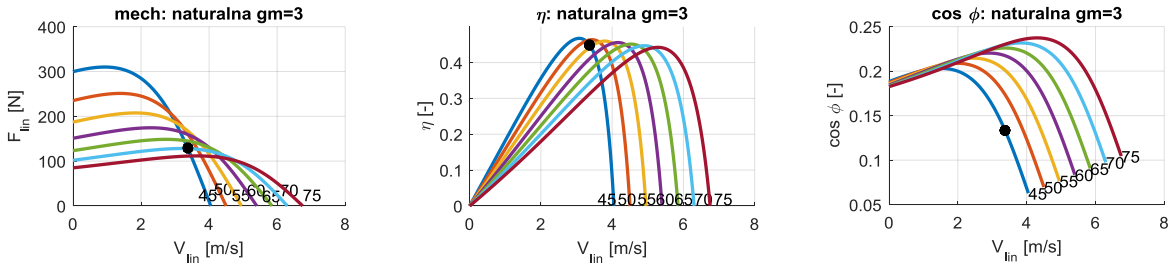
Tablica 1 przedstawia parametry znamionowe silnika indukcyjnego liniowego wykonanego dla pojazdu w skali 1:4 [12, 25]. Tablica 2 przedstawia zakres zmian parametrów dla warunku zmiany znamionowej szerokości szczeliny powietrznej w dopuszczalnym konstrukcyjnie zakresie wartości 2- 4 mm. Parametry modelu obwodowego silnika zidentyfikowano na podstawie analizy zgodności przebiegów wykresów charakterystyk teoretycznych i zmierzonych laboratoryjnie. Posłużono się przy tym metodą najmniejszych odległości. Wyznaczone wartości parametrów zestawiono w tablicy 3. Uzyskane charakterystyki teoretyczne przedstawia rys. 5: a) mechaniczna, b) sprawności, c) współczynnika mocy.

Tablica 1. Parametry znamionowe SIL

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Długość induktora	L	m	0,27
Liczba par biegunów	p	-	3
Liczba faz	m	-	3
Szczelina znamionowa	g_m	mm	3
Napięcie zasilania	U_1	V	230
Częstotliwośc znamionowa	f_n	Hz	45
Prędkość liniowa znamionowa	V_{ln}	[m/s]	3,375
Moc znamionowa	P_{cn}	W	433
Moc czynna	P_{1n}	W	966
Moc pozorna	S_{1n}	[VA]	7250

Tablica 2. Parametry pracy ciągłej silnika w warunkach zmiany długości szczeliny powietrznej w zakresie wartości 2 – 4 mm.

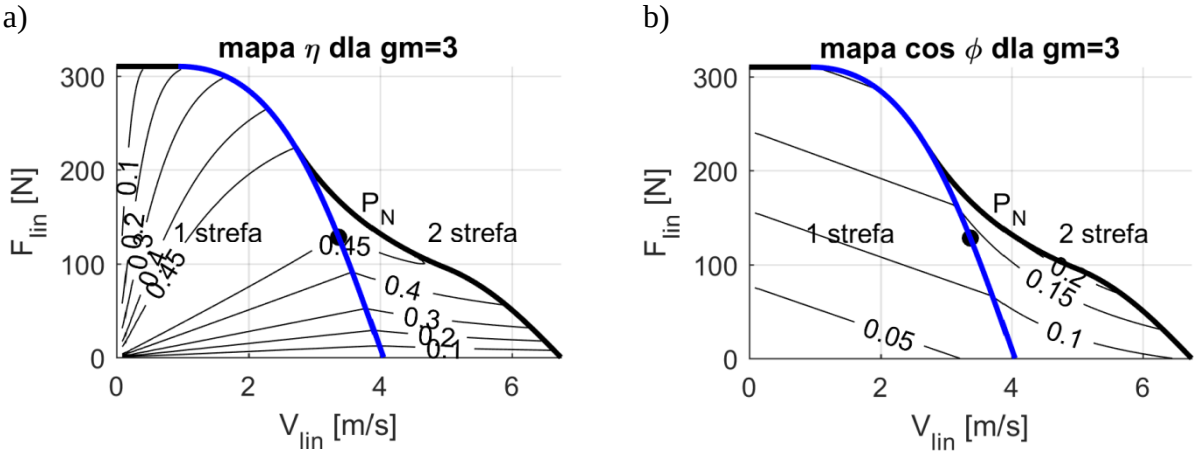
Parametr	Symbol	Jednostka	2	2,5	3	3,5	4,0
Poślizg	s_n	-	0,143	0,160	0,167	0,180	0,1901
Prędkość liniowa	V_{ln}	[m/s]	3,470	3,402	3,375	3,32	3,28
Siła ciągła	F_{cn}	[N]	166	148	128	116	103
Moc na wale	P_{cn}	[W]	575	504	433	385	338
Moc czynna	P_{1n}	[W]	1148	1053	966	1006	1039
Moc pozorna	S_{1n}	[VA]	7250	7250	7250	7250	7250
Sprawność	η_N	-	0,50	0,48	0,448	0,38	0,32
Współczynnik mocy	$\cos\varphi_N$	-	0,158	0,146	0,133	0,14	0,14
Współczynnik energetyczny	$\eta_N * \cos\varphi_N$	-	0,079	0,070	0,060	0,053	0,047



Rys. 5. Charakterystyki naturalne SIL: mechaniczna, sprawności (η) oraz współczynnika mocy (cos ϕ) dla różnych wartości częstotliwości napięcia zasilającego

Tablica 3. Parametry schematu zastępczego dla różnych szerokości szczeliny powietrznej

Symbol	Jednostka	2	2,5	3	3,5	4,0
X_Z'	[Ω]	151	170	189	213	235
R_r'	[Ω]	97	121	146	174	207
X_m	[Ω]	68	68	67	67	66
R_{Fe}	[Ω]	998	1051	1066	888	767

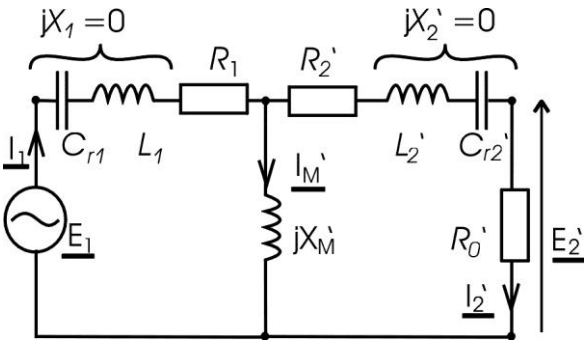


Rys. 6. Mapy sprawności i współczynnika mocy SIL napędu laboratoryjnego dla szczeliny o szerokości 3 mm.

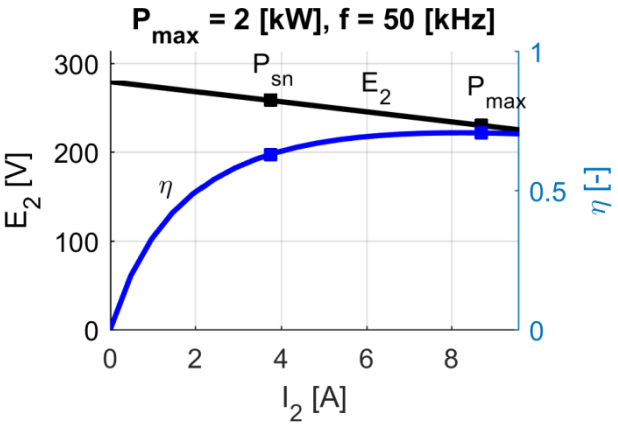
Rys. 6 przedstawia mapy sprawności i współczynnika mocy silnika dla szczeliny o szerokości 3 mm. Parametry zestawione w tablicy 3 umożliwiają uzyskanie map dla pozostałych szerokości szczelin.

5. Model bezstykowego układu zasilania

Podstawowym elementem układu zasilania bezstykowego jest transformator powietrzny wysokiej częstotliwości CET, którego uzwojenia pierwotne i wtórne są utrzymywane w stanie rezonansu – przy wykorzystaniu dodatkowych kondensatorów (X_1 = X_2 = 0) [3, 9, 13, 14, 22]. Schemat ideowy obwodu stosowany do opisu stanu ustalonego w warunkach zasilania napięciem sinusoidalnie zmiennym nieodkształconym [4, 21] przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat obwodu zastępczego transformatora CET



Rys. 8. Wykresy charakterystyk bezstykowego układu zasilania: zewnętrzna $E_2(I_2)$ oraz sprawności $\eta(I_2)$

Oznaczono: R_1 – rezystancja uzwojeń strony pierwotnej, R_2' – rezystancja uzwojeń strony wtórnej sprowadzona do strony pierwotnej, R_0' – rezystancja odbiornika sprowadzona do strony pierwotnej, L_1 – indukcyjność rozproszenia uzwojenia pierwotnego, L_2' – indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego sprowadzona do strony pierwotnej, C_{r1} – pojemność kondensatora kompensującego strony pierwotnej, C_{r2}' – pojemność kondensatora kompensującego strony wtórnej sprowadzona do strony pierwotnej, X_M' – reaktancja sprzężenia magnetycznego sprowadzona do strony pierwotnej, X_1 – reaktancja zastępcza połączenia szeregowego $L_1 – C_{r1}$, X_2' – reaktancja zastępcza połączenia szeregowego $L_2 – C_{r2}$ sprowadzona do strony pierwotnej, I_1 – prąd strony pierwotnej, I_2' – prąd strony wtórnej sprowadzony do strony pierwotnej, E_1 – napięcie zasilania strony pierwotnej, E_2' – napięcie odbiornika sprowadzone do strony pierwotnej.

Moc wydzieloną na odbiorniku określa wzór:

$$P_{out} = (I_2')^2 R_0' \tag{9}$$

Moc wydatkowana ze źródła jest sumą mocy wydzielonej na wszystkich rezystancjach obwodu:

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P = {I_1}^2 R_1 + \ (I_2')^2 (R_2' + R_0') \tag{10}$$

Sprawność elektryczna jest określona wzorem:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(I_2')^2 R_0'}{(I_1)^2 R_1 + \ (I_2')^2 (R_2' + R_0')} \tag{11}$$

Moc bierna układu jest pobierana wyłącznie na wytworzenie strumienia magnesującego:

$$Q_{in} = (I_M')^2 X_M' \tag{12}$$

Współczynnik mocy jest określony wzorem:

$$cos\varphi = \frac{P_{in}}{S_{in}} = \frac{(I_1)^2 R_1 + \ (I_2')^2 (R_2' + R_0')}{\sqrt{\left((I_1)^2 R_1 + \ (I_2')^2 (R_2' + R_0')\right)^2 + \left((I_M')^2 X_M'\right)^2}} \tag{13}$$

Napięcie wyjściowe układu zasilania bezstykowego określa wzór:

$$\underline{E_0} = \underline{E_2'} + \underline{Z_w'} \ \underline{I_2'} \tag{14}$$

gdzie: $\underline{E_0}$ – jest napięciem w stanie jałowym, $\underline{Z_w}$' – jest to impedancja wewnętrzna układu zasilania.

Równanie charakterystyki zewnętrznej opisuje wzór cosinusów, który po przekształceniach przybiera następującą postać:

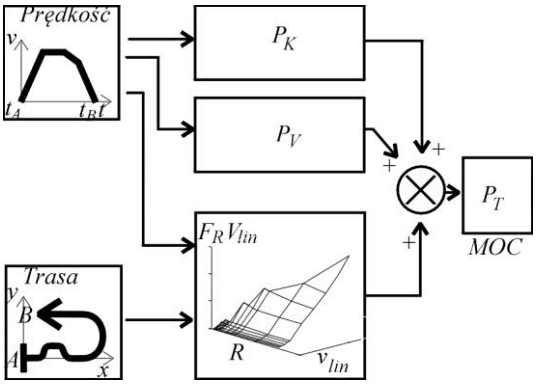
$${E_0}^2 = (E_2')^2 + \ (Z_w' \ I_2')^2 + 2(E_2')(Z_w' \ I_2') \cos\psi_w \tag{15}$$

gdzie dodatkowo: ψ_W - kąt przesunięcia fazowego między prądem, a napięciem w impedancji wewnętrznej

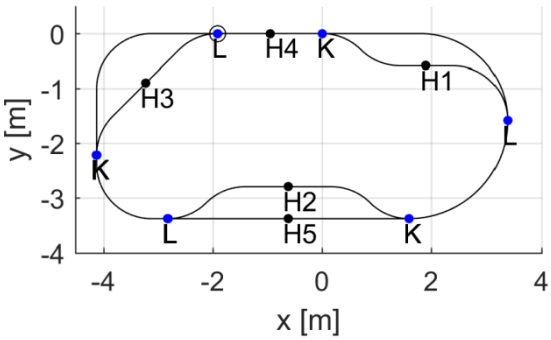
Na podstawie wykonanych obliczeń projektowych oraz pomiarów parametrów transformatora układu CET do zasilania pojazdu w skali, przyjęto następujące wartości parametrów modelu obwodowego: $M = 5 \cdot 10^{-6}$ H, $R_1 = 18 \cdot 10^{-3}$ Ω, $R_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ Ω, $\upsilon = 1/18$, $f = 50 \cdot 10^3$Hz [19]. Wymagana maksymalna moc silnika $P_{max} = 2 \cdot 10^3$ W jest rozwijana przy napięciu $U_s = 230$ V, w warunkach zasilania napięciem o wartości $E_1 = 280/18$ V. Rys. 8 przedstawia wykresy charakterystyk bezstykowego układu zasilania: zewnętrzną $E_2(I_2)$ oznaczoną E_2 (przeliczoną na stronę wtórną) oraz sprawności $\eta(I_2)$ oznaczoną η. Na rysunku oznaczono dwa wybrane punkty pracy: P_{sn} – punkt obciążenia układu mocą czynną odpowiadającą znamionowym warunkom pracy silnika ze szczeliną magnetyczną 3 mm (966 W – tablica 1) oraz P_{max} – punkt obciążenia maksymalną dopuszczalną mocą czynną.

6. Analiza teoretyczna własności energetycznych układu zasilania dla zakładanych wymaganych warunków ruchu pojazdu laboratoryjnego.

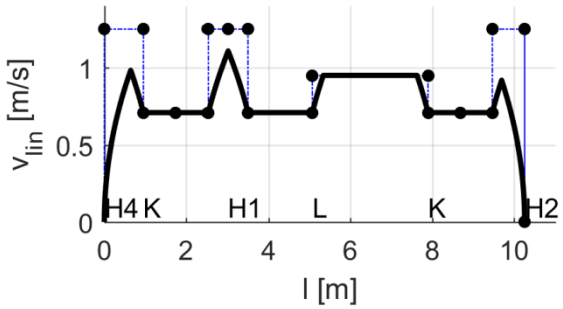
Punktem wyjścia analizy zużycia energii przez układ napędowy pojazdu jest analiza zapotrzebowania na moc (energię) mechaniczną, zwaną potocznie mocą trakcyjną. Schemat zastosowanego sposobu obliczeń mocy trakcyjnej przedstawia rys. 9 [18], gdzie oznaczono: Prędkość – zadany przebieg chwilowy prędkości, Trasa – zadany tor ruchu i profil drogi, P_K – przyrost energii kinetycznej w czasie, P_V – moc na pokonanie aerodynamicznych oporów ruchu, $F_R \cdot v_{lin}$ – moc na pokonanie sił oporów dodatkowych (zakrętów). W prezentowanej metodzie składnik mocy dodatkowych oporów ruchu jest funkcją promienia łuku drogi R i prędkości jazdy v_{lin}, określaną interpolacyjnie na podstawie tablicy wyników uzyskanych symulacyjnie [15] z wykorzystaniem modeli dynamiki pojazdu [15, 16]. Rys. 10 przedstawia schemat laboratoryjnego toru ruchu, gdzie symbolami H oznaczono przystanki, K – rozjazdy, L – połączenia torowe. Rys. 11 przedstawia międzyprzystankowy rozkład prędkości jazdy na odcinku H4 – H2 (w funkcji drogi), wyznaczony na podstawie rozwiązań modelu obliczeniowego o strukturze przedstawionej na rys. 9. Linią przerywaną oznaczono ograniczenia prędkości na zakrętach. Przy wyznaczaniu przebiegu prędkości uwzględniono ograniczenia sił trakcyjnych w postaci charakterystyk przedstawionych na rys. 6 oraz oddziaływanie sił oporów ruchu (podstawowych od prędkości jazdy i dodatkowych od krzywizny toru ruchu). Rys. 12 przedstawia przebieg siły napędowej silnika SIL (w funkcji czasu) na analizowanym odcinku drogi.



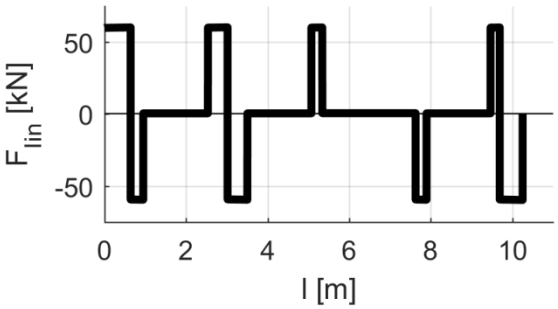
Rys. 9. Schemat wyznaczania mocy trakcyjnej



Rys. 10. Schemat toru ruchu do badań stanowiskowych (lab. Wydziału Transportu)

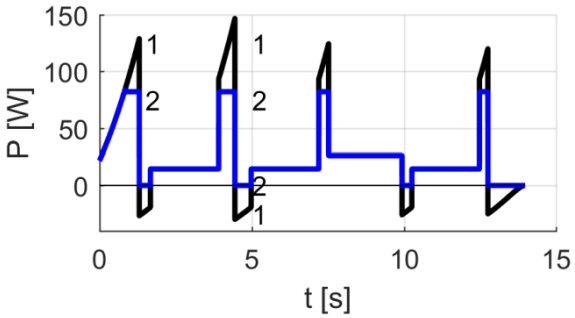


Rys. 11. Rozkład prędkości w funkcji drogi podczas przejazdu na międzyprzystankowym odcinku drogi H4-H5

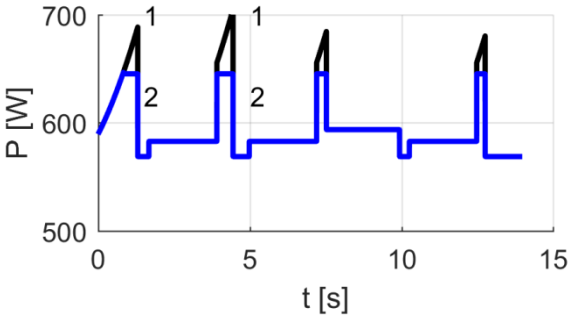


Rys. 12. Przebieg siły napędowej SIL w funkcji czasu na odcinku drogi H4-H5

Powyższe przebiegi sił i prędkości stanowią podstawę do wyznaczenia mocy zasilania silnika SIL. W obliczeniach uwzględnia się funkcję mapy sprawności silnika przedstawioną na rys. 6. Uzyskany przebieg mocy zasilającej przedstawia rys. 13. Wykresy oznaczono: 1 - przebieg mocy chwilowej silnika SIL, - 2 przebieg mocy chwilowej którą należy dostarczyć z prostownika PD (rys.1), gdy w układzie wykorzystany zostanie zasobnik superkondensatorowy. Ujemne wartości mocy na wykresie 1 odpowiadają możliwości zastosowania hamowania elektrycznego pojazdu. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2 zastosowany proces rekuperacji polega na zgromadzeniu energii hamowania w superkondensatorze i wyrównaniu mocy szczytowych rozruchu. W wykonanych obliczeniach uwzględnia się przy tym udział strat przesyłania energii w układzie superkondensatora.



Rys. 13. Przebieg mocy elektrycznej zasilania SIL. Wykresy oznaczono: 1 – bez zasobnika energii na pojeździe, 2 – w układzie z zasobnikiem superkondensatorowym

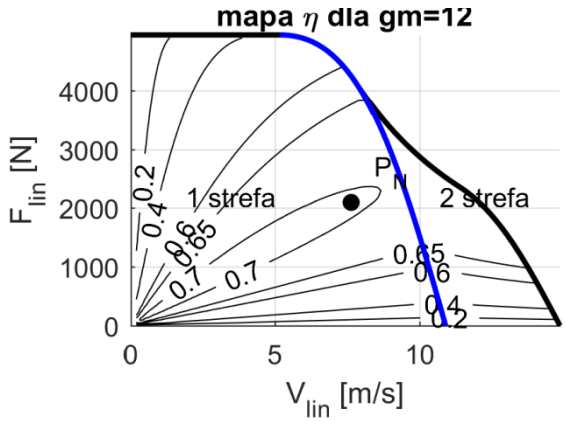


Rys. 14. Przebieg mocy zasilania pojazdu laboratoryjnego na zaciskach układu zasilania bezstykowego CET. Wykresy oznaczono: 1 – bez zasobnika energii na pojeździe, 2 – w układzie z zasobnikiem superkondensatorowym

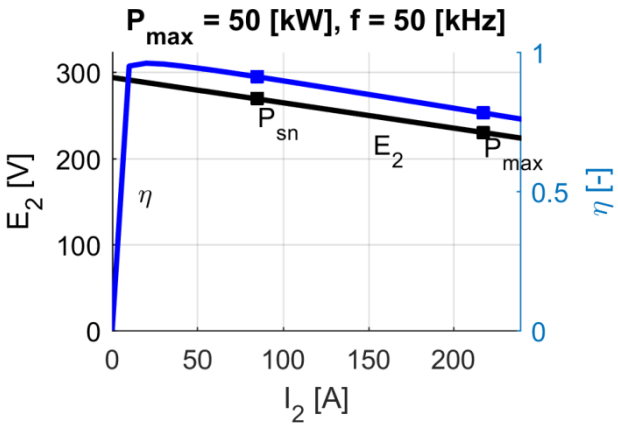
7. Analiza teoretyczna własności energetycznych układu zasilania dla zakładanych wymaganych warunków ruchu pojazdu o wymiarach rzeczywistych.

Jedną z rozpatrywanych lokalizacji dla budowy kolejki PRT jest miasto Rzeszów. Na obecnym etapie uzgodnień nie jest jeszcze przesądzony rodzaj silników elektrycznych stosowanych do napędu oraz sposób zasilania pojazdu dla tej lokalizacji. Z wykonanych obliczeń trakcyjnych wynika jednakże, że do napędu kolejki o wymiarach rzeczywistych i prędkości maksymalnej 50 km/h potrzebny będzie napęd o mocy znamionowej ok. 16 kW. Do realizacji napędu będą mogły być zastosowane np. silniki bezszczotkowe umieszczone w kołach pojazdu zastosowane już w wykonanym preprototypie ECO samochodu. Mapy strat mocy tego silnika przedstawia publikacja [17]. Równie dobrym rozwiązaniem może być też zastosowanie silników indukcyjnych 5 fazowych umieszczanych w piastach kół. Tego typu

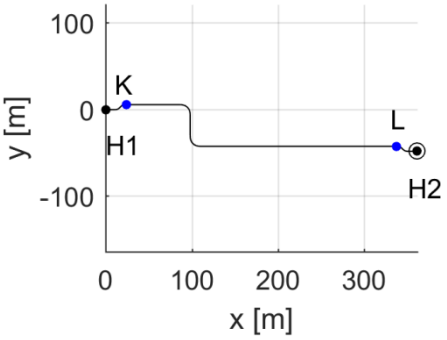
silniki dedykowane do zastosowań samochodowych były ostatnio prezentowane przez firmę HCP na targach w Hannoverze [6]. W zakończonym już projekcie ECO Mobilność wykonano natomiast projekt silnika indukcyjnego liniowego [12]. Mapę sprawności tego silnika przedstawia rys. 15. Rys. 16 przedstawia charakterystykę zewnętrzną oraz charakterystykę sprawności zaprojektowanego w tym rozwiązaniu układu zasilania bezstykowego. Rys. 17 przedstawia schemat linii toru jednego z odcinków trasy w planowanej lokalizacji. Rys. 18 przedstawia przebiegi prędkości jazdy forsownej – minimalnoczasowej na tym odcinku drogi. Ograniczenia prędkości wynikają zarówno z ograniczeń dopuszczalnej wartości maksymalnej przyśpieszenia dośrodkowego na krzywiznach torów jak i z ograniczeń prędkości dla warunków jazdy na wprost. Rozwijane przyśpieszenia i opóźnienia ruchu wynikają natomiast z możliwości uzyskania maksymalnych sił trakcyjnych (opisanych w postaci zależności F – V rys. 15). Rys. 19 przedstawia przebieg sił trakcyjnych na analizowanym odcinku drogi, a rys. 20 – przebiegi mocy zasilania. Na rys tym przebiegi ukazano w dwóch możliwych wariantach rozwiązania układu zasilania pojazdu: wykres czarny – przebieg bez dodatkowego źródła energii, niebieski – z układem superkondensatorowym do zwrotu energii hamowania (układ z rekuperacją). Rys. 21 przedstawia wykresy mocy pobieranej po stronie pierwotnej źródła transformatora CET. W przypadku zastosowania układu z rekuperacją energii, maksymalna wejściowa moc układu kształtuje się na poziomie ok 12 kW.



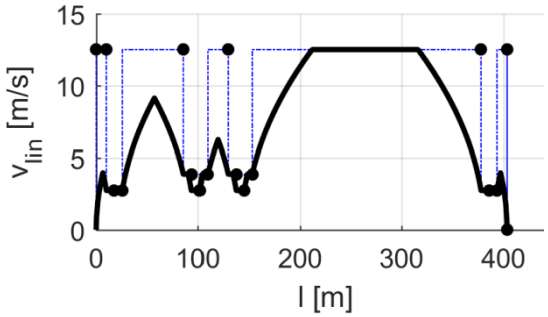
Rys. 15. Mapy sprawności i współczynnika mocy SIL napędu dla pojazdu o wymiarach rzeczywistych dla szczeliny o szerokości 12 mm



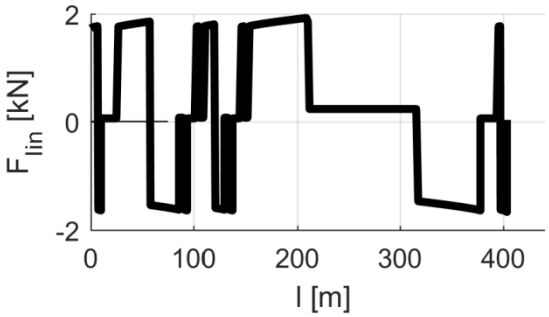
Rys. 16. Wykresy charakterystyk bezstykowego układu zasilania: zewnętrzna $E_2(I_2)$ oraz sprawności $\eta(I_2)$



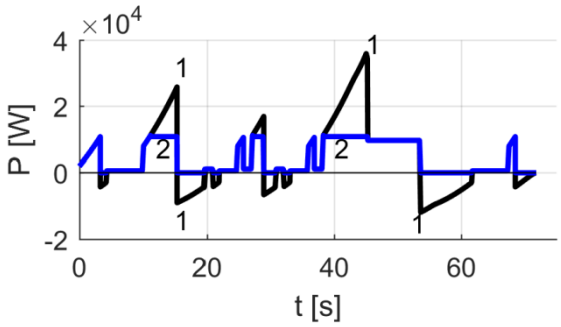
Rys. 17. Schemat linii toru pierwszego odcinka trasy dla planowanej lokalizacji toru PRT w Rzeszowie



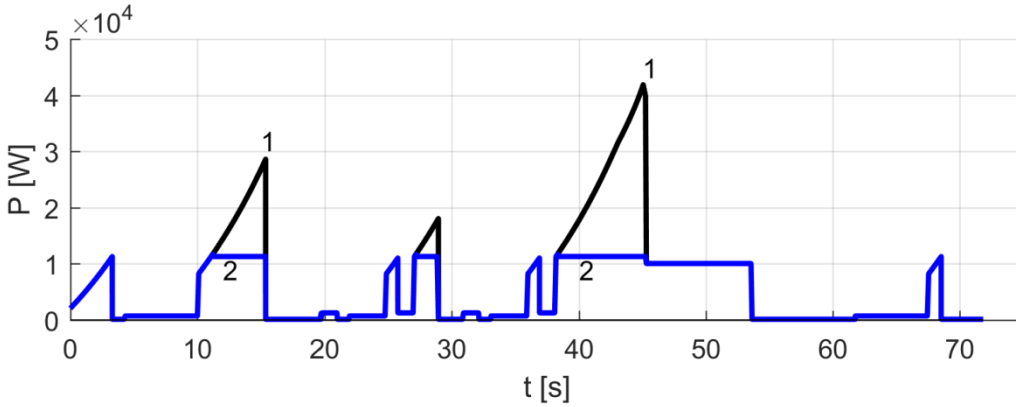
Rys. 18. Rozkład prędkości w funkcji drogi podczas przejazdu odcinka w mieście Rzeszów



Rys. 19. Rozkład siły napędowej SIL w funkcji drogi na odcinku drogi w mieście Rzeszów



Rys. 20. Przebieg mocy na wyjściu prostownika PD (rys. 1). Wykresy oznaczono: 1 – bez zasobnika energii na pojeździe, 2 – w układzie z zasobnikiem superkondensatorowym



Rys. 21. Przebieg mocy zasilania pojazdu na zaciskach układu zasilania bezstykowego CET dla odcinka w mieście Rzeszów. Wykresy oznaczono: 1 – bez zasobnika energii na pojeździe, 2 – w układzie z zasobnikiem superkondensatorowym

8. Wnioski

Przeprowadzone analizy przebiegu pracy napędu pojazdu PRT i wykonane badania laboratoryjne pojazdów na torze próbnym w skali ukazały, że zasilanie bezstykowe dynamiczne może być brane pod uwagę jako jedna z metod dostarczania energii elektrycznej do pojazdów o wymiarach rzeczywistych. Tego typu zasilanie jest idealne dla małych pojazdów poruszających się w infrastrukturze miejskiej, gdzie względy bezpieczeństwa przeciwporażeniowego są szczególnie istotne. Wyniki analiz i badań ukazały również, że silniki indukcyjne liniowe o małej mocy charakteryzują się małymi wartościami współczynników energetycznych (zarówno sprawności jaki i współczynnika mocy). Silnik o mocy 16 kW zaprojektowany dla pojazdu o wymiarach rzeczywistych również charakteryzuje się gorszymi parametrami warunków pracy od silników obrotowych. Zastosowanie silnika liniowego wyklucza również możliwość ruchu tego typu pojazdu PRT po drogach publicznych przeznaczonych dla pojazdów kołowych. Z tego względu druga generacja aktualnie opracowanych na Wydziale Transportu pojazdów PRT będzie wyposażona w silniki obrotowe. Pojazdy te będą mogły mieć układ zasilania bezstykowego stanowiący infrastrukturę układu szynowego, uzupełniony o elektrochemiczne magazyny energii na pokładzie pojazdu. W okresie ruchu szynowego układ zasilania bezstykowego dostarczy energię potrzebą do ruchu po torze oraz energię do naładowania baterii elektrochemicznej, która będzie źródłem zasilania w okresie ruchu po drodze publicznej.

References

1. Anderson J E. A Review of the State of the Art of Personal Rapid Transit. Journal of Advanced Transportation 2000; 34(1): 3-29. (Article first published online: 19 JAN 2010 DOI: 10.1002/atr.5670340103)
2. Berrin S, Vedat M. Karsli. Direct Thrust Controlled Linear Induction Motor Including End Effect. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference 2008.
3. Böttigheimer M, Parspour N, Zimmer M, Lusiewicz A, Design of a Contactless Energy Transfer System for an Electric Vehicle, PCIM Europe 2016; ISBN 978-3-8007-4186-1
4. Boys J, Kazmierkowski M P, Lomonova E, Madawala U, Covic G. Special Section on "Contactless Energy Transfer Systems " IEEE Transactions on Industrial Electronics 2013; 60(1): 212.
5. Chormański W. Systemy transportowe PRT. Wydawnictwa Komunikacji i Lacznosci – Transport and Communication Publishers 2015; s.138, ISBN 978-83-206-19553
6. Codziennypoznan.pl: Powstanie innowacyjny elektryczny samochód dostawczy z silnikiem opracowanym w Zakładach Cegielskiego w Poznaniu, http://www.codziennypoznan.pl/artykul/2017-04-27/powstanie-innowacyjny-elektryczny-samochod-dostawczy-z-silnikiem-opracowanym-w-zakladach-cegielskiego-w-poznaniu [2017-07-13]
7. Dziennik naukowy.pl. Polskie technologie i wynalazki na targach Hannover Messe 2017 http://dzienniknaukowy.pl/nauka-w-polsce/polskie-technologie-hannover-messe-2017/ [2017-07-13]
8. Furman B, Fabian L, Ellis S, Muller P, Swenson R. Automated Transit Networks (ATN): A Review of the State of the Industry and Prospects for the Future, MTI Report 2014
9. Judek S., Karwowski K.: Contactless electrical energy transfer system via magnetically coupled air coils. Gdańsk: Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2013, ISBN 978-83-7348-501-3
10. Jurgen R K. V2V/V2I Communications for Improved Road Safety and Efficiency, SAE International. Product Code of PT-154 2012, ISBN of 978-0-7680-7725-4
11. Kamiński B, Nikoniuk M, Drązikowski Ł. A concept of propulsion and power supply systems for PRT vehicles. Archiwum Transportu - Archives of Transport 2013; 27(3-4): 81-93.
12. Kamiński G., Przyborowski W., Staszewski P., Biernat A., Kupiec E., Design and testing of Laboratory Model of Linea Induction Motor for Automation Personal Urban Transport PRT, Przeglad Elektrotechniczny - Electrical Review 2017; 93(3): 276-283.
13. Kazmierkowski M P, Miskiewicz R M, Moradewicz A J. Inductive coupled contactless energy transfer systems - a review. Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE) 2015.
14. Kazmierkowski M P, Moradewicz A J, Duarte J, Lomonova E, Sonntag Ch. Chapter 35 "Contactless Energy Transfer" in The industrial Electronics Handbook, Part II: Power Electronics and Motor Drives, Second Edition, Edited by B. M. Wilamowski, J. David Irvin, CRC Press 2011.
15. Kozłowski M, Choromański W, Kowara J. Analysis of dynamic properties of the PRT vehicle-track system. Bulletin of the polish academy of sciences, Technical sciences 2015; 63(3): 799-806.

16. Kozłowski M, Choromański W, Kowara J. Parametric sensitivity analysis of ATN-PRT vehicle (automated transit network – personal rapid transit). Journal of Vibroengineering 2015; 17(3): 1436-1451
17. Kozłowski M, Tomczuk K, Szczypior J. Methodology of determining basic technical parameters of electric-drive car, Przeglad Elektrotechniczny - Electrical Review 2011; 87(10): 299-304.
18. Kozłowski M. Simulation method for determining traction power of ATN - PRT (Automated Transit Network – Personal Rapid Transit) vehicle, Transport 2016; ISSN 1648-4142.
19. Krawczyk Z, Nikoniuk M, Starzyński J, Chaber B, Kamiński B. A prototype transformer for inductive contactless energy transfer system: numerical models verified by measurement. Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review 2014; 90(5): 56-60.
20. Lu G, Li Q, Liu Z, Fan Y, Li G. The Analytical Calculation of the Thrust and Normal Force and Force Analyses for Linear Induction Motor, ICSP 2008; Proceedings
21. Mecke R, Rathage C. High frequency resonant converter for contactless energy transmission over large air gap. PESC iEEE 2004; 1737-1743.
22. Moradewicz A J, Kazmierkowski M P. High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter. Bulletin Of The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences 2009; 57(4): 375-381.
23. Nam P. Suh · Dong Ho Cho (Editors): The On-line Electric Vehicle. Wireless Electric Ground Transportation Systems. Springer 2017. ISBN 978-3-319-51182-5
24. Nikoniuk M., Kamiński B., Yaremoff O.: Zagadnienia regulacji sił ciągu i prędkości silnika indukcyjnego liniowego. rozdział 6.9, w: Ekomobilność. Innowacyjne i ekologiczne środki transportu / Choromański Włodzimierz (red.), Wydawnictwa Komunikacji i Lacznosci – Transport and Communication Publishers 2015, 1: 160-179.
25. Nikoniuk M., Kozłowski M., Model strat mocy układu napędu pojazdu PRT (Personal Rapid Transit), Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Transport. OWPW 2016; 112: 301-311,
26. Personal Rapid Transit. Website from Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Personal_rapid_transit, [2017-07-13]
27. Podcar city & advanced transit conference 2017. Smart Cities, Smart Transportation, Smart Energy. Las Vegas USAr 8-10 November 2017. Website at: http://www.advancedtransit.org/library/news/podcar-city-advanced-transit-conference-2017/ [2017-07-13]
28. Politechnika Warszawska Badania i Nauka, Reprezentanci Politechniki Warszawskiej na targach Hannover Messe, Web Site: 2017 https://www.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Aktualnosci/Reprezentanci-Politechniki-Warszawskiej-na-targach-Hannover-Messe-2017 [2017-07-13]
29. Radovanovic D, Muoio D. This is what the evolution of self-driving cars looks like, Finance on line, Business Insider, http://www.businessinsider.com/what-are-the-different-levels-of-driverless-cars-2016-10?IR=T/#-1 [2017-07-13]
30. Worek C. Bezstykowy przesył energii elektrycznej oparty o szeregowo-równoległe układy rezonansowe http://ptetis.agh.edu.pl/CWorek.pdf. 2013 [2017-07-13]