

Analiza oraz modernizacja układu napędowego w tramwaju TATRA T-3

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dynamicznych procesów w systemie trakcyjnego napędu elektrycznego tramwaju na przykładzie tramwaju typu TATRA T-3. Zaproponowano modernizację układu trakcyjnego napędu elektrycznego tramwaju z wykorzystaniem konwerterów firmy Siemens. Na podstawie uzyskanych danych dokonano doboru parametrów i podzespołów analizowanego systemu. Zgodnie z wynikami obliczeń opracowano model komputerowy do badania wpływu układu trakcyjnego na pracę napędu elektrycznego tramwaju dla różnych stanów pracy.

Abstract. The article presents the results of the tests on dynamic processes in the electric traction system on the example of the TATRA T-3 tram. Modernization of the electric traction system with the use of Siemens converters has been proposed. Based on the obtained data, the parameters and components of the analyzed system were selected. According to the results of calculations, a computer model was developed to study the impact of the traction system on the operation of the tram electric drive for various operating states. Tests on dynamic processes in the electric traction system on the example of the TATRA T-3 tram

Słowa kluczowe: elektryczne napędy trakcyjne, procesy dynamiczne, transport publiczny, transport elektryczny.

Keywords: electric traction drives, dynamic processes, public transport, electric transport.

Wstęp

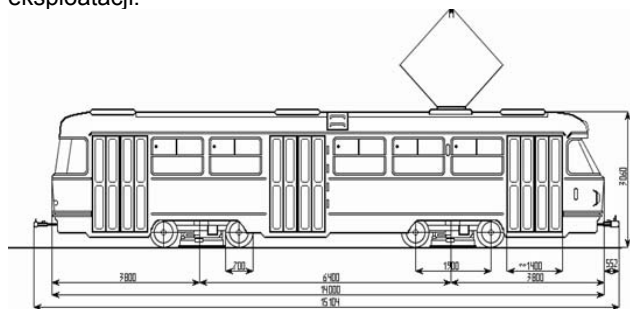
Rosnące zainteresowanie przewozami trakcyjnymi zwłaszcza przeznaczonymi do transportu w obszarach dużej aglomeracji miejskiej w dzisiejszych czasach potęguje potrzebą udoskonalenia oraz tworzenia nowych technologii automatyzacji pracy transportu. Zainteresowanie to wynika z proekologiczności, ograniczenia emisji spalin w centrach miast o dużym zatłoczeniu lub ograniczenia zużycia energii.

Rozwój i stan infrastruktury przewozów pasażerskich w różnych krajach i ich miastach różnią się od siebie. Dlatego dla każdego obszaru istnieją indywidualne perspektywy rozwoju tej infrastruktury transportowej.

Po przeanalizowaniu rozwoju oraz doświadczeń innych krajów, należy zauważyć, że rozwiązania i perspektywy kolei miejskich stosowane w USA, Azji czy Europie są efektywne i doskonale rozumiane. We Lwowie dopiero zostają wprowadzane nowe technologie. Tramwaje wyposażane są w nowe systemy kontroli operacyjnej i sterowania.

Budowa i zasady działania istniejącego oraz proponowanego systemu napędowego

Wagony tramwajowe typu Tatra T3 zostały wyprodukowane przez przedsiębiorstwo CKD w Pradze. Popularność zdobyły w Europie Środkowej i Wschodniej, oraz w ZSRR, gdzie pierwsze egzemplarze zostały dostarczone do Moskwy w 1963r. [1]. Tatra T3 jest podstawowym typem wagonów tramwajowych w wielu czeskich miastach, a używane tam wagony są sprzedawane do ukraińskich przedsiębiorstw transportowych. Wiele wagonów tego typu zostało zmodernizowanych, oraz nadal są one w ciągłej eksploatacji.



Rys.1. Zewnętrzny wygląd tramwaju Tatra T3 [3]

System sterowania

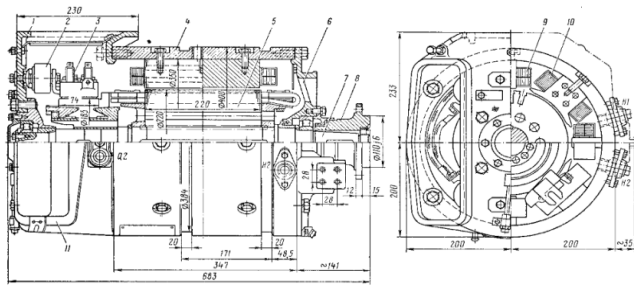
Konwersja energii elektrycznej prądu stałego na pracę mechaniczną, potrzebną do ruchu wagonów T-3, odbywa się czterema silnikami trakcyjnymi TE-022 o wzbudzeniu szeregowym. Silniki te używane są również do przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną w trybie hamowania elektrycznego rezystorowego.

Silniki TE-022 wagonu T-3 różnią się znacznie od silników trakcyjnych, zainstalowanych w innych pojazdach kolejowych. Posiadają wentylację wymuszoną, realizowaną przez wentylatory układu "silnik-generator". Silniki te mają niskie zawieszenie (w odległości 110 mm nad poziomem torów). Z tego powodu ich izolacja jest bardziej narażona na różnego rodzaju uszkodzenia powstałe z powodu dostawania się do środka, śniegu wody, kurzu i innych cząsteczek. Podczas ciągłej eksploatacji uszkodzeniu najszybciej ulega izolacja uzwojeń biegunów zwrotnych

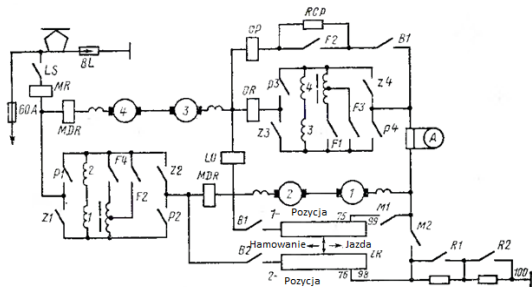
Silnik trakcyjny TE-022 składa się ze stojana - 4 (rys. 2), czterech głównych biegunów - 10, czterech zwrotnych biegunów- 9, wirnika - 5, dwóch tarcz łożyskowych - 1 z węzłami łożyskowymi - 6, czterech trzymadeł szczotkowych - 3 zainstalowanych na dwóch wspornikach - 2, kołnierza- 8 z nakrętką zabezpieczającą oraz dwóch osłon komutatora - 11.

Tabela 1. Dane techniczne silnika trakcyjnego TE-022 [7]

Masa silnika, kg	320
Przepływ powietrza chłodzącego, m ³ /min	7,5
Rezystancja izolacji uzwojeń w stosunku do obudowy dla rozgrzanych uzwojeń, minimum MΩ	0,64
Wytrzymałość elektryczna izolacji uzwojeń, V	600
Klasa izolacji uzwojeń	B
Rezystancja silnika, Ω	0,1050
Rezystancja uzwojenia biegunów zwrotnych (przy 20°C), Ω	0,0245
Rezystancja uzwojenia biegunów głównych (przy 20°C), Ω	0,026
Rezystancja uzwojenia wirnika (przy 20°C), Ω	0,0545
Napięcie znamionowe, V	300
Maksymalna prędkość obrotowa, obr./min	4500
Prędkość obrotowa, obr./min	1750
Współczynnik sprawności, %	91
Prąd, A	150
Moc jednogodzinna, kW	45



Rys.2. Budowa silnika trakcyjnego [3,8]



Rys.3. Zasadniczy schemat elektryczny istniejącego elektrycznego napędu trakcyjnego [3,8]

Na wagonach tramwajowych T-3 produkcji lat 1963-1965, zainstalowane są silniki trakcyjne o podobnej budowie TM-22/22, które mają niższą klasę izolacji.

SINAMICS DCP to innowacyjna przetwornica DC-DC dla przemysłu i sieci inteligentnych sieci.

Za pomocą SINAMICS DCP, Siemens wprowadził na rynek nową generację dwukierunkowych przetwornic prądu stałego. Łączy to w sobie obszerną wiedzę pod kontem technologii prądu stałego i zalety rodziny SINAMICS.

SINAMICS DCP nadaje się zarówno do zastosowań przemysłowych jak i dla wielogeneratorowego rynku OZE. Jako dwukierunkowa przetwornica podwyższająca/obniżająca o zmiennej mocy łączy ona w sobie kilka funkcji w jednym urządzeniu. Oznacza to, że przy zmiennych poziomach napięcia prąd może płynąć w obu kierunkach, co sprawia, że DCP jest idealnym rozwiązaniem dla ładowania i rozładowywania baterii i superkondensatorów. Wewnętrzne układy zabezpieczające gwarantują, że baterie a także superkondensatory nie będą nadmiernie naładowane lub w pełni rozładowane. Dzięki wysokiej wewnętrznej częstotliwości komutacji konstrukcja urządzenia jest zwarta i ma mały ciężar. Dla rozwiązań, wymagających generowania energii, SINAMICS DCP zwiększa także ilość energii elektrycznej, podanej z powrotem do sieci ze względu na jej bardzo dużą wydajność. Standardowo jako interfejs komunikacyjny wykorzystywany jest PROFIBUS, jednak jako dodatkowy interfejs można zastosować PROFINET. Podstawowy panel operatorski BOP20 jest gotowy do pracy, również jako lokalny panel operatora.

Przykładowo dla dźwigów, energia odzyskana z hamowania jest wykorzystywana do następnej operacji podnoszenia i nie zmienia się w ciepło, tak jak dotychczas. Autobusy, działające na prąd stały na różnych poziomach napięcia, można zintegrować z wykorzystaniem SINAMICS DCP. Oznacza to, że zasilanie może być realizowane ze znacznie niższymi kosztami powiązaniymi [10].

W wielu zastosowaniach, np. w prasach i wirówkach, wysoka moc szczytowa pobierana jest z zasilania liniowego w krótkich przedziałach czasowych, co skutkuje odpowiednio wysokimi kosztami energii elektrycznej. W oparciu o SINAMICS DCP można wdrożyć systemy magazynowania energii, które krótkotrwale zapewniają wymaganą wysoką moc, zmniejszając w ten sposób koszty [14].

Tabela 2. Parametry techniczne DC-DC przetwornicy SINAMICS DCP [4]

Napięcie wejściowe / wyjściowe	0 V - 800 V prądu stałego
Max. napięcie wejściowe	920 V prądu stałego (ze zmianą parametrów znamionowych)
Moc / napięcie / moc	$I_{max} = 200 \text{ A @ } U_e = U_a = 600 \text{ V}$, $P = 120 \text{ kW}$
Źródło zasilania	24 V prądu stałego (18 V - 30 V), $I = 20 \text{ A}$
Aktualna pulsacja	<3%
Wejścia / wyjścia	4x równoległe z obu stron (wejścia / wyjścia)
Wydajność 120 kW	> 98%
Zakres temperatur	od 0°C do 40°C, do 55°C
Komunikacja	PROFIBUS, PROFINET, DriveCLiQ z połączeniem OALINK do CU320-2
Typ sterowania w obwodzie zamkniętym	Zamknięty obwód regulacji prądu: punkt zadany może być wprowadzony dla wejścia lub wyjścia.
Moduł sterowania	Sterowanie własne
Izolacja elektryczna	Nie
Waga	ok. 118 kg
Wymiary	900 mm x 205 mm x 500 mm
Stopień ochrony	IP00

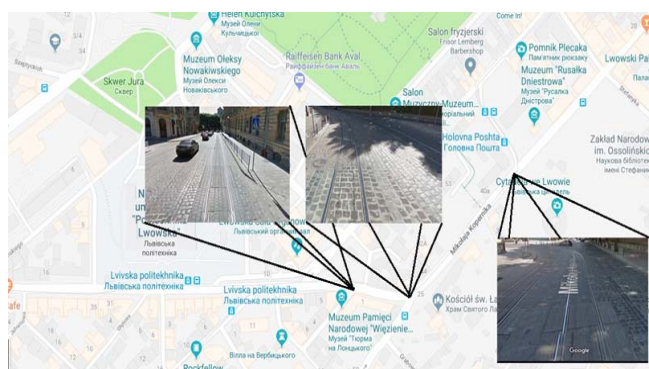
Badania doświadczalne

Do wykonywania obliczeń i weryfikacji zasadności wykonania modernizacji danego napędu elektrycznego zostały przeprowadzone pomiary parametrów odcinka testowego. Odcinek testowy to linia biegnąca ulicą Michała Kopernika oraz Stepana Bandery w Lwowie. Długość odcinka testowego wykorzystanego do badań wynosi 350 metrów.

Odcinek ten został wybrany do obliczenia efektywności modernizacji elektrycznego napędu trakcyjnego tramwaju.

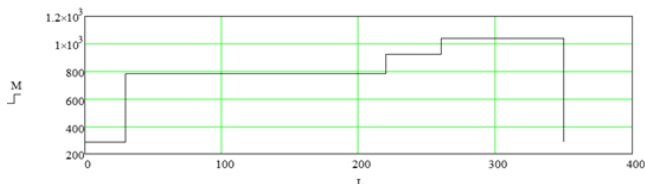
Tabela 3. Parametry odcinka testowego

Numer doświadczenia	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3	
	Wysokość nad poziomem morza	Nachylenie	Wysokość nad poziomem morza	Nachylenie	Wysokość nad poziomem morza	Nachylenie
1	307	3,8	302	3,2	292	2,5
2	305,9	3,85	304,7	3,15	293	2,61
3	306,2	3,79	303,8	3,19	294	2,4
4	306,0	3,76	304,1	3	293	2,37
5	306,27	3,8	303,65	3,1	293	2,5

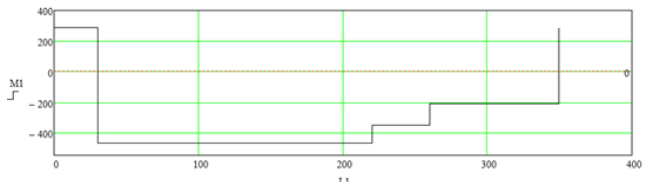


Rys. 4. Obszar trasy testowej i główne miejsca pomiaru [9]

Dane wyznaczonej trasy pomiaru zostały uzyskane za pomocą Google Maps, systemu GPS oraz doświadczeń praktycznych, które są wykorzystywane w celu obliczenia obciążenia napędów trakcyjnych z uwzględnieniem osobliwości tego odcinka.



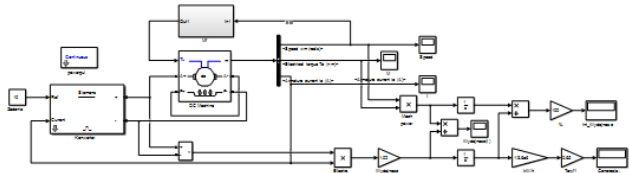
Rys. 5. Wykres obciążeń tramwaju podczas jazdy w górę.



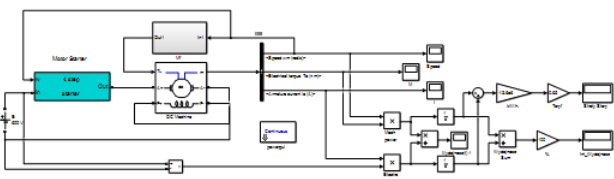
Rys. 6. Wykres obciążeń tramwaju podczas jazdy w dół.

Komputerowa symulacja proponowanego modelu modernizacji napędu

Niemalże we wszystkich tramwajach produkcji krajowej w elektrycznym napędzie trakcyjnym stosowane są silniki prądu stałego ze wzbudzeniem szeregowym. Praktycznie regulacja ich prędkości obrotowej odbywa się przez zmianę napięcia zasilania. Wykonując modelowanie komputerowe elektrycznego napędu trakcyjnego oraz jego sterowania, możemy zbadać i porównać istniejący już system, który jest stosowany w tramwajach jak również wszystkie możliwe warianty modernizacji. Jak pokazuje praktyka, komputerowy sposób modelowania jest najskuteczniejszym rozwiązaniem do wykonania tego zadania.



Rys. 7. Zmodernizowany model elektrycznego napędu trakcyjnego Tramwaju Tatra T3 z przetwornicą DC/DC



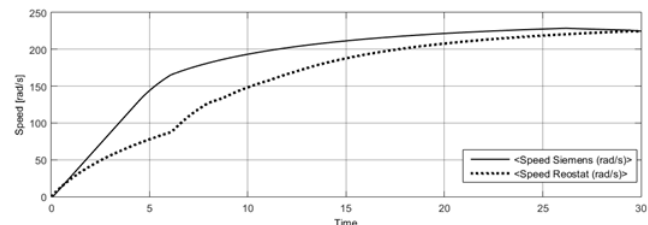
Rys. 8. Rys.3.8. Model elektrycznego napędu trakcyjnego tramwaju Tatra T3 z sterowaniem oporowym

Obliczenie charakterystyk dynamicznych badanego elektrycznego napędu trakcyjnego zostało wykonane w środowisku modelowania symulacyjnego MATLAB + Simulink. Opracowane zostały dwa modele elektrycznego napędu trakcyjnego: istniejący - z oporową regulacją prędkości podczas rozruchu i proponowany - zmodernizowany przy użyciu półprzewodnikowej przetwornicy firmy Siemens.

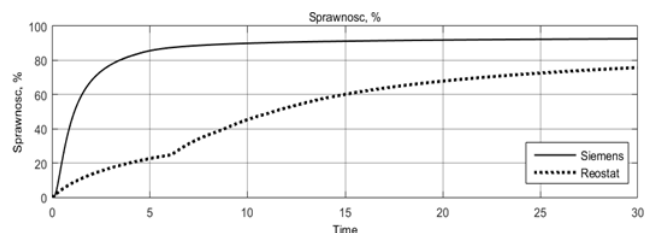
Zastosowanie biblioteki SimPowerSystems pozwoliło wykorzystać właściwe modele silników prądu stałego, a także obliczyć straty mocy i wizualnie przedstawić sprawność oraz zyski/straty bezpośrednio w ekwiwalencie UAH

Wykorzystano podstawowy model przetwornicy Siemens [4], ponieważ nie było potrzeby brać pod uwagę specyfikę działania przetwornicy.

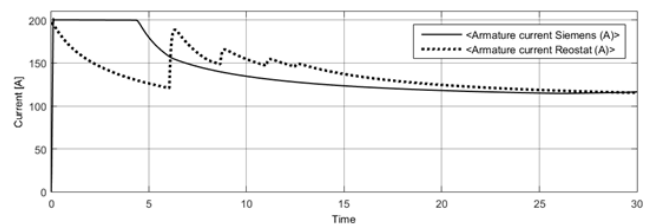
Efekty obliczeń procesów przejściowych podczas przyspieszania tramwaju dla obu wariantów (istniejącego opornikowego i proponowanej modernizacji) przedstawiono dla różnych trybów (przyspieszenie na różnych odcinkach linii, zjazd z góry). W oparciu o uzyskanych wyników modelowania została sformułowana konkluzja dotycząca strat energii elektrycznej, bieżącej sprawności i efektywności obu wariantów napędu elektrycznego. Wyniki komputerowego modelowania ruchu tramwaju na równym odcinku przestawiono na poniższych rysunkach.



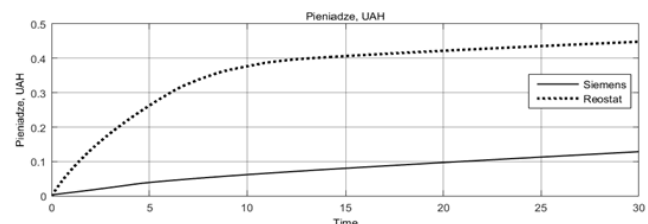
Rys. 9. Prędkość tramwaju przy zastosowaniu różnych układów sterowania



Rys. 10. Współczynnik sprawności przy zastosowaniu różnych układów sterowania



Rys.11. Prąd jednego silnika tramwaju przy zastosowaniu różnych układów sterowania



Rys. 12. Straty energii elektrycznej (w UAH) przy zastosowaniu różnych układów sterowania

Tabela. 4. Zużycie energii elektrycznej w zależności od przebytej drogi na równym odcinku

	L, m	50	100	150	200	250
System z przetwornicą Siemens	Koszty, UAH	0,059	0,075	0,087	0,098	0,107
System ze sterowaniem oporowym	Koszty, UAH	0,426	0,443	0,454	0,462	0,469
Zysk na równym odcinku, UAH		0,734	0,736	0,734	0,728	0,7224

Obliczenie dynamiki przy pomocy modelu komputerowego pozwoliło sformułować konkluzję dotyczącą efektywności energetycznej obu wariantów elektrycznego napędu trakcyjnego dla różnych odcinków trasy (ruch pod górę/w dół, liniowy odcinek trasy). Ponieważ tramwaj z oporowym system sterowania podczas jazdy w

dół nie ma możliwości rekuperacji, cała energia, pochodząca z hamowania, zamienia się w ciepło, testujemy tramwaj z przetwornicą DC/DC, w którym przy jeździe w dół na odcinku testowym jest generowana i oddawana do sieci energia na kwotę 0,331 UAH (zakładamy, że tylko połowa energii wraca do sieci).

Tabela 4. Zużycie energii elektrycznej na odcinku 380 m przy ruchu pod górę

Układ sterowania	Wydatki na odcinku 380 m, UAH
System z przetwornicą Siemens	0,215
System ze sterowaniem oporowym	0,583
Zysk przy jeździe pod górę, UAH	0,736

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że w przypadku starszych rozwiązań, można jeszcze poprawić sterowanie silnikami trakcyjnymi tramwaju tak aby zaoszczędzić przy tym bardzo dużo bo ponad 60% energii. Koszty energii jednak są niskie i zwrot inwestycji polegającej na wymianie sterowania to prawie 10 lat. W dobie stale rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną i ograniczonych możliwościach przepustowości sieci elektroenergetycznych oszczędność ponad połowy energii to bardzo dużo. Wobec tego w aspekcie ekologicznym jest to bardzo dobry krok który z pewnością pozwoli efektywniej wykorzystać dostarczoną energię elektryczną.

Autorzy: mgr inż. Ewelina Szymczykiewicz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektrotechniki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: e.szymczykiewicz@el.pcz.czyst.pl
mgr inż. Paweł Boral, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: pawelboral@o2.pl
inż. Oleksander Czerniak, Politechnika Lwowska, St. Bandera St, 12, Lviv, Ukraina, 79012, E-mail: aleks1593764@gmail.com

LITERATURA

- [1] Ivanov M.D., Ponomarev A.A., Oropolsky B. K. Wagony tramwajowe T-3. – Moskwa: Transport, 1977, scanned by E69 2008. 1977. – 240 str.
- [2] M. D. Ivanov, A.P. Alpatkin, B.K. Ieropsky. Budowa i eksploatacja tramwaju. Podręcznik dla szkół zawodowych. – Ed. 2, poprawiony i powiększony. Moskwa: Wydawnictwo „High School”. [Иванов М. Д., Алпаткин А. П., Иеропольский Б. К. Устройство и эксплуатация трамвая. Учебное пособие для профессионально-технических училищ. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М., Высшая школа, 1977. – 272 str. [po rosyjsku].
- [3] Katalog online : Tatra T3. – https://pl.wikipedia.org/wiki/Tatra_T3.
- [4] SINAMICS DCP – the innovative DC-DC converter for industry and the smart grid : Katalog online. – <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/ld/Infocenter-LanguagePacks/sinamics-dcp/sinamics-dcp-en.pdf>
- [5] Tatra T3 Blueprint : Katalog online. – <https://drawing-database.com/tatra-t3/>
- [6] SINAMICS DCP : Innovative DC-DC Converter. Katalog online. – <https://w3.siemens.com/drives/global/en/converter/dc-drives/dc-dc-converters/pages/sinamics-dcp.asp>
- [7] Katalog online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Pesa_Twist (dostęp: 15.10.2019r.)
- [8] Katalog online: https://uk.wikipedia.org/wiki/Tatra_KT4 (dostęp: 11.09.2019r.)
- [9] <https://www.google.pl/maps>
- [10] Paweł Boral, Analiza i projekt elektrycznego układu napędowego w tramwaju. Praca magisterska wykonana w Katedrze Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny Politechnika Częstochowska, 2019r. Promotor; dr inż. Dariusz Całus.
- [11] Diez A. E., Diez I. C., Lopera J. A., Bohorquez A., Velandia E., Albarracin A., Restrepo M., Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce green houseemissions, Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International, 2012.
- [12] Glinka T.: Silnik trakcyjny przeznaczony do napędu tramwaju. Materiały V Konferencji SEMTRAK 92. Politechnika Krakowska 1992.
- [13] Giziński Z.: Krajowy tabor trakcyjny – stan obecny, perspektywy, zagrożenia. Wiadomości Elektrotechniczne 3/2003.
- [14] Katalog online. - <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/ld/InfocenterLanguagePacks/sinamics-dcp/sinamics-dcp-en.pdf> (dostęp: 12.09.2019)
- [15] Piec P.: Badanie eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004