

Wojciech Czuchra, Janusz Prusak, Waldemar Zając

## Tramwaje z napędem asynchronicznym – ocena energochłonności

**Przedsiębiorstwa eksploatujące tabor trakcyjny ponoszą znaczne opłaty za zużycie energii elektrycznej. Zastosowanie nowego taboru z napędem przekształtnikowym związane było również z oczekiwaniami ograniczenia tego zużycia rejestrowanego na podstacjach trakcyjnych. Ponieważ zaczęły pojawiać się kontrowersje dotyczące ponoszonych kosztów, zaistniała potrzeba między innymi dokonania oceny energochłonności wdrażanych do użytku nowoczesnych tramwajów z napędem przekształtnikowym.**

W artykule przedstawiono badania i wyniki związane z oceną energochłonności tramwaju nowego typu. W przypadku, gdy pojawiają się wątpliwości związane z kosztami energii elektrycznej zużywanej na cele trakcyjne, pierwszym krokiem prowadzącym do wyjaśnienia tych wątpliwości powinna być ocena samego pojazdu w zakresie energochłonności.

Wieloletnie doświadczenie wskazują, że zastosowanie zmodernizowanego taboru nie przekłada się w łatwo zauważalny sposób na płacone rachunki za zużytą energię elektryczną rejestrowaną na licznikach energii zainstalowanych w tramwajowych podstacjach trakcyjnych. Szersza ocena wpływu zabiegów inwestycyjnych związanych z zakupem nowoczesnego taboru, jak również rozbudową (zagęszczeniem) i modernizacją tramwajowych podstacji trakcyjnych, z punktu widzenia ewentualnych korzyści związanych z ograniczeniem rachunków dla zakładu energetycznego, wymaga uwzględnienia wielu aspektów. Wszystkie wartości oceny tego problemu związane są z analizą funkcjonowania układów zasilania i ruchu pojazdów w złożonych warunkach eksploatacyjnych i organizacyjnych. Niewątpliwie wymaga to zebrania wielu niezbędnych danych i zarchiwizowania ich za określony okres eksploatacji, celem dokonania następnie w miarę pełnej oceny problemu. Nie należy jednak oczekiwać korzyści, jeżeli eksploatowany tabor nie jest energooszczędny.

Za najbardziej wartościowe wyniki, które są przydatne do kolejnych analiz i porównań, należy przyjmować te uzyskane w czasie pomiarów w warunkach rzeczywistej eksploatacji w obszarze systemu (układu) zasilania, którego ma dotyczyć analiza kosztów zużycia energii.

### Opis tramwaju NGT6

W ramach odnowy taboru tramwajowego, w celu podniesienia poziomu warunków podróżowania, w Krakowie od października 2000 r. wdrażane są do eksploatacji tramwaje typu NGT6. Dzięki odpowiednio zawartym umowom, tylko cztery wagony montowane były w całości za granicą. Resztę wozów zmontowano w halach Krakowskiego Miejskiego Zakładu Napraw Tramwajów (MZNT). Dzięki temu obniżono cenę tramwaju, jak również zaplecze techniczne miało szansę przyjrzeć się wszystkim szczegółom nowych pojazdów i zapoznać się z nimi w trakcie montażu.

Trójczłonowy tramwaj NGT6 jest pojazdem jednokierunkowym. Tramwaj ma obniżoną podłogę na powierzchni około 65%. Pojazd oparty jest na trzech wózkach, z czego dwa skrajne są zrazem wózkami napędowymi, a środkowy tocznym. Tramwaj ma cztery silniki o mocy 125 kW każdy. Lekka, samonośna konstrukcja wagonu wykonana jest ze stali nierdzewnej. Odpowiednio wzmocniony jest dach tramwaju, na którym znajduje się cała aparatura elektryczna. Pozostałe parametry są następujące: długość 26 m, liczba miejsc siedzących 78, łączna liczba pasażerów 198, masa 31,6 t, prędkość maksymalna 80 km/h.

Sterowanie silników trakcyjnych zrealizowane jest jako selektywne, za pomocą czterech przetwornic (falowniki impulsowe IGBT-DPU).

Zastosowany w pojeździe nowoczesny system sterowania tramwaju pozwala między innymi na hamowanie z oddawaniem energii do sieci trakcyjnej aż do zatrzymania pojazdu.

Pomiary były wykonywane w tramwaju, który poruszał się po zadanej trasie z balastem (bez pasażerów), między tramwajami, których ruch wynikał z rozkładów jazdy. Wyposażenie elektryczne zostało na dachu tak rozmieszczone, że główny ciężar opierał się na wózkach napędowych pierwszego i drugiego wagonu. Na każdym z członów wagonu 1 i 2 umieszczono we wspólnej skrzyni dachowej przetwornice główne i pomocnicze oraz moduły sterowania.

### Pomiary

#### Opis trasy

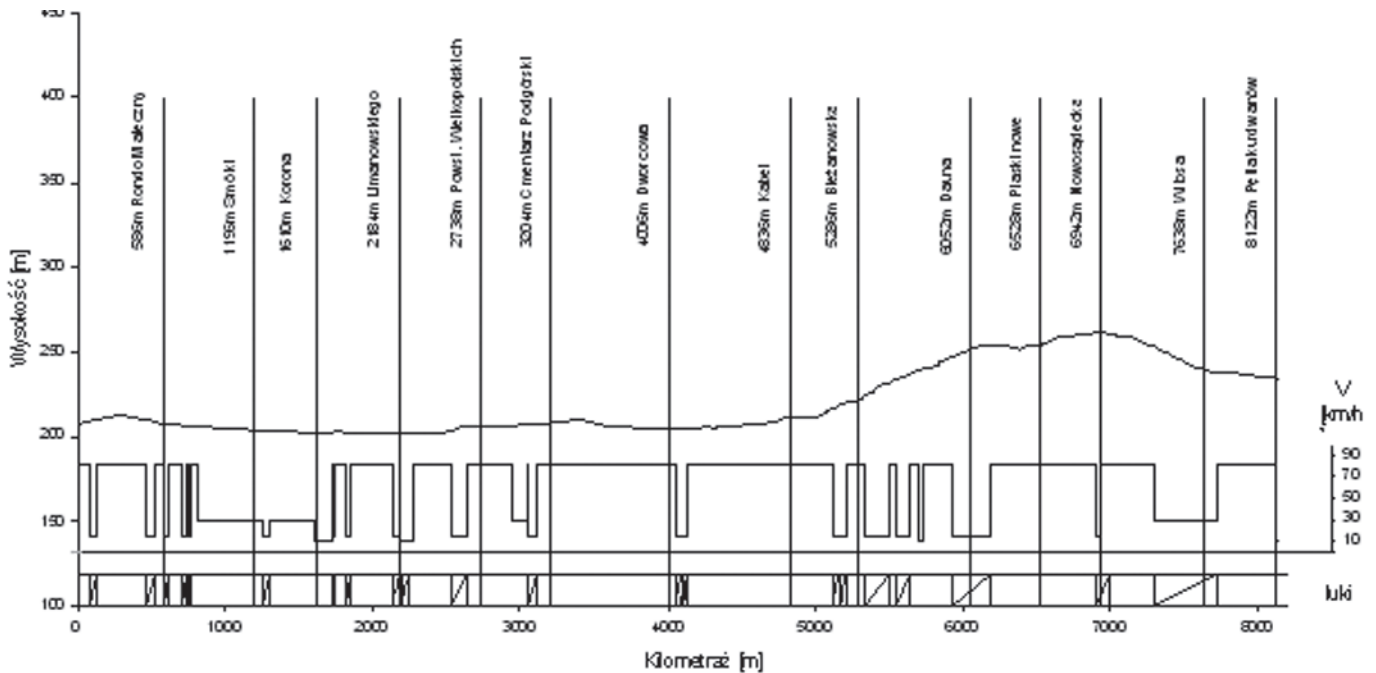
Pomiary jednostkowego zużycia energii przeprowadzono dla kilku wybranych odcinków linii tramwajowej. Natomiast dla jednej wybranej trasy przeprowadzono również obliczenia. Wyniki zestawiono w tablicach.

Długość trasy wynosiła około 8200 m. Według rozkładu jazdy MPK można ją przejechać tramwajem w czasie około 26–30 min. Średni czas postoju na przystankach wynosi około 30 s. Różnica poziomów na całej trasie między krańcowymi przystankami wynosiła około 50 m. Ustaleń tych dokonano na podstawie map geodezyjnych terenu. Profil poziomy i pionowy trasy przedstawiono na rysunku 1.

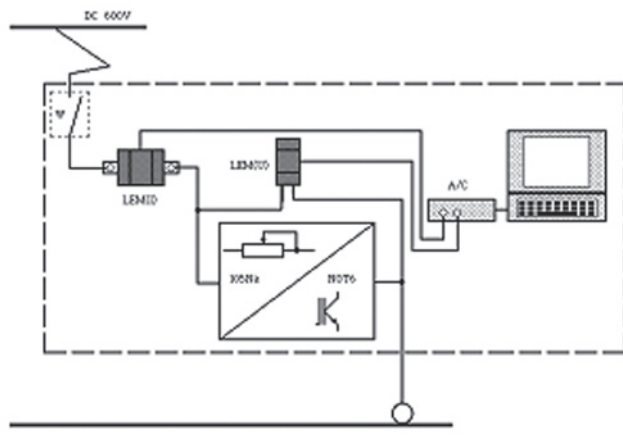
#### Układ pomiarowy

Zużycie energii przez pojazd wyznaczone zostało na podstawie pomiaru dwóch wielkości: całkowitego prądu trakcyjnego pobieranego przez tramwaj oraz napięcia wejściowego zasilającego pojazd w czasie przejazdu danego odcinka. Układ pomiarowy w całości był zainstalowany na pojeździe trakcyjnym. Schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 2.

Pomiary polegały na synchronicznej rejestracji wielkości napięcia i prądu, które były mierzone za pomocą specjalistycznych przetworników typu LEM. Oprócz rejestracji wielkości elektrycznych, zapisywana była długość przejechanych odcinków drogi i prędkość pojazdu w czasie przejazdu. Dane pomiarowe zapisy-



Rys. 1. Profil trasy



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

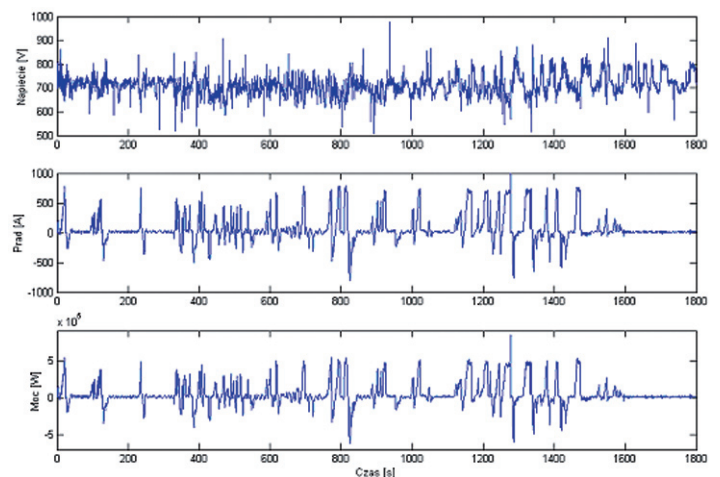
wane były w komputerze pomiarowym zaopatrzonym w kartę przetwornika A/C. Zarejestrowane dane zostały poddane obróbce za pomocą pakietu Matlab i arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel.

## Wyniki pomiarów

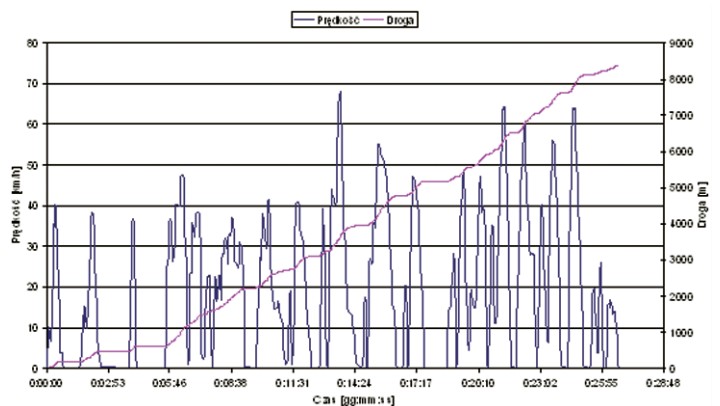
Z przeprowadzonych pomiarów otrzymano wyniki, które zostały przedstawione w formie wykresu. Pokazują one, zarejestrowane w funkcji czasu, przebiegi napięcia i całkowitego prądu trakcyjnego, pobieranego przez pojazd, a także obliczone na podstawie tych wielkości przebiegi pobieranej mocy (rys. 3). Poza wielkościami elektrycznymi, dla wybranego przejazdu pomiarowego, przedstawiono również przebiegi drogi i prędkości w funkcji czasu (rys. 4), które obrazują sposób jazdy (maksymalne prędkości, liczby rozruchów).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczono energię zużytą przez badane pojazdy na danych odcinkach pomiarowych według wzoru:

$$E_c = \sum(U \cdot I \cdot t) \text{ [kWh]}$$



Rys. 3. Przebieg napięcia na pantografie, prądu i mocy w funkcji czasu dla tramwaju NGT6



Rys. 4. Wykres prędkości i drogi w funkcji czasu dla NGT6

gdzie

$U$  – napięcie zarejestrowane,

$I$  – prąd zarejestrowany,

$t$  – czas,

oraz energię jednostkową  $E_j$  [Wh/btkm] uwzględniającą masę pojazdu, obciążenie i długość odcinka, a także energię jednostkową  $E_{jw}$  [kWh/wozokm] uwzględniającą liczbę wozów i długość odcinka. Wielkości jednostkowych zużycia energii  $E_j$  i  $E_{jw}$  badanego tramwaju NGT6 zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1

## Wielkości jednostkowych zużycia energii $E_j$ i $E_{jw}$ badanego tramwaju NGT6

	$E_j$ [Wh/btkm]	$E_{jw}$ [kWh/wozokm]	Uwagi
	71,81	2,19	Trasa nr 1
	80,68	2,45	Trasa nr 1
	56,85	1,73	Trasa nr 2
	50,86	1,54	Trasa nr 2
	82,09	2,65	Trasa nr 3
	90,82	2,96	Trasa nr 3
	95,87	3,23	Trasa nr 3
	63,41	2,04	Trasa nr 4
	68,76	2,24	Trasa nr 4
	79,57	2,68	Trasa nr 5
	84,40	2,84	Trasa nr 6
Średnio	75,01	2,41	

Przeprowadzono również ocenę energochłonności badanego tramwaju metodą obliczeniową [2, 3]. Dla zadanej charakterystyki trakcyjnej badanego pojazdu określono tzw. przejazd teoretyczny, dzięki czemu uzyskano prędkości maksymalne i średnie oraz pozostałe wielkości konieczne do obliczenia jednostkowego zużycia energii. Dla prędkości średniej  $V_{sr} = 35,315$  km/h, prędkości maksymalnej  $V_{max} = 68,84$  km/h, prędkości początkowej hamowania  $V_h = 51,63$  km/h, prędkości końca rozruchu  $V_{sr} = 27$  km/h, średniej odległości międzyprzystankowej  $L_{sr} = 0,58$  km, uwzględniając profil poziomy i pionowy trasy uzyskano następujące wielkości jednostkowego zużycia energii (loco odbierak prądu); dla przejazdu bez uwzględnienia rekuperacji  $j_0 = 100,533$  Wh/btkm i z uwzględnieniem rekuperacji  $j_0 = 71,062$  Wh/btkm.

Dla porównania wyników zużycia energii przez tramwaj NGT6 drugim badanym obiektem był tramwaj typu 105Na z rozruchem rezystorowym. Jest to pojazd produkcji krajowej o budowie jednoczłonowej. Układ napędu stanowią 4 silniki szeregowe prądu stałego o napięciu znamionowym 600/2 V, prądzie godzinowym

157 A i mocy godzinnej 41,5 kW o chłodzeniu obcym. Tramwaj mieści 125 pasażerów na miejscach siedzących i stojących. Masa własna pojazdu wynosi 16,8 t. Otrzymane wyniki dla tego pojazdu przedstawiono na rysunku 5. Dla przebiegów tramwaju typu 105Na, analogicznie jak dla tramwaju NGT6, określono energochłonność jednostkową. Wyniki przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

## Wartości jednostkowego zużycia energii $E_j$ i $E_{jw}$ badanego tramwaju 105Na

	$E_j$ [Wh/btkm]	$E_{jw}$ [kWh/wozokm]	Uwagi
	259,26	4,45	Trasa nr 1
	164,63	2,8	Trasa nr 1
	176,11	3,02	Trasa nr 2
	127,99	2,18	Trasa nr 2
	181,09	3,34	Trasa nr 3
	169,5	3,12	Trasa nr 4
Średnio	179,76	3,15	

W tablicy 3 zamieszczono określone na podstawie pomiarów wartości jednostkowego zużycia energii tramwaju NGT6 z pominięciem zjawiska rekuperacji energii.

Tablica 3

## Wielkości jednostkowego zużycia energii tramwaju NGT6 z pominięciem zjawiska rekuperacji energii

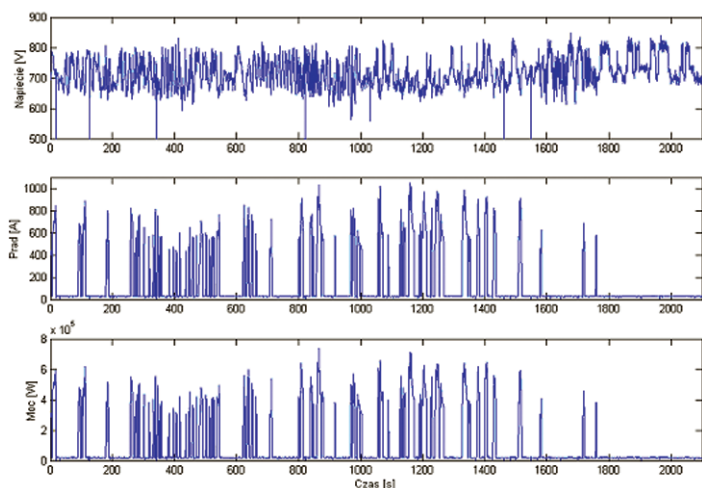
	$E_j$ [Wh/btkm]	$E_{jw}$ [kWh/wozokm]	Uwagi
	100,37	3,05	Trasa nr 1
	103,54	3,14	Trasa nr 1
	98,72	3,01	Trasa nr 2
	88,16	2,68	Trasa nr 2
	121,09	3,91	Trasa nr 3
	128,56	4,19	Trasa nr 3
	122,62	4,13	Trasa nr 3
	107,74	3,47	Trasa nr 4
	112,97	3,68	Trasa nr 4
	106,88	3,60	Trasa nr 5
	109,56	3,69	Trasa nr 6
Średnio	109,11	3,50	

## Ocena uzyskanych wyników

Zużycie energii na cele trakcyjne zależy od wielu czynników, takich jak: profil trasy, odległości międzyprzystankowe i rozmieszczenie przystanków, maksymalna prędkość, obciążenie pojazdu i sposób prowadzenia rozruchu.

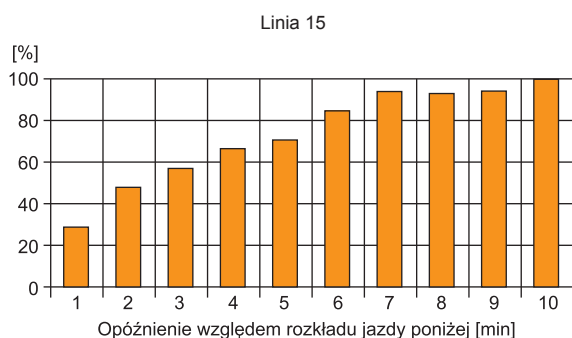
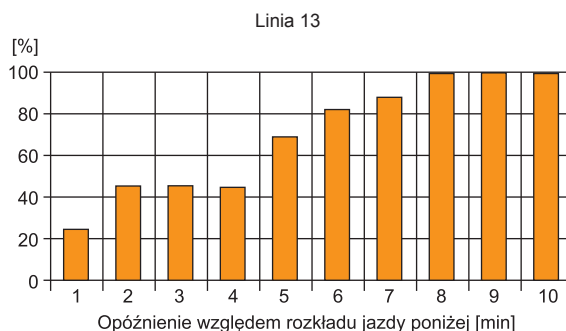
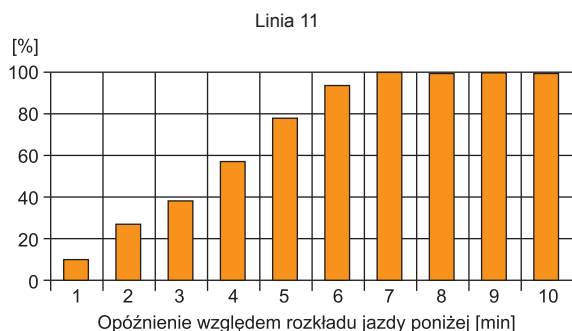
Przeprowadzona, ograniczona liczba przejazdów wykorzystana do pomiarów utrudnia pełną ocenę energochłonności tramwaju NGT6, dlatego w celach porównawczych przeprowadzono również pomiary dla tramwaju klasycznego 105Na. Zużycie energii przez tramwaj NGT6 było mniejsze od 11% do 28% w zależności od jazdy w porównaniu do tramwaju 105Na.

Można sformułować wniosek, że tramwaj NGT6 zużywa średnio ok. 18% mniej energii od tramwaju 105Na, a uwzględniając większą pojemność tego ostatniego można ocenić, że energochłonność tramwaju NGT6 jest mniejsza ok. 26%. Również przy porównywaniu jednostkowego zużycia energii, wyrażonego w kWh/wozokm, wychodzą dużo korzystniejsze wyniki dla tramwaju NGT6 o ok. 23%. Można oczekiwać dalszego ograniczenia



Rys. 5. Przebieg napięcia na pantografie, prądu i mocy w funkcji czasu dla tramwaju 105Na

Dokończenie na s. 72 ➤



Rys. 5. Dystrybuanty opóźnień pociągów tramwajowych na przystanku Katowice Dworzec PKP

stania jezdni przez pozostałych użytkowników. Jest to równocześnie bardzo proste i skuteczne rozwiązanie problemu opóźnień.



➤ Dokończenie ze s. 68

zużycia energii na cele trakcyjne, jeżeli będzie istniała techniczna możliwość wykorzystania odzyskiwanej energii przez inne pojazdy. Wymaga to wprowadzenia pewnych zmian w układzie zasilania i konfiguracji sieci trakcyjnej.

Podstawowy wymóg związany z dążeniem do ograniczenia kosztów zużycia energii na cele trakcyjne w przypadku tramwaju NGT6 jest spełniony. Mianowicie pojazd ten jest bardziej energooszczędny niż dotychczas eksploatowane, oraz posiada możliwość rekuperacji energii. Przeprowadzone przez autorów wstępne oceny zużytej energii (kosztów) rejestrowanej na podstacjach trakcyjnych w odniesieniu do pracy przewozowej wykonywanej przez różne typy tramwajów są zbieżne z prezentowanymi wynikami.



#### Literatura

- [1] Zając W., Popczyk M., Czuchra W., Kowalczewski M.: *Badanie energochłonności wybranych typów tramwajów*. Ekspertyza dla MPK Kraków, 2001 (materiały niepublikowane).
- [2] Kałuża E., Bartodziej G., Ginalski Z.: *Układy zasilania i podstacje trakcyjne*. Skrypt Uczelniany nr 1220 Politechniki Śląskiej, Gliwice 1985.

- [3] Mierzejewski L., Szelaż A., Gatuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1989.
- [4] Gorączko P.: *Ocena energochłonności nowoczesnych tramwajów przekształtnikowych*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Krakowska 2002.
- [5] Czuchra W., Kobielski A., Prusak J.: *Zmienność napięcia w tramwajowej sieci trakcyjnej – próba oceny metodą statystyczną*. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, Kraków-Zakopane, październik 2004.

#### Autorzy

mgr inż. Wojciech Czuchra  
 mgr inż. Janusz Prusak  
 dr inż. Waldemar Zając  
 Politechnika Krakowska  
 Zakład Trakcji i Sterowania Ruchem