

Maciej CZAKAŃSKI

Barbara KULESZ

Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie

## WPLYW WPROWADZENIA TRAMWAJÓW NAPĘDZANYCH SILNIKAMI INDUKCYJNYMI NA WYRÓWNYWANIE SZCZYTOWYCH OBCIĄŻEŃ W PODSTACJACH TRAKCYJNYCH

**Streszczenie.** Celem badań było porównanie wpływu typu napędu tramwaju na obciążenie podstacji trakcyjnych. Analizowano obciążenie szczytowe i obciążenie średnie na danym odcinku zasilania. Przeprowadzono komputerową symulację pracy tramwajów na linii tramwajowej w centrum aglomeracji górnośląskiej. Analizę przeprowadzono dla dwóch przypadków:

- napędu klasycznego z silnikami prądu stałego z rozruchem rezystorowym,
- napędu z silnikami klatkowymi indukcyjnymi prądu przemiennego.

## HOW THE INTRODUCTION OF INDUCTION MOTOR –DRIVEN- TRAM CARS INFLUENCES THE PEAK LOADS OF TRACTION SUBSTATIONS

**Summary.** The aim of the research was to compare the influence of the tram drive type on the traction substation loads. The peak power of the substation and the average power consumption in a given supply section were analyzed. The computer simulation of the trams riding on an existing tram line in the very centre of Silesian agglomeration was made in two different cases:

- the trams equipped with the classical, d.c. traction motors with resistor starting,
- the trams equipped with a.c. induction squirrel-cage motors.

### 1. WPROWADZENIE

Napęd pojazdów trakcyjnych oparty na silnikach indukcyjnych charakteryzuje się niezawodnością i mniejszymi gabarytami, ale przede wszystkim energooszczędnością. Właśnie energooszczędność jest jedną z głównych przyczyn stosowania takich napędów zamiast napędów opartych na silnikach prądu stałego.

Opisane poniżej badania przeprowadzono w celu porównania wpływu zastosowania silników indukcyjnych w napędach tramwajów na obciążenia podstacji trakcyjnych. Autorów interesował zarówno szczytowy pobór mocy, jak i średnie zużycie energii na określonym odcinku zasilania. W ramach badań dokonano symulacji komputerowej przejazdu tramwajów na trasie w centrum aglomeracji śląskiej dla dwóch przypadków:

- tramwaju z klasycznymi silnikami prądu stałego z rozruchem rezystorowym,
- tramwaju z silnikami indukcyjnymi.

Uzyskane wyniki pozwalają na porównanie średnich i maksymalnych prądów pobieranych przez kilka jadących jednocześnie po danym odcinku zasilania tramwajów obu typów.

## 2. OPIS SYMULACJI PRZEBIEGÓW OBCIĄŻENIA ODCINKA ZASILANIA

Aby porównać wpływ wprowadzenia silników indukcyjnych na wyrównywanie szczytowych obciążeń w podstacjach trakcyjnych, przeprowadzono przejazdy teoretyczne tramwajów wyposażonych w oba typy napędu przy jednoczesnym założeniu identycznych warunków ruchowych. Dla celów symulacji komputerowej założono, że napięcie sieci trakcyjnej jest stałe na całej trasie i wynosi 600 V.

Do badań ze względu na dużą popularność przyjęto wóz tramwajowy typu 105N. Zasymulowano jazdę pojedynczego wozu, o masie własnej  $m_w = 18,3t$ , przewożącego 90 pasażerów o masie  $m_p = 6,75 t$ , napędzie na wszystkie 4 osie oraz sprawności przekładni zębatej  $\eta_z = 0,97$ . Tramwaj z silnikami prądu stałego wyposażony jest w silniki L Ta220 [3] połączone szeregowo-równolegle (2 gałęzie równoległe po 2 silniki połączone szeregowo). Rozruch jest przeprowadzany rezystorowo, bez przełączania do pracy szeregowej. W ramach założeń upraszczających zrezygnowano z zastosowania odwzbudzenia. W obliczeniach uwzględniono hamowanie dynamiczne (bez zwrotu energii do sieci).

Tramwaj z silnikami indukcyjnymi jest oparty na konstrukcji mechanicznej tramwaju typu 105N, przy czym zastosowano w nim indukcyjne silniki trakcyjne typu STD200LA o mocy analogicznej jak L Ta220, zasilane z dwu falowników napięcia, których sprawność przyjęto na poziomie  $\eta_{fal} = 0,96$ . Rozruch i hamowanie przeprowadzane są w oparciu o odpowiednie zadawanie częstotliwości i amplitudy napięcia zasilającego. Z analogicznych względów jak dla tramwaju z silnikami prądu stałego, pominięto uwzględnianie prądu hamowania.

Założono, że tramwaje z silnikami prądu stałego i silnikami indukcyjnymi pokonują jednakową trasę z jednakowymi prędkościami wg identycznego rozkładu jazdy. Przejazdem tramwaju z napędem wykorzystującym silniki indukcyjne pokierowano tak, aby odwzorowywał on wiernie zachowanie się tramwaju z napędem klasycznym opartym na silnikach prądu stałego.

Przejazd teoretycznego dokonano w oparciu o parametry istniejącego w rzeczywistości odcinka zasilania. Wybrano odcinek zasilania Katowice Rynek – Katowice Bogucice. Odcinek ten o całkowitej długości 3040 m przebiega przez centrum aglomeracji, częściowo na torowisku wydzielonym, a jego profil jest w przeważającej części płaski. Z wybranej trasy korzysta jednocześnie pięć linii tramwajowych. Nakładanie się na siebie rozkładów jazdy tramwajów tych linii powoduje nierównomierny pobór mocy przez badany odcinek zasilania. Odstępy czasowe między przejazdem kolejnych tramwajów wahają się od 1 do 7 minut. Parametry odcinka trakcyjnego przedstawiono w tabeli 1.

W oparciu o rzeczywisty rozkład jazdy wyznaczono liczbę tramwajów poruszających się po przyjętej trasie oraz dzielące je odległości. Jednocześnie po wybranej trasie w obu kierunkach porusza się 8 tramwajów. Dla potrzeb obliczeń przyjęto identyczne warunki jazdy w danym punkcie trasy dla każdego z tramwajów, co prowadzi do identycznych parametrów rozruchu, wybiegu i hamowania każdego z pojazdów w tym samym punkcie trasy.

Na drodze symulacji komputerowej wyznaczono przebiegi prądów pobieranych przez pojedynczy tramwaj (dla obu rodzajów napędów) w funkcji czasu i drogi podczas przejazdu po przyjętym odcinku. Następnie obliczono sumaryczny pobór prądu z sieci przez wszystkie tramwaje na danym odcinku zasilania. Na tej podstawie oszacowano średnie oraz maksymalne wartości prądu obciążenia podstacji przez badany odcinek zasilania.

Przebieg prądu pobieranego przez pojedynczy tramwaj z napędem opartym na silnikach indukcyjnych uzyskany na drodze symulacji komputerowej zweryfikowano poprzez porównanie go z rzeczywistym przebiegiem zarejestrowanym na tramwaju niskopodłogowym NGd99 wyprodukowanym dla Gdańska w ALSTOM Chorzów S.A. i wyposażonym w system napędowy ONIX. Przebieg ten przedstawiono na rys. 4. Prędkość pod koniec zarejestrowanego i przedstawionego na rys. 4 rozruchu wynosiła 26 km/h. Mimo że tramwaj niskopodłogowy charakteryzuje się innymi parametrami trakcyjnymi niż 105N (masa własna – 30 t, długość 26,6 m, 4 silniki indukcyjne po 120 kW każdy) i rejestracji prądu dokonano dla jednego wózka (2 silniki) podczas jazdy na torze próbnym, widoczne jest podobieństwo przebiegu prądu dla rozruchu rzeczywistego tramwaju (rys. 4) z przebiegiem prądu uzyskany na drodze symulacji komputerowej (rys. 3).

Tabela 1

Wybrane parametry odcinka trakcyjnego Katowice Rynek – Bogucice

| Przystanek początkowy | Długość odcinka [m] | Czas postoju [s] | Rodzaj torowiska |
|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|
| Rynek                 | 680                 | 40               | Wydzielone       |
| Damrota               | 300                 | 90               | Wydzielone       |
| Graniczna             | 320                 | 60               | Wydzielone       |
| Akad. Ekonom.         | 480                 | 30               | Wydzielone       |
| Monte Cassino         | 560                 | 60               | Jezdnia          |
| Bogucice              | 700                 | 30               | Jezdnia          |

### 3. OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

W celu wyznaczenia przebiegów prądów pobieranych przez pojedynczy tramwaj dla napędów z silnikami prądu stałego i z silnikami indukcyjnymi opracowano program OBC\_SZC5.EXE. Program ten pozwala wykonać przejazd analityczny tramwajem 105N napędzanym silnikami prądu stałego po trasie o zadanych parametrach. Wyznacza on w funkcji czasu prąd pobierany przez tramwaj, jego prędkość, przejechaną drogę oraz moc na wale silnika potrzebną do utrzymania aktualnego przyspieszenia. Równoległe, w oparciu o wyliczoną moc na wale silnika wyznaczany jest prąd pobierany przez taki sam tramwaj z napędem opartym na silnikach indukcyjnych.

Rozpoczynając obliczenia program pobiera następujące dane:

- przyspieszenie rozruchu,

- opóźnienie hamowania,
- parametry trasy przejazdu.

Na parametry trasy przejazdu składają się: liczba odcinków międzyprzystankowych, długości poszczególnych odcinków, długości odcinków przed rozpoczęciem hamowania, maksymalne prędkości rozruchu, minimalne prędkości przy jeździe z wybiegu, czasy postojów na przystankach kończących poszczególne odcinki.

Program wykonuje rozruch rezystorowy tramwaju przy zadanym przyspieszeniu rozruchu. Ze wzoru Lebediewa [1] wyznaczane są zasadnicze opory ruchu dla tramwaju przy założeniu zerowych oporów ruchu na wzniesieniach i na łukach. Jednocześnie na podstawie zadanego przyspieszenia wyznaczana jest niezbędna dla jego uzyskania siła dynamiczna [2]. Siła na obwodzie kół napędnych (obliczona poprzez zsumowanie całkowitych oporów ruchu i siły dynamicznej) oraz aktualna prędkość tramwaju pozwalają na wyznaczenie mocy na wale silnika [5],[6]. Jednocześnie na podstawie zadanego przyspieszenia rozruchu i przyjętego interwału czasu wyznaczane są przyrosty: prędkości i drogi. W oparciu o moc na wale silnika wyznacza się moc pobieraną przez silnik. Z niej z kolei wyznacza się aktualnie stosowany opornik rozruchowy i prąd rozruchu.

Po zakończeniu rozruchu rezystorowego, przy prędkości 26 km/h, rozpoczyna się faza jazdy po charakterystyce naturalnej silnika [6]. W tej fazie prąd jest odczytywany bezpośrednio z charakterystyki  $I=f(v)$  dla aktualnych prędkości tramwaju. W oparciu o prąd i prędkość wyznaczane są: siła na obwodzie kół napędnych oraz moc na wale silnika i aktualnie uzyskiwane przyspieszenie.

Jeżeli zostanie osiągnięta maksymalna dopuszczalna prędkość, rozpoczyna się bezprądowa faza wybiegu. Ponieważ siła dynamiczna jest równa oporom ruchu, na jej podstawie wyznaczane jest przyspieszenie, zmiana prędkości oraz przyrost drogi. Jeśli prędkość spada do zadanej minimalnej prędkości przy jeździe z wybiegu, ponownie zostaje załączona procedura rozruchu.

Jeżeli została przekroczona zadana granica rozpoczęcia hamowania, przeprowadzane jest hamowanie dynamiczne z zadanym opóźnieniem hamowania.

Wyliczenia prądu dla tramwaju z silnikami indukcyjnymi prowadzone są równolegle do obliczeń dla tramwaju z napędem z silnikami prądu stałego. Wykorzystują one konieczność uzyskiwania w obu napędach równocześnie takiej samej mocy na wale silnika. Prąd jest wyznaczany z następującej zależności :

$$I_{ind} = \frac{P_{okn} x_{siln}}{\eta_M \eta_{fal} U_S}, \quad (1)$$

gdzie:

- $P_{okn}$  – moc na obwodzie kół napędnych,
- $x_{siln}$  – liczba silników,
- $U_S$  – napięcie znamionowe sieci trakcyjnej,
- $\eta_M$  – sprawność silnika,
- $\eta_{fal}$  – sprawność falownika.

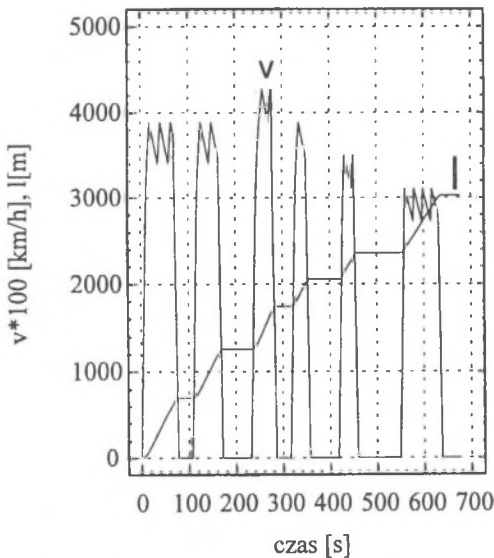
Uzyskane charakterystyki prądów dla obu rodzajów napędu są programowo przesuwane względem siebie w zależności od odległości dzielących tramwaje znajdujące się na badanym odcinku zasilania i sumowane, co pozwala uzyskać przebiegi poborów prądu w skali całego odcinka zasilania.

#### 4. PODSUMOWANIE WYNIKÓW SYMULACJI PRZEBIEGÓW OBCIĄŻENIA ODCINKA ZASILANIA

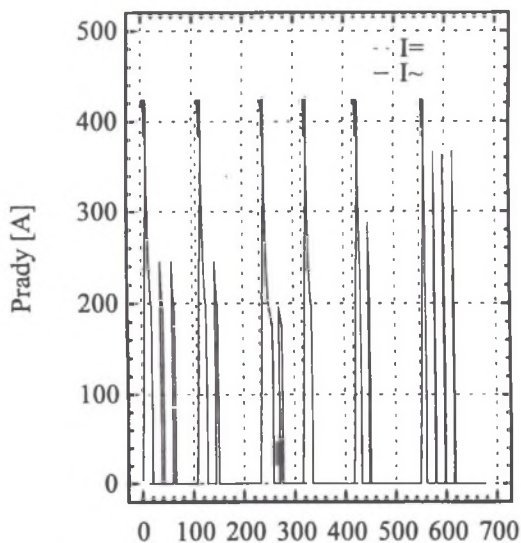
Do badań przyjęto odcinek zasilania Katowice Rynek – Katowice Bogucice omówiony w punkcie 2. Założono, że napięcie na całym odcinku zasilania jest stałe i wynosi 600 V. Założono stałe przyspieszenie podczas rozruchu rezystorowego wynoszące  $0,75 \text{ m/s}^2$ .

Wyznaczono przebiegi prędkości, drogi i prądów pobieranych przez pojedynczy tramwaj (dla obu rodzajów napędu) w funkcji czasu przejazdu tramwaju przez badany odcinek zasilania. Przebieg prędkości i drogi w funkcji czasu przedstawiono na rys. 1. Przebiegi prądów dla obu rodzajów zasilania przedstawiono na rys. 2.

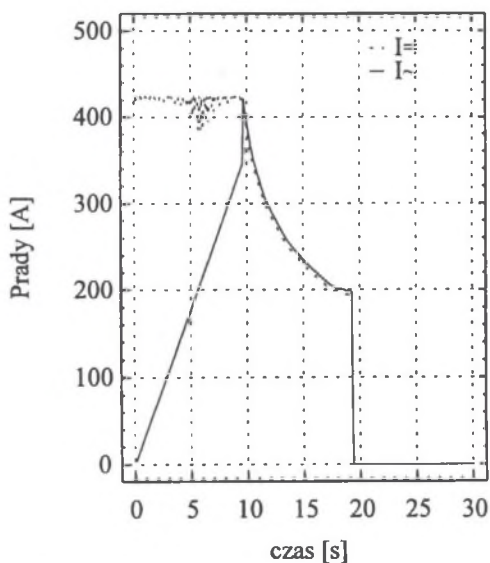
Dla obu rodzajów napędu wyznaczono prądy maksymalne i średnie. Prądy zestawiono w tabeli 2. Średnia prędkość tramwaju wyniosła  $v_{\text{sr}} = 15,6 \text{ km/h}$ , a prędkość maksymalna  $v_{\text{max}} = 43 \text{ km/h}$ .



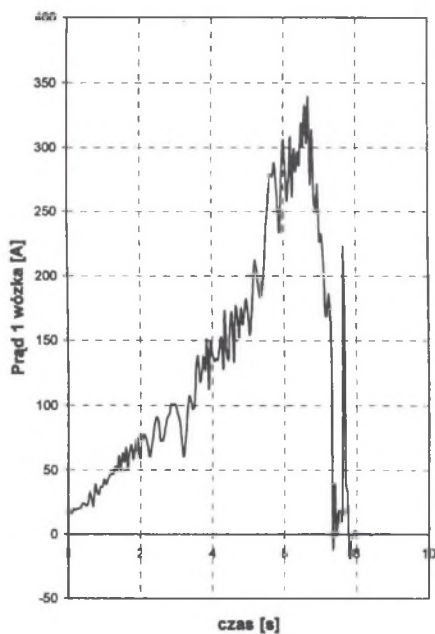
Rys. 1. Prędkość i przebyta droga pojedynczego tramwaju na odcinku Katowice Rynek – Bogucice  
 Fig. 1. Velocity and distance of a single tram vs. time in the supply section Katowice Rynek – Bogucice



Rys.2. Przebieg prądów pobieranych z sieci przez pojedynczy tramwaj na odcinku Katowice Rynek - Bogucice  
 Fig.2. The time courses of the supply current of a single tram in the supply section Katowice Rynek - Bogucice



Rys.3. Pobór prądu z sieci przez pojedynczy tramwaj w jednym cyklu jazdy tramwaju  
 Fig.3. The current load of a single tram during one duty cycle from starting to braking

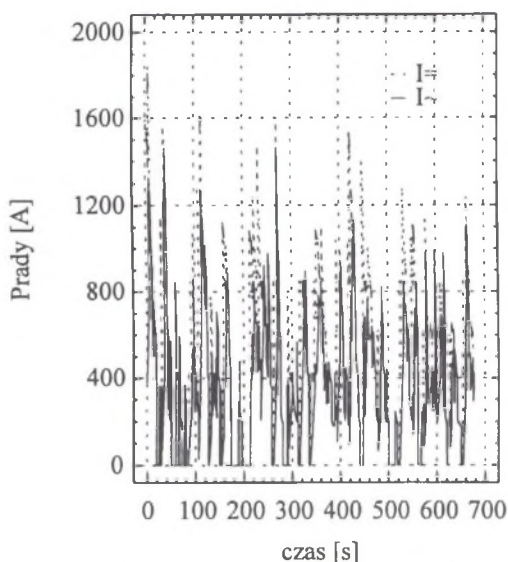


Rys.4. Pobór prądu z sieci przez jeden wózek tramwaju niskopodłogowego z silnikami indukcyjnymi  
 Fig.4. The current load of one bogie of low-floor tram car with induction motor drive

Tabela 2

Prądy maksymalne i średnie pobierane przez pojedynczy tramwaj na badanym odcinku zasilania

|                      | $I_{sr}$ [A] | $I_{max}$ [A] |
|----------------------|--------------|---------------|
| Silnik prądu stałego | 66           | 424           |
| Silnik indukcyjny    | 45           | 427           |

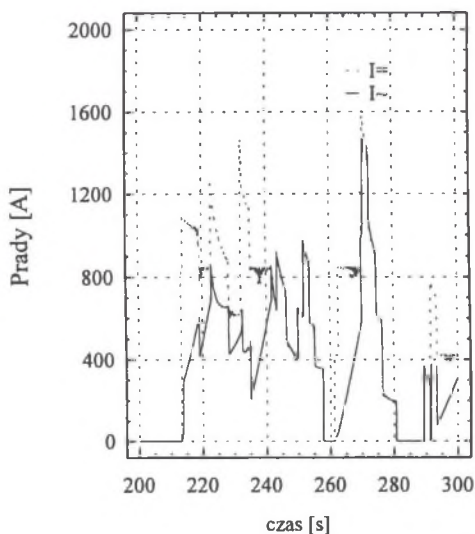


Rys.5. Przebieg obciążeń prądowych na odcinku zasilania Katowice Rynek - Bogucice  
 Fig.5. The time courses of the current loads in the supply section Katowice Rynek - Bogucice

Wyznaczono pobór prądu z sieci jezdnej dla pojedynczego tramwaju w pojedynczym cyklu jazdy przy zastosowaniu napędu z silnikami prądu stałego i przemiennego. Porównanie poboru prądu przedstawiono na rys. 3. Jak z niego widać, przebiegi poboru prądu zasadniczo różnią się jedynie w fazie rozruchu. Prąd pobierany przez napęd z silnikami prądu stałego jest w czasie tegoż rozruchu stały. Jest to spowodowane zastosowaniem oporów rozruchowych. Prąd pobierany przez napęd z silnikami indukcyjnymi narasta liniowo. Prąd pobierany podczas jazdy po charakterystyce naturalnej silnika jest dla obu rodzajów napędu zbliżony.

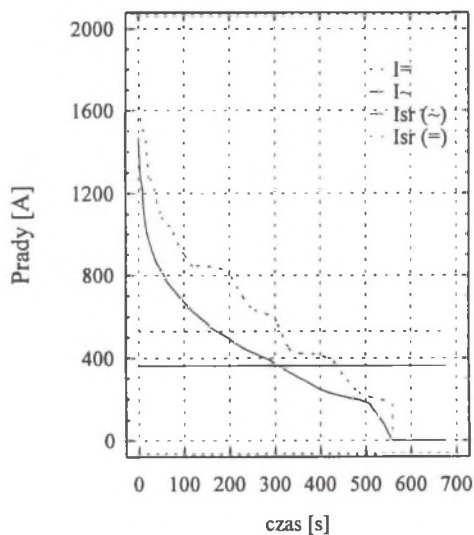
Dla całego odcinka zasilania porównano występujące na nim przebiegi obciążeń podstacji trakcyjnej. Przebiegi dla całego czasu symulacji oraz dla jego fragmentu przedstawiono odpowiednio na rys. 5 i 6. Dla obu rodzajów napędu wyznaczono maksymalne i średnie prądy obciążenia podstacji przez badany odcinek zasilania. Prądy zestawiono w tabeli 3.





Rys.6. Przebieg obciążeń prądowych na odcinku zasilania Katowice Rynek - Bogucice - fragment

Fig.6. The time courses of the current loads in the supply section Katowice Rynek - Bogucice - a chosen part of the course



Rys.7. Uporządkowane wartości prądów pobieranych z sieci na odcinku zasilania Katowice Rynek – Bogucice; dla tramwajów z silnikami prądu stałego i przemiennego. Zaznaczono średnie wartości prądów

Fig.7. The values of the load current of the traction substation in the supply section Katowice Rynek – Bogucice; the values have been classified in the descending order. The courses for the d.c. and a.c. drive-type trams have been given and average current values marked

Tabela 3

Prądy maksymalne i średnie pobierane przez badany odcinek zasilania podczas jazdy po nim 8 tramwajów

|                      | $I_{sr}$ [A] | $I_{max}$ [A] |
|----------------------|--------------|---------------|
| Silnik prądu stałego | 527          | 1845          |
| Silnik indukcyjny    | 363          | 1468          |

Jak widać, na skutek kumulacji rozruchów kilku tramwajów występują okresy czasu, dla których prąd pobierany przez napędy z silnikami prądu stałego przekracza o prawie 100% prąd pobierany przez napędy z silnikami indukcyjnymi. Średni prąd pobierany z podstacji przy napędach prądu przemiennego jest o około 33% mniejszy od obciążenia przy tramwajach z napędem klasycznym.

Prądy pobierane przez odcinek zasilania uporządkowano również wg jego wartości. Porównanie uporządkowanych prądów dla obu typów napędu przedstawiono na rys. 7. Jak z niego widać, czas poboru prądu większego od wartości średniej jest porównywalny dla obu typów napędu i wynosi ok. 50% całkowitego czasu jazdy tramwajów (z uwzględnieniem postojów na przystankach).

## LITERATURA

1. Habarda D.: Mestska hromadna doprava SNTL Nakladatelstvi Technicke Literatury, Praha 1984.
2. Kałuża E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej, Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej Wyd. III, Gliwice 1994.
3. Kochanowski W., Kulesz B.: Obciążenia chwilowe silnika trakcyjnego prądu stałego LTa-220 Tramwaju 105Na. Zeszyty Naukowe ELEKTRYKA nr 139, Gliwice 1994.
4. Podoski J.: Tramwaj szybki - projektowanie i eksploatacja, WKiŁ, Warszawa 1983.
5. Podoski J.: Transport w miastach, WKiŁ, Warszawa 1977.
6. Opis techniczny części elektrycznej tramwaju typu 105N, 105N/2NW, 105N-0123-2 KONSTAL, Chorzów 1975.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Mikulik

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

**Abstract**

The aim of the research was to compare the influence of the tram drive type on the traction substation loads. The authors were interested in two issues: the peak power of the substation and the average power consumption in a given supply section. The computer simulation of the trams riding on an existing tram line in the very centre of Silesian agglomeration was made in two different cases:

- the trams equipped with the classical, d.c. traction motors with resistor starting
- the trams equipped with a.c. induction squirrel-cage motors.

Taking into account a real tram timetable, it has been calculated how many trams ride on the given supply section at the same time. It has been assumed that at a given point of the tram-line every tram behaves in an identical manner, i.e. its driving parameters such as speed, acceleration etc. are the same. Next, the total current supplied to all the trams from the line has been calculated. This has been the basis for estimating the average substation load current and its maximum values. The time periods, during which the maximum loads occur, have been compared. All the simulations have been run with the simplifying assumption that the line voltage is constant. The comparison of the load courses of the traction substation have been shown in Figs. ( bogryn...). The ride of the single tram, equipped with the d.c. and a.c. drive, alternately, has been shown in Fig. (br-pr\_1). The change in the current (power) consumption, arising from the drive modification, is in particular well observed in Fig. (br\_pr\_rh), where the differences in the starting phase of the tram are seen. In the given supply section the time period, when the power required from the substation is greater than the average, is c. 50 per cent of the total time for both drive types (the times of the tram stops has been taken into account) , while the average current, in the case of induction drives, is about 1/3 less than when the d.c. motors are used.