

Stanisław Rawicki, Damian Brodnicki, Karol Chyła, Marcin Nowak, Adam Pluciński  
Politechnika Poznańska, Poznań

## ALGORYTMY ENERGOOSZCZĘDNEJ LIKWIDACJI DUŻYCH OPÓŹNIEŃ W RUCHU POJAZDÓW TRAMWAJOWYCH Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

### ALGORITHMS OF ENERGY-SAVING LIQUIDATION OF LARGE DELAYS IN TRAFFIC OF TRAM VEHICLES WITH INDUCTION MOTORS

**Abstract:** The paper deals with the original methodics of the computation of the energy-saving traffic of tram vehicles with the modern field-oriented control of traction three-phase induction squirrel-cage motors. Possibility of occurrence of various traffic perturbations is here taken into account. After ending disturbances of the city traffic, algorithms of tram rides take into account the procedure of traffic-delay liquidation in accordance with the criterion of the minimum energy use. During the vehicle running with the constant speed, the load of traction induction motors is relatively small; in this case the proper choice of the lower supply voltage enables to increase the motor efficiency. At large time lags in traffic of tram vehicles, ride delays must be liquidated during the run between some succeeding stops within the framework of the optimization procedure.

#### 1. Wstęp

Dla osób zajmujących się problematyką energooszczędnych jazd tramwajów fascynujące jest to, że poprzez odpowiednio dobrane sterowanie silnikami napędowymi pojazdów można uzyskać znaczne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej pobieranej z sieci trakcyjnej [1 – 4, 7]. W skali globalnej, przy wielkiej liczbie pojazdów tramwajowych na świecie, poszukiwanie oszczędności energii jest w obecnych czasach bardzo istotne.

Interesujące jest to, że przy zadanej długości trasy i dla określonego czasu jazdy jest wiele wariantów przejazdu pojazdu tramwajowego. Przy najlepszym zaplanowaniu parametrów rozruchu, etapu jazdy ze stałą prędkością, wybiegu oraz hamowania można zapewnić minimum zużycia energii. W literaturze, np. [1, 3, 4, 7], przyjmowano dotąd w dużym uproszczeniu, że pojazd porusza się po poziomej, prostoliniowej trasie oraz bez zewnętrznych zakłóceń ruchu. Ruch miejski tramwajów z reguły odbywa się jednak przy różnych zakłóceniach, mających często charakter losowy. Profil trasy może posiadać odcinki jazdy w dół lub w górę, a ponadto zdarza się jazda po łuku.

W niniejszym artykule opisano metodę obliczania energooszczędnych przejazdów pojazdów tramwajowych z połowo zorientowanym sterowaniem trójfazowych silników indukcyjnych. Rozpatrzono możliwość występowania dużych zakłóceń ruchu, przy których algorytmy prze-

jazdów tramwajów uwzględniają takie zaplanowanie dalszej jazdy pojazdów, aby po zakończeniu procesów zakłóceń w ruchu doprowadzić do likwidacji powstałego opóźnienia przy minimalnym zużyciu energii elektrycznej. Proces całkowitej likwidacji opóźnienia wymagał przyspieszonej jazdy na kilku kolejnych odcinkach. Dla fazy jazdy ze stałą prędkością obciążenie silników trakcyjnych nie jest duże, a wtedy najlepszy dobór obniżonej wartości napięcia oraz częstotliwości zasilania umożliwia zwiększenie sprawności silników.

#### 2. Modelowanie jazdy tramwaju

Poniżej opisano matematyczne modelowanie pojazdu tramwajowego wyposażonego w trójfazowe silniki indukcyjne zasilane z falowników. Do sterowania indukcyjnych silników trakcyjnych wykorzystano metodę orientacji wektora pola wirnika, np. [5]. Przy sterowaniu wektorowym dokonuje się odpowiednich transformacji, dzięki którym następuje wydzielenie z wektora prądu stojana składowej magnesującej  $i_{xS}$  oraz składowej  $i_{yS}$  tworzącej moment elektromagnetyczny. Przy tych uwarunkowaniach sterowanie strumieniem wirnika i momentem staje się odsprężone. Układ współrzędnych  $x, y$  ( $x$  – oś podłużna,  $y$  – oś poprzeczna) jest związany z zastępczą dwufazową maszyną indukcyjną, przy czym bardzo istotnym założeniem jest przyjęcie współbieżności wirowania

osi  $x$  ze strumieniem skojarzonym wirnika  $\Psi_w$ . Równania modelu matematycznego silnika indukcyjnego w ramach równoważnego, zastępczego układu dwufazowego  $x, y$  są:

$$D\Psi_{xS} = u_x + \omega_k \cdot \Psi_{yS} - R_S i_{xS} \quad (1)$$

$$D\Psi_{yS} = u_y - \omega_k \cdot \Psi_{xS} - R_S i_{yS} \quad (2)$$

$$D\Psi_{xW} = (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{yW} - R_W i_{xW} \quad (3)$$

$$D\Psi_{yW} = -(\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{xW} - R_W i_{yW} \quad (4)$$

$$D\omega = \frac{p}{J}(T - T_h) \quad (5)$$

$$i_{xS} = \lambda(L_W \Psi_{xS} - M \Psi_{xW}) \quad (6)$$

$$i_{yS} = \lambda(L_W \Psi_{yS} - M \Psi_{yW}) \quad (7)$$

$$i_{xW} = \lambda(L_S \Psi_{xW} - M \Psi_{xS}) \quad (8)$$

$$i_{yW} = \lambda(L_S \Psi_{yW} - M \Psi_{yS}) \quad (9)$$

$$\lambda = (L_S L_W - M^2)^{-1} \quad (10)$$

$$T = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_W} (\Psi_{xW} \cdot i_{yS} - \Psi_{yW} \cdot i_{xS}) \quad (11)$$

gdzie  $D$  oznacza operator różniczkowania  $d/dt$ ;  $u_x, u_y$  - napięcia zasilające w zastępczym układzie dwufazowym  $x, y$ ;  $\omega_k$  - prędkość kątowna układu współrzędnych względem nieruchomego stojana;  $\Psi_{xS}, \Psi_{yS}$  oraz  $\Psi_{xW}, \Psi_{yW}$  - strumienie skojarzone uzwojenia stojana oraz uzwojenia wirnika w układzie  $x, y$ ;  $i_{xS}, i_{yS}$  oraz  $i_{xW}, i_{yW}$  - prądy uzwojenia fazowego stojana oraz wirnika w układzie  $x, y$ ;  $\omega$  - elektryczna prędkość kątowna wirnika;  $p$  - liczba par biegunów silnika indukcyjnego;  $J$  - moment bezwładności układu wirującego;  $T$  - moment elektromagnetyczny silnika;  $T_h$  - moment obciążenia;  $R_S, R_W$  - rezystancje uzwojeń fazowych stojana oraz wirnika;  $L_S, L_W, M$  - indukcyjności zastępczej dwufazowej maszyny indukcyjnej. Dla przyjętej metody sterowania oś rzeczywista  $x$  układu współrzędnych orientuje się zgodnie z kierunkiem wektora  $\Psi_w$ , co powoduje, że składowa strumienia  $\Psi_{yW}$  jest równa zero. Pełną dynamikę ruchu pojazdu tramwajowego opisuje następujące równanie różniczkowe:

$$k_m m \frac{dv}{dt} = F_p - W(v) \quad (12)$$

przy czym  $m$  oznacza tutaj masę pojazdu,  $k_m$  to współczynnik mas wirujących,  $v$  - prędkość pojazdu,  $F_p$  - siła pociągowa,  $W(v)$  - opory trakcyjne. Związek między siłą pociagową  $F_p$  i użytecznym momentem silnika  $T_U$  ma następującą postać:

$$F_p = \frac{n_S T_U z \eta}{r} \quad (13)$$

gdzie  $n_S$  - liczba silników napędowych,  $z$  - wielkość przełożenia przekładni mechanicznej,  $\eta$  - sprawność przekładni,  $r$  - promień koła napędowego. Opory ruchu  $W(v)$  określono za pomocą trójmianu kwadratowego na podstawie wzoru Coopera. Energię elektryczną  $En$  pobieraną przez silniki trakcyjne oblicza się przez następujące całkowanie:

$$En = \frac{3}{2} n_S \int_{t1}^{t2} (u_x i_{xS} + u_y i_{yS}) dt \quad (14)$$

Procedurę jazdy tramwaju opartą o kryterium minimalnego zużycia energii elektrycznej wiąże się z planem likwidacji opóźnienia w ruchu, powodowanego przez zakłócenia komunikacyjne.

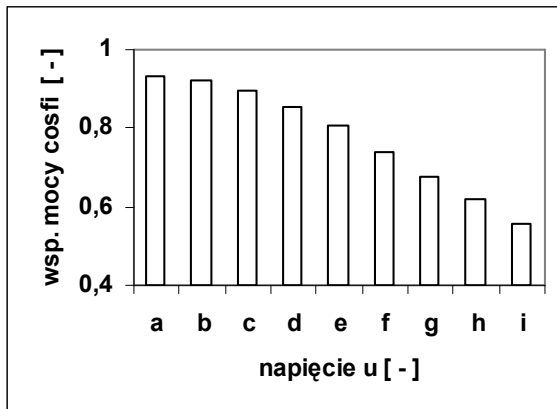
### 3. Analiza wyników obliczeń

Autorzy niniejszego artykułu wykonali wiele obliczeń dla zmodernizowanej wersji tramwaju 105N, który ma cztery identyczne, trakcyjne (zasilane z układów falownikowych) trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe o łącznej mocy równej 160kW. Sieć trakcyjna ma napięcie znamionowe 600V (DC). Dane tramwaju to: całkowita długość: 13,5m, masa własna: 16500kg, obciążenie znamionowe: 8750kg. Trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy ma następujące dane znamionowe: moc 40kW, napięcie 380V (połączenie w gwiazde), częstotliwość 60Hz, prąd: 71,7A, prędkość: 1724obr/min, sprawność 90,8%, współczynnik mocy  $\cos\phi$ : 0,931. Poniżej podano tylko część wyników przeprowadzonych obliczeń dla masy pojazdu równej 22000 kg, co odpowiada liczbie 80 pasażerów (64% znamionowego obciążenia tramwaju).

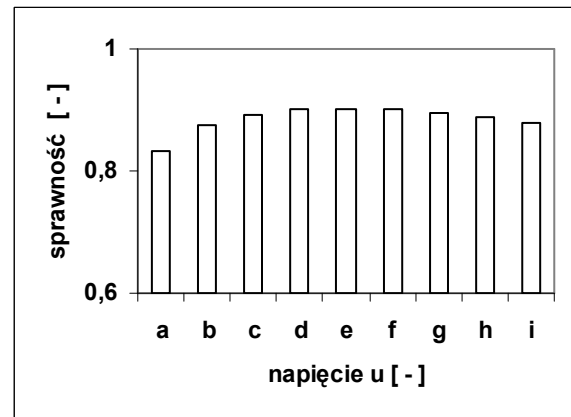
W czasie jazdy tramwaju ze stałą prędkością silniki napędowe pracują w stanie ustalonym; opory trakcyjne nie są duże i dla takiej fazy

przejazdu silniki są obciążone małą mocą, przy której współczynnik mocy  $\cos\phi$  może być niewielki. Obniżenie wartości napięcia zasilającego powoduje, że możliwa jest praca przy takiej samej prędkości i mocy obciążenia, ale dla większej wartości współczynnika mocy  $\cos\phi$  oraz przy większej sprawności  $\eta$  silników. Zachowując zasady połowo zorientowanego sterowania silnika indukcyjnego (orientacja pola wirnika), opracowano algorytm doboru takiej częstotliwości i wartości napięcia zasilającego, aby uzyskać maksymalną sprawność  $\eta$ .

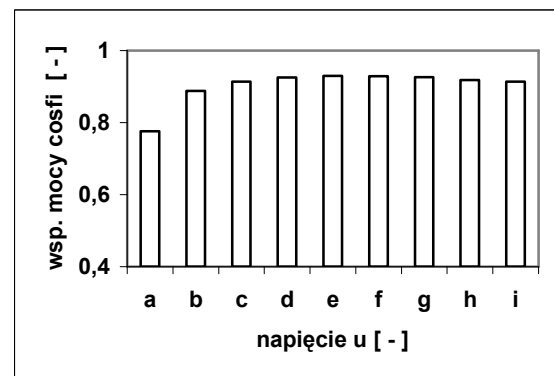
Dla etapu jazdy ze stałą prędkością, na rys. 1-4 podano zależności współczynnika mocy  $\cos\phi$  oraz sprawności silnika w funkcji napięcia zasilającego wyrażonego w jednostkach względnych (przy odniesieniu do napięcia znamionowego). Rysunki 1 i 2 dotyczą małej prędkości tramwaju równej 5m/s, natomiast rysunki 3, 4 ilustrują wyniki dla dużej prędkości wynoszącej 17m/s. Przy prędkości 5m/s (rys. 1, 2) maksymalną sprawność 0,902 uzyskano przy względnym napięciu równym 0,301 oraz częstotliwości zasilania 35,91Hz; dla takiego punktu pracy  $\cos\phi$  wynosił 0,808. Na rys. 3, 4 związanych z dużą prędkością 17m/s, największa sprawność wynosiła 0,927 przy względnej wartości napięcia zasilającego 0,965 oraz częstotliwości 121,1Hz (współczynnik mocy  $\cos\phi$  był tutaj równy 0,918).



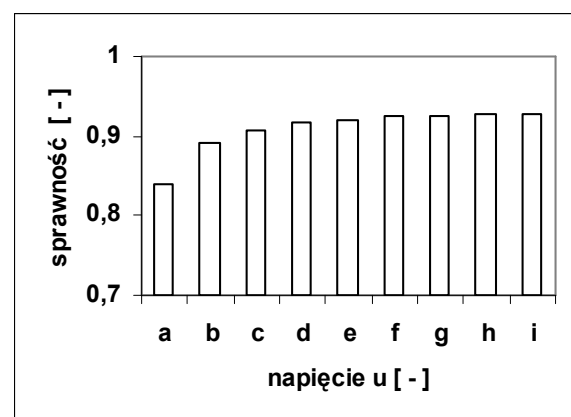
Rys.1. Jazda ze stałą prędkością 5m/s; zależność współczynnika mocy  $\cos\phi$  silnika trakcyjnego od względnej wartości napięcia zasilającego równej: a) 0,170; b) 0,204; c) 0,238; d) 0,272; e) 0,301; f) 0,340; g) 0,373; h) 0,407; i) 0,441



Rys.2. Jazda ze stałą prędkością 5m/s; zależność sprawności silnika trakcyjnego od względnej wartości napięcia zasilającego równej: a) 0,170; b) 0,204; c) 0,238; d) 0,272; e) 0,301; f) 0,340; g) 0,373; h) 0,407; i) 0,441



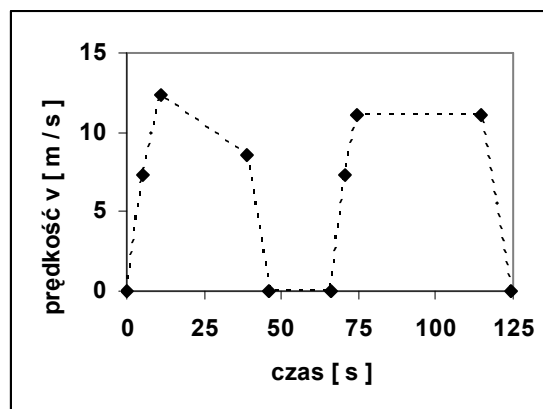
Rys. 3. Jazda ze stałą prędkością 17m/s; zależność współczynnika mocy  $\cos\phi$  silnika trakcyjnego od względnej wartości napięcia zasilającego równej: a) 0,543; b) 0,600; c) 0,657; d) 0,713; e) 0,771; f) 0,829; g) 0,886; h) 0,965; i) 1



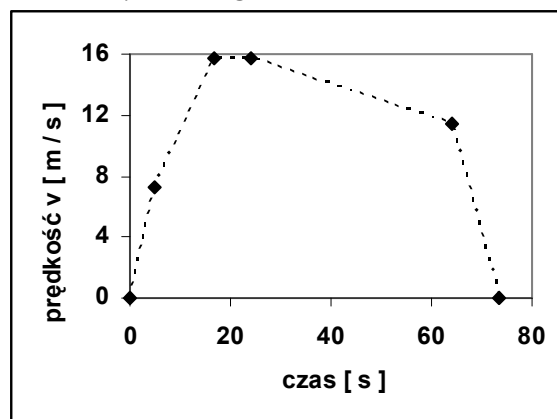
Rys.4. Jazda ze stałą prędkością 17m/s; zależność sprawności silnika trakcyjnego od względnej wartości napięcia zasilającego równej: a) 0,543; b) 0,600; c) 0,657; d) 0,713; e) 0,771; f) 0,829; g) 0,886; h) 0,965; i) 1

Rysunki 5-7 przedstawiają wyniki obliczeń takiego przejazdu tramwaju, gdy wystąpiły duże zakłócenia płynności ruchu i powstało znaczne opóźnienie jazdy. Wewnątrz odcinka I o długości 950m (pierwotnie planowany czas jazdy: 95s) był nieplanowy postój trwający 20s, a ponadto po wymuszonym zatrzymaniu pojazdu tramwajowego, wskutek dalszych komunikacyjnych utrudnień obowiązywało ograniczenie prędkości do 40km/h. Obliczenia wykonywano nie tylko dla odcinków prostych i poziomych, ale również przy złożonych profilach trasy, polegających na jazdach w górę lub w dół; w takich przypadkach opory ruchu przedstawiano w [%] na podstawie metody podanej w literaturze [6].

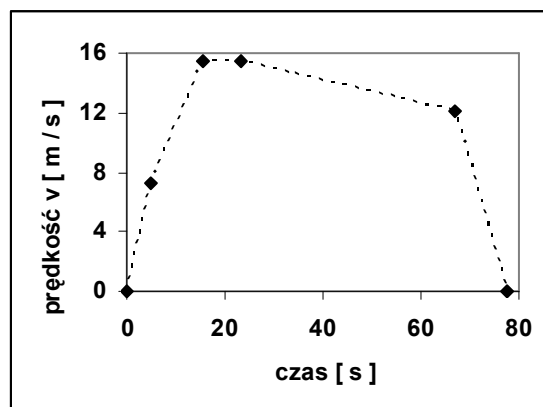
Początkowo tramwaj jechał na odcinku I (rys.5) w oparciu o pierwotny algorytm jazdy energooszczędnej dla ruchu bez zakłóceń. Po czasie 10,70s i przejechaniu 74,8m motorniczy dostrzegł niebezpieczną sytuację i wprowadził tramwaj w fazę wybiegu przez 28,47s na odcinku 296,1m, a potem zatrzymał pojazd w miejscu odległym o 400m od początku trasy, która do tego punktu (segment 1) prowadziła w górę (5‰). Pojazd tramwajowy ruszył po postoju 20s, ale na całym segmencie 2 – długość 550m oraz jazda w dół (-5,5‰) - obowiązywało jednak nieplanowe ograniczenie prędkości do 40km/h. Na pokonanie całej trasy tramwaj potrzebował 124,1s, a więc nastąpiło opóźnienie równe 29,1s w stosunku do obowiązującego rozkładu jazdy. Opracowany został algorytm dalszej jazdy, przy czym optymalizacja uwzględniała zarówno zlikwidowanie opóźnienia 29,1s, jak również kryterium minimalnego zużycia energii. Likwidacja opóźnienia została zaplanowana na dwa następne odcinki o numerach II i III. Odcinek II (prosty, poziomy, w pierwotnym rozkładzie jazdy czas przejazdu: 87s) miał długość 870m, natomiast odcinek III (jazda z góry: - 4‰, początkowo zaplanowany czas: 93s) to długość równa 930m. Przy braku zakłóceń suma odcinków II i III miała być przejechana w ciągu 180s; w celu likwidacji opóźnienia przejazdu muszą być zrealizowane w łącznym czasie 150,9s, co wymaga jazdy z większą prędkością, a więc i zwiększonym zużyciem energii elektrycznej. W procesie optymalizacyjnym były istotne dwa elementy: 1) ustalenie najkorzystniejszego rozkładu sumarycznego czasu 150,9s na czasy jazdy, odpowiadające kolejnym odcinkom II i III,



Rys.5. Nieplanowy postój 20s wewnątrz trasy (odcinek I), a następnie jazda z ograniczeniem prędkości do 40km/h; opóźnienie w ruchu 29,1s likwidowane będzie na 2 następnych odcinkach: II i III; zużycie energii  $E_n = 1,568 \text{ kWh}$



Rys.6. Przyspieszona jazda na odcinku II przy likwidacji opóźnienia powstałego na odcinku I; czas jazdy skrócony z 87s do 73,5s; algorytm przejazdu z minimalnym zużyciem energii  $E_{n\text{min}} = 1,413 \text{ kWh}$



Rys.7. Przyspieszona jazda na odcinku III przy likwidacji opóźnienia na odcinku I; skrócona jazda (z 93s do 77,4s); przejazd z minimalnym zużyciem energii  $E_{n\text{min}}=1,281 \text{ kWh}$

2) ustalenie najkorzystniejszych czasów jazdy dla rozruchu, jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania, które mają obowiązywać na odcinku II oraz III.

Dla jazdy bez odzysku energii algorytmy przejazdu z minimalnym poborem energii (suma dla odcinka II i III):  $E_n = 2,694 \text{ kWh}$  przedstawiają rys. 6, 7; w tym najlepszym wariancie sumaryczny, stały czas 150,9s rozdzielono na kolejne odcinki w następujący sposób: 73,5s (odcinek II), 77,4s (odcinek III). Na odcinku II (rys. 6) zoptymalizowany rozkład czasu 73,5s na poszczególne fazy jazdy to: rozruch: 16,85s, jazda ze stałą prędkością: 7,26s, wybieg: 40,00s, hamowanie: 9,39s; zużycie energii elektrycznej wyniosło tutaj 1,413kWh. Dla następnego odcinka III (rys. 7) najkorzystniejszy, łączny czas 77,4s został rozdzielony w następujący sposób: rozruch: 15,54s, jazda ze stałą prędkością: 7,74s, wybieg: 43,77s, hamowanie: 10,35s; pobrana energia jest równa 1,281kWh.

#### 4. Podsumowanie

Autorzy artykułu opracowali nową metodykę obliczania energooszczędnych przejazdów pojazdów tramwajowych z połowo zorientowanym sterowaniem trakcyjnych, trójfazowych silników indukcyjnych z uwzględnieniem wpływu takich zakłóceń płynności ruchu, które wywołują znaczne opóźnienia w stosunku do rozkładu jazdy. Przy likwidacji dużych opóźnień nowa metoda pozwala na dokładniejsze wyznaczenie algorytmu jazdy pojazdu tramwajowego z minimalnym zużyciem energii elektrycznej, a oszczędności energii mogą wynosić nawet około 30%.

W niniejszej pracy została uwzględniona nie tylko możliwość występowania różnorodnych zakłóceń ruchu, ale również skomplikowanego profilu trasy, obejmującego przypadki jazdy w górę i w dół.

Przy dużych opóźnieniach procedura likwidacji opóźnień musi być rozszerzona na następne odcinki jazdy tramwaju.

Podczas fazy jazdy ze stałą prędkością obciążenie trakcyjnych, trójfazowych silników indukcyjnych nie jest duże i może występować praca maszyny elektrycznej przy małej wartości współczynnika mocy  $\cos\phi$ ; w takich przypadkach właściwy dobór obniżonej wartości napięcia i odpowiedniej częstotliwości układu zasilającego pozwala na zwiększenie sprawności układu napędowego.

Energooszczędne prowadzenie tramwaju może być w pełni zrealizowane tylko poprzez półautomatyczne sterowanie pojazdem. Motorniczy musi zawsze zapewnić bezpieczeństwo ruchu. Jeśli uznaje on, że spełnione są warunki bezpieczeństwa, może włączyć system automatycznego prowadzenia pojazdu tramwajowego z minimalnym zużyciem energii oraz – w miarę możliwości – z przestrzeganiem rozkładu jazdy. Autorzy prowadzą prace nad kompleksowym rozwiązaniem takiej koncepcji.

#### 5. Literatura

- [1]. Frąckowiak J.: *Optymalizacja zużycia energii elektrycznej przez pojazd trakcyjny napędzany silnikami szeregowymi zasilanymi przez czopery*. Materiały V Konf. Międzynarodowej: Nowoczesna Trakcja Elektryczna MET, 2001, Gdańsk.
- [2]. Glia R., Patalas S., Rawicki S., Rzeźnik K.: *Calculations of Energy Saving Traffic of Tram Vehicle Taking Power Losses of Traction Motors into Account*. Mediterranean Conf. on Modelling and Simulation MCMS, 2003, Italy.
- [3]. Kacprzak J.: *Automatyka i sterowanie elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1981, Warszawa.
- [4]. Nawrowski R., Zielińska M.: *Control of traction vehicles of minimum energy use*. Analysis, Control and Design, Vol. 1, 1994, AMSE Press.
- [5]. Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2003, Wrocław.
- [6]. Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J.: *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1980, Warszawa.
- [7]. Zielińska M.: *Modelling of traction vehicle traffic*. Modelling, Measurement and Control, Part B, Vol. 49, No. 2, 1993, AMSE Press.

#### Autorzy

Dr hab. inż. Stanisław Rawicki, prof. PP

mgr inż. Damian Brodnicki

mgr inż. Karol Chyła

mgr inż. Marcin Nowak

mgr inż. Adam Pluciński

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny

ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

E-Mail: stanislaw.rawicki@put.poznan.pl

damian.brodnicki@o2.pl

karol.chyla@gmail.com

mnowak\_PP@wp.pl

adam.plucinski@onet.pl