

Stanisław RAWICKI*
Marcin NOWAK*
Maciej RÓŻAŃSKI*
Wojciech WYCINKA*

ZŁOŻONOŚĆ OBLICZENIOWA ALGORYTMÓW ENERGOOSZCZĘDNYCH PRZEJAZDÓW TRAMWAJU Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI PRZY ZAKŁÓCENIACH RUCHU

W artykule przedstawiono metodę obliczania energooszczędnych przejazdów tramwaju z połowo zorientowanym sterowaniem trakcyjnych, trójfazowych silników indukcyjnych. Uwzględniono występowanie w ruchu miejskim różnych zakłóceń ruchu oraz skomplikowanego profilu trasy. Dynamika jazdy miejskiej prowadzi do szczególnie złożonych algorytmów przejazdów tramwaju, które uwzględniają kryterium minimalnego zużycia energii elektrycznej. Zaproponowane metody obliczeniowe obejmują również procedurę likwidacji opóźnień po ustąpieniu zakłóceń w ruchu przy minimum zużycia energii. Dodatkowo wykazano, że podczas etapu jazdy ze stałą prędkością, gdy obciążenie silników trakcyjnych nie jest duże, odpowiedni dobór obniżonej wartości napięcia zasilającego pozwala na zwiększenie sprawności układu napędowego.

1. WSTĘP

W warunkach miejskich ruch pojazdu tramwajowego realizowany jest często przy różnorodnych zakłóceniach, wywołanych np. lokalnymi ograniczeniami prędkości, losowo zdarzającymi się dodatkowymi postojami i skomplikowanym wpływem systemu sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach. Profil trasy – oprócz fragmentów poziomych i prostoliniowych - może posiadać odcinki jazdy w dół lub w górę, a ponadto zdarza się jazda po łuku. Dynamika jazdy miejskiej prowadzi do bardzo złożonych algorytmów przejazdów tramwaju z minimum zużycia energii.

W artykule przedstawiono metodę obliczania energooszczędnych przejazdów pojazdów tramwajowych z połowo zorientowanym sterowaniem trójfazowych silników indukcyjnych. Uwzględniono możliwość występowania zakłóceń płynności ruchu, a ponadto skomplikowanego profilu trasy, obejmującego przypadki jazdy w górę i w dół oraz wariant jazdy po łuku. Algorytmy przejazdów

* Politechnika Poznańska.

tramwajów uwzględniają takie zaplanowanie dalszej jazdy pojazdów, aby po ustąpieniu zakłóceń w ruchu doprowadzić do likwidacji powstałego opóźnienia przy minimalnym zużyciu energii. Podczas jazdy ze stałą prędkością obciążenie silników trakcyjnych nie jest duże, a wtedy właściwy dobór obniżonej wartości napięcia zasilającego pozwala na zwiększenie sprawności układu napędowego.

2. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU TRAMWAJU

W niniejszym rozdziale przedstawiono matematyczne modelowanie ruchu pojazdu tramwajowego, który wyposażony jest w trójfazowe silniki indukcyjne zasilane z układów falownikowych. Do sterowania silników trakcyjnych wykorzystano metodę orientacji wektora pola wirnika. Przy sterowaniu wektorowym dokonuje się odpowiednich transformacji, w ramach których następuje wydzielenie z wektora prądu stojana składowej magnesującej i_{xS} oraz składowej i_{yS} tworzącej moment elektromagnetyczny; dzięki temu sterowanie strumieniem wirnika i momentem jest odsprężone, np. [2]. Układ współrzędnych x, y (x – oś podłużna, y – oś poprzeczna) jest związany z zastępczą dwufazową maszyną indukcyjną, przy czym założono współbieżność wirowania osi x ze strumieniem skojarzonym wirnika Ψ_W . Równania dynamicznego modelu matematycznego silnika indukcyjnego w ramach równoważnego, zastępczego układu dwufazowego x, y mają następującą postać:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

gdzie D jest operatorem różniczkowania d/dt ; u_x, u_y oznaczają napięcia zasilające w układzie x, y ; ω_k – prędkość kątowna układu współrzędnych względem stojana; Ψ_{xS}, Ψ_{yS} oraz Ψ_{xW}, Ψ_{yW} – strumienie skojarzone uzwojenia stojana oraz wirnika w układzie x, y ; i_{xS}, i_{yS} oraz i_{xW}, i_{yW} – prądy uzwojenia stojana oraz wirnika w

układzie x, y ; ω – elektryczna prędkość kątowna wirnika; p – liczba par biegunów; J – moment bezwładności układu wirującego; T – moment elektromagnetyczny silnika; T_h – moment obciążenia; R_s, R_w – rezystancje stojana oraz wirnika; L_s, L_w, M – indukcyjności zastępczej dwufazowej maszyny indukcyjnej. Ponieważ oś rzeczywista x układu współrzędnych orientuje się zgodnie z kierunkiem wektora Ψ_w , składowa strumienia skojarzonego Ψ_{yw} – związana z osią y – jest równa zero.

W stanie dynamicznym ruch tramwaju opisany jest przez następujące równanie:

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

gdzie m – masa pojazdu; k_m – współczynnik mas wirujących, v – prędkość pojazdu; F_p – siła pociągowa; $W(v)$ – opory trakcyjne.

Między siłą pociągową F_p i użytecznym momentem silnika T_U jest związek:

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

gdzie n_s – liczba silników, z – przełożenie przekładni mechanicznej, η – sprawność przekładni, r – promień koła napędowego. Opory ruchu $W(v)$ określono na podstawie wzoru Coopera. Energię elektryczną En pobieraną przez silniki oblicza się jako całkę z sumy odpowiednich iloczynów wartości napięć i prądów:

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

Tylko metody numeryczne umożliwiają obliczenie minimum zużycia energii w ramach złożonego modelu opisującego ruch pojazdu tramwajowego.

Przy większych perturbacjach w ruchu może być wiele etapów rozruchu, jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania; gdy spóźnienia będą znaczne, to procedura zlikwidowania opóźnienia musi być rozłożona na dalsze odcinki jazdy. W stosunku do artykułu [4] w niniejszym opracowaniu rozszerzono procedurę optymalizacyjną na dowolną liczbę K kolejnych odcinków przejazdu tramwaju. Poszczególne odcinki między przystankami tramwajowymi mają numery: 1, 2, ..., j , ..., K , przy czym dla odcinka z numerem j przez $ns(j)$ oznaczono liczbę rozruchów, przez $ncs(j)$ zapisano ilość faz jazdy ze stałą prędkością, $nc(j)$ to liczba wybiegów oraz $nb(j)$ – ilość etapów hamowania; ponadto $T(j)$ oznacza czas przejazdu całego odcinka j , a $L(j)$ to długość tego odcinka. Spełnione są zależności:

$$\sum_{i=1}^{ns(1)} Ts_i + \sum_{i=1}^{ncs(1)} Tcs_i + \sum_{i=1}^{nc(1)} Tc_i + \sum_{i=1}^{nb(1)} Tb_i = T(1) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{ns(1)} Ls_i + \sum_{i=1}^{ncs(1)} Lcs_i + \sum_{i=1}^{nc(1)} Lc_i + \sum_{i=1}^{nb(1)} Lb_i = L(1) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{ns(2)} Ts_i + \sum_{i=1}^{ncs(2)} Tcs_i + \sum_{i=1}^{nc(2)} Tc_i + \sum_{i=1}^{nb(2)} Tb_i = T(2) \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{ns(2)} Ls_i + \sum_{i=1}^{ncs(2)} Lcs_i + \sum_{i=1}^{nc(2)} Lc_i + \sum_{i=1}^{nb(2)} Lb_i = L(2) \quad (18)$$

• • • • •

$$\sum_{i=1}^{ns(K)} Ts_i + \sum_{i=1}^{ncs(K)} Tcs_i + \sum_{i=1}^{nc(K)} Tc_i + \sum_{i=1}^{nb(K)} Tb_i = T(K) \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^{ns(K)} Ls_i + \sum_{i=1}^{ncs(K)} Lcs_i + \sum_{i=1}^{nc(K)} Lc_i + \sum_{i=1}^{nb(K)} Lb_i = L(K) \quad (20)$$

W wyniku przyspieszonej jazdy po ustaniu zakłóceń ruchu w pewnym punkcie trasy następuje zrównanie drogi i czasu jazdy z pierwotnie planowanym czasem T ruchu dla danej odległości L . Spełnione są więc następujące związki:

$$T(1) + T(2) + \dots + T(K) = T \quad (21)$$

$$L(1) + L(2) + \dots + L(K) = L \quad (22)$$

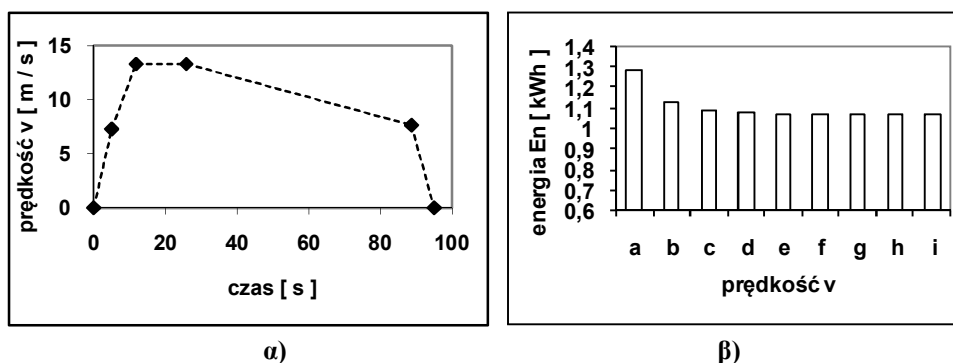
Wybór najkorzystniejszego przebiegu fazy rozruchu, etapu jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania umożliwia minimalizację zużycia energii elektrycznej. Oczywiście długości odcinków: $L(1)$, $L(2)$, ..., $L(K)$ są stałe, ale najkorzystniejsze czasy jazdy: $T(1)$, $T(2)$, ..., $T(K)$, przy spełnieniu warunku (21) są już obliczane tak, aby nastąpił minimalny pobór energii z sieci trakcyjnej.

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla unowocześnionej wersji tramwaju 105N. Pojazd ma zasilane z falowników 4 jednakowe trójfazowe silniki indukcyjne. Każdy silnik ma następujące dane znamionowe: 40kW, napięcie 380V (połączenie w gwiazdę), 60Hz, prąd: 71,7A, 1724obr/min, sprawność 90,8%, $\cos\phi$ 0,931. Napięcie trakcji wynosi 600V (DC). Całkowita długość tramwaju wynosi 13,5m; masa własna to 16500kg, a obciążenie znamionowe 8750kg. Pojazd rozwija prędkość do 72km/h.

W artykule podano wyniki obliczeń dla masy pojazdu równej 22000kg (przy liczbie 80 pasażerów, co stanowi 64% znamionowego obciążenia tramwaju). Dla porównania wielkości zużycia energii wykonano obliczenia dla trzech wariantów, przy czym długość całej trasy była wszędzie równa 950m, a czas przejazdu: 95s:
 wariant A – jazda pojazdu tramwajowego bez zakłóceń na prostym i poziomym odcinku,

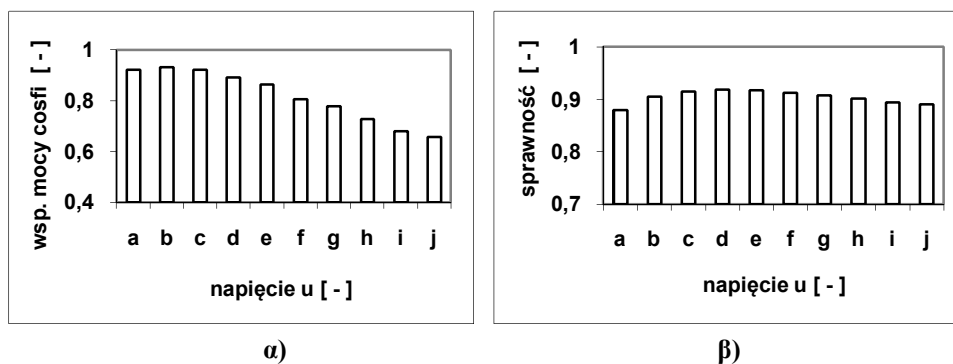
wariant B – jazda przy złożonym profilu trasy i planowym ograniczeniu prędkości na początkowym odcinku; wartości oporów ruchu podczas jazdy po łuku oraz dla jazdy na wzniesieniach podawano w [%] wg [3],
 wariant C – jazda przy złożonym profilu trasy i nieplanowym ograniczeniu prędkości na pewnym odcinku.



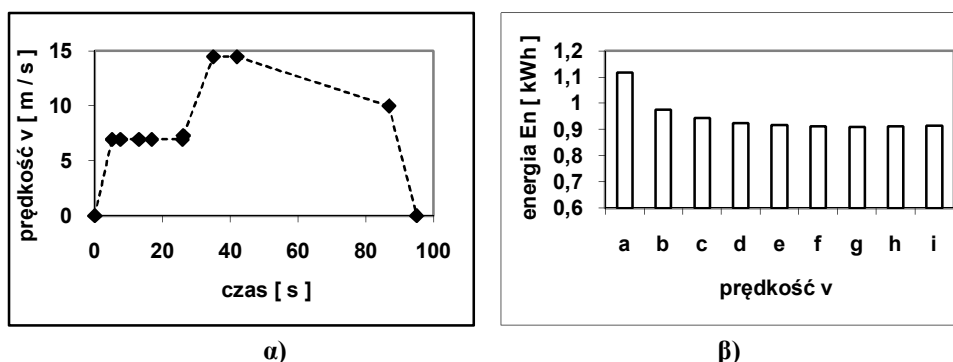
Rys. 1. Wariant A – przejazd bez zakłóceń ruchu na prostym i poziomym odcinku; współczynnik rekuperacji $kr = 0$; część α) algorytm przejazdu z minimalnym zużyciem energii $En_{min} = 1,064\text{kWh}$; część β) zużycie energii elektrycznej w funkcji prędkości [m/s] końcowej rozruchu: a) 10,97; b) 11,41; c) 11,85; d) 12,29; e) 12,73; f) 13,31; g) 13,70; h) 14,10; i) 14,48

Rys. 1 dotyczy jazdy tramwaju na prostym i poziomym odcinku (wariant A) przy braku odzysku energii podczas etapu hamowania. Na rys. 1a występują 4 fazy jazdy: rozruch (dwie części rozruchu trwają łącznie 11,81s na drodze 91,2m), jazda ze stałą prędkością (14,00s, 185,7m), wybieg (62,86s, 649,0m) i hamowanie (6,33s, 24,2m). W pierwszej części rozruchu odbywa się sterowanie silnika indukcyjnego przy znamionowym strumieniu wirnika, natomiast w drugiej części następuje osłabienie pola [2]. Największe zużycie energii wynosi 1,283kWh, a najmniejsze 1,064kWh (można zaoszczędzić do 20,2% energii). Dla przejazdu z największym odzyskiem energii uzyskuje się minimalny pobór energii: 0,903kWh.

Podczas jazdy tramwaju ze stałą prędkością opory trakcyjne są małe i silniki są obciążone małą mocą. Przykładowo dla tramwaju, jadącego na prostej i poziomej trasie ze stałą prędkością 11m/s, przy napięciu znamionowym silniki obciążone są zaledwie 16,4% mocy znamionowej oraz pracują przy małym $\cos\varphi = 0,655$. Obniżenie wartości napięcia sprawia, że możliwa jest praca przy takiej samej prędkości i mocy obciążenia, ale przy większym współczynniku mocy $\cos\varphi$ oraz większej sprawności η . Rys. 2 przedstawia zależności współczynnika mocy $\cos\varphi$ oraz sprawności silnika w funkcji względnego napięcia zasilającego (przy odniesieniu do napięcia znamionowego). Maksymalną sprawność: 0,918 uzyskano przy napięciu wynoszącym w jednostkach względnych 0,610 i przy częstotliwości zasilania 78,52Hz; $\cos\varphi = 0,891$.



Rys. 2. Jazda ze stałą prędkością 11 m/s; dla silnika trakcyjnego w funkcji względnej wartości napięcia zasilającego równej: a) 0,373; b) 0,446; c) 0,521; d) 0,610; e) 0,669; f) 0,775; g) 0,818; h) 0,892; i) 0,966; j) 1, podane są zależności: część α) współczynnika mocy $\cos\phi$, część β) sprawności

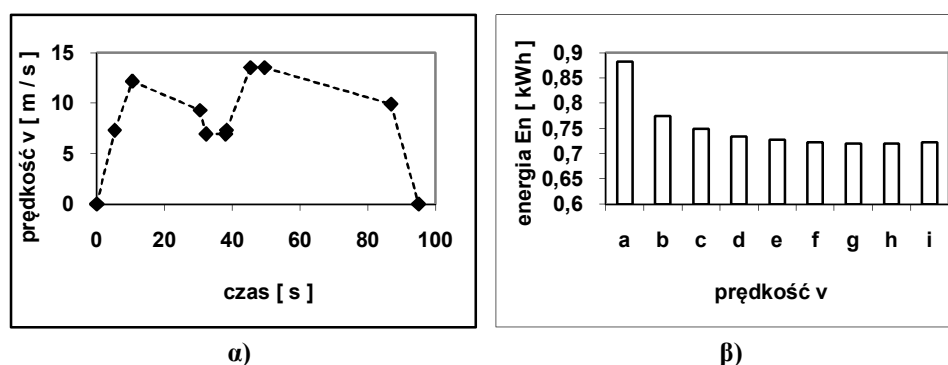


Rys. 3. Wariant B – złożony profil trasy i na jej początku planowe ograniczenie prędkości do 25km/h; współczynnik $kr = 0$: część α) algorytm przejazdu przy minimum zużycia energii $E_{nmin}=1,425\text{kWh}$, część β) dla odcinka 5 (788m) zużycie energii w funkcji prędkości [m/s] końcowej rozruchu: a) 12,54; b) 12,86; c) 13,17; d) 13,49; e) 13,80; f) 14,12; g) 14,45; h) 14,77; i) 15,06

W wariantcie B na kolejnych odcinkach trasy są następujące jazdy: odcinek 1 (35m): prosty, w górę (wzniesienie 8‰); odcinek 2 (38m): poziomy, po łuku o promieniu 50m; odcinek 3 (26m): prosty i poziomy; odcinek 4 (63m): poziomy, po łuku o promieniu 40m; odcinek 5 (788m): prosty i poziomy. Suma odcinków 1-5 daje długość 950m, a łączny czas jazdy to 95s – tak jak dla każdego wariantu. Część trasy obejmująca cztery początkowe odcinki wiąże się z ograniczoną widocznością (łuki, jazda w górę) i obowiązuje tutaj planowe ograniczenie prędkości do wartości 25km/h.

Dla $kr = 0$ (rys. 3). uzyskano najmniejsze zużycie energii pobieranej z sieci równe 1,425kWh (wzrost o 33,9% w stosunku do wariantu A z bezkolizyjną, prostą i poziomą trasą). Dla $kr = 1$ możliwe jest uzyskanie minimalnego poboru energii: 1,159kWh (wzrost o 28,3% w stosunku do wariantu A przy wsp. $kr = 1$).

Rys. 3β podaje wyniki optymalizacji przejazdu odcinka 5 w wariantcie B. Dla odcinka 5 ($kr = 0$) największe zużycie energii wynosi 1,117kWh, a najmniejsze 0,910kWh (można oszczędzić do 22,7% energii). Gdy $kr = 1$, maksymalny pobór energii to 0,704kWh, a minimalny: 0,644kWh (oszczędności dochodzą do 9,3%).



Rys. 4. Wariant C – nieplanowe ograniczenie prędkości na pewnym odcinku wewnątrz trasy; współczynnik rekuperacji $kr = 0$: część α) algorytm przejazdu z minimalnym zużyciem energii $E_{nmin} = 1,521$ kWh na całej trasie, część β) dla jazdy optymalizowanej na długości 609,9m po ustąpieniu zakłóceń: zużycie energii w funkcji prędkości [m/s] końcowej rozruchu: a) 11,93; b) 12,18; c) 12,42; d) 12,67; e) 12,91; f) 13,16; g) 13,40; h) 13,53; i) 13,89

W wariantcie C (rys. 4) występuje nieplanowe ograniczenie prędkości na wewnętrznym odcinku trasy. Po ruszeniu tramwaju z przystanku miała miejsce jazda w górę na długości 300,1 m (opór wzniesienia 6‰), a potem trasa była prosta i pozioma. Początkowo pojazd poruszał się zgodnie z pierwotnym algorytmem jazdy energooszczędnej. Po czasie 10,49 s i przejechaniu 71,9 m motorniczy zauważył niebezpieczeństwo w pobliżu torów tramwajowych i wybrał wprawdzie fazę wybiegu, a potem hamowanie do 6,94 m/s. Z prędkością 6,94 m/s (25km/h) tramwaj przejechał 40 m, po czym ustąpiły zakłócenia ruchu. Dla pozostałej części trasy o długości 609,9 m wykonano nowe obliczenia jazdy energooszczędnej z likwidowaniem opóźnienia spowodowanego zakłóceniem płynności jazdy. Przy braku rekuperacji (współczynnik $kr=0$) otrzymano minimalne zużycie energii na całej trasie równe 1,521 kWh (wzrost o 43% w porównaniu z wariantem A). Dla przejazdu ze wsp. rekuperacji $kr=1$ zminimalizowany pobór energii jest równy 1,163 kWh (wzrost o 28,8% względem wariantu A i dla wsp. $kr = 1$).

Rys. 4β przedstawia wybrane wyniki obliczeń uzyskane podczas optymalizacji przejazdu na odcinku 609,9 m po ustąpieniu zakłóceń ruchu. Dla $kr=0$ maksymalne zużycie energii elektrycznej wynosi 0,882 kWh, a najmniejsze 0,720 kWh (możliwe jest zaoszczędzenie do 22,5% energii). Jeżeli wsp. rekuperacji $kr = 1$, to maksymalna pobrana energia wynosiła 0,508 kWh, a minimalna: 0,459 kWh (różnica 10,7%).

4. WNIOSKI

W artykule opisano nową metodykę obliczania energooszczędnych przejazdów pojazdów tramwajowych z silnikami indukcyjnymi. Została uwzględniona nie tylko możliwość występowania różnorodnych zakłóceń ruchu, ale również skomplikowanego profilu trasy, obejmującego przypadki jazdy w górę i w dół oraz wariant jazdy po łuku. Pozwala to na dokładniejsze wyznaczenie algorytmu jazdy pojazdu tramwajowego, a oszczędności energii mogą wynosić nawet około 30%.

Nowe algorytmy umożliwiają opracowanie takiego przejazdu tramwaju, aby z chwilą zakończenia zakłóceń w ruchu zlikwidować powstałe opóźnienia przy minimalnym zużyciu energii. Przy dużych opóźnieniach procedura likwidacji opóźnienia musi być rozszerzona na następne odcinki jazdy tramwaju.

Wykazano również, że podczas fazy jazdy ze stałą prędkością właściwy dobór obniżonej wartości napięcia oraz odpowiedniej częstotliwości układu zasilającego pozwala na zwiększenie sprawności układu napędowego.

LITERATURA

- [1] Frąckowiak J., Metoda obliczania jazd energooszczędnych pojazdu tramwajowego napędzanego trójfazowymi silnikami indukcyjnymi, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 1995.
- [2] Orłowska-Kowalska T., Bezczytnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [3] Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J., Zasady trakcji elektrycznej, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1980.
- [4] Rawicki S., Semi-automatic control of tram vehicle with intent to attain minimum electric energy use, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 85, nr 7, 159 – 162, 2009.
- [5] Zielińska M., Racjonalizacja zużycia energii w ruchu miejskim elektrycznych szynowych pojazdów trakcyjnych, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 1993.

CALCULATION COMPLEXITY OF ALGORITHMS OF ENERGY-SAVING TRAFFIC OF TRAM WITH INDUCTION MOTORS AT RIDE DISTURBANCES

The paper presents the method of the calculation of the energy-saving traffic of tram vehicle with field-oriented control of traction three-phase induction motors. Possibility of occurrence of various traffic disturbances and complicated route profile is taken into consideration. After ending disturbances of the city traffic, algorithms of tram rides take into account the procedure of traffic-delay liquidation according to the criterion of the minimum energy consumption. During the phase of the running with the constant speed, the load of traction motors is small; in this case the suitable choice of the lower supply voltage makes possible enlargement of the driving system efficiency.