

Stanisław Rawicki
Politechnika Poznańska, Poznań

NOWOCZESNY SYSTEM STEROWANIA POJAZDU TRAMWAJOWEGO PRZY MINIMUM ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

MODERN SYSTEM OF CONTROL OF TRAM VEHICLE AT MINIMUM ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION

Abstract: The paper deals with the tram vehicle control according to the criterion of the minimum use of the electric energy. The calculations and investigations show that for the given interstop distance and the ride time (the given time-table, the same average speed), the different types of the tram traffic are possible. The optimization of the tram vehicle run consists in determination of duration of the starting phase, the running with the constant speed, the coasting stage and the braking phase in order to attain the minimum electric energy use. Within the framework of the tram traffic in the city conditions, various disturbances can appear. In this paper, the influence of the local and global limitations of the vehicle speed on the values of the energy consumption is analysed. The local velocity reductions can appear both in the initial part of the ride and inside the interstop traffic. An application of power electronics devices makes possible the realization of the recuperation of the electric energy during the tram vehicle braking. The paper deals also with comparison of the values of the energy consumption at various disturbances of the tram traffic and for two different cases, when the energy recovery during the braking exists or doesn't occur. For every type of the tram ride, the duration of the individual phases of the traffic is calculated with the aim of achievement the minimum electric energy use. The suitable energy optimum control of the tram vehicle at various perturbations of the city traffic can ensure the electric energy savings equal to even 30 %.

1. Wstęp

Dla określonej długości trasy tramwaju oraz danego czasu jazdy, a więc dla jednakowej wartości prędkości średniej, istnieje dużo sposobów zrealizowania przejazdu pojazdu tramwajowego. Przez odpowiednie planowanie przebiegu etapu rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania można uzyskać minimalizację zużycia energii elektrycznej.

W Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej, np. [1, 2, 8, 10], oraz w innych ośrodkach prowadzone są badania, mające na celu wyznaczenie algorytmów energooszczędnego przejazdu pojazdu tramwajowego wyposażonego w silniki napędowe prądu stałego lub trójfazowe silniki indukcyjne. W przypadku tramwajów przyjęto idealizujące założenie, że pojazd porusza się po poziomym i prostoliniowym odcinku bez zakłóceń ruchu. W warunkach miejskich ruch pojazdu tramwajowego realizowany jest często przy różnorodnych zakłóceniach, wywołanych np. globalnymi lub lokalnymi ograniczeniami prędkości, nieprzewidzianymi dodatkowymi postojami, zmianami napięcia sieci trakcyjnej. Z tego powodu w niniejszym artykule zaproponowano nową

metodę polegającą na wykorzystaniu takiego algorytmu sterowania dla pokładowego komputera pojazdu, aby istniała możliwość określenia nowych parametrów dalszej jazdy tramwaju po pojawieniu się różnorodnych zakłóceń lub zmian różnych parametrów jazdy oraz przy spełnieniu kryterium minimalnej wartości zużycia energii elektrycznej. W ramach takiej strategii systemowej niezbędne jest półautomatyczne prowadzenie tramwaju, w ramach którego możliwe jest albo automatyczne, komputerowo wspomagane sterowanie pojazdu tramwajowego z minimalizacją ilości zużywanej energii elektrycznej, albo kierowanie tramwaju przez człowieka. Ze względu na bezpieczeństwo ruchu nadrzędną rolę ma zawsze motornicz, który na podstawie ciągłej obserwacji warunków ruchu może w każdej chwili zmieniać dowolnie warunki i parametry jazdy. W sposób ciągły mierzone są podczas jazdy: czas, prędkość, przebyta droga, napięcie sieci trakcyjnej, a pod koniec postoju tramwaju również masa pojazdu. Dynamiczny charakter oprogramowania komputera umożliwia ciągłe aktualizowanie algorytmu dalszej jazdy energooszczędnej, zwłaszcza po wystąpieniu zakłócenia ruchu, co

jest bardzo korzystne od momentu, gdy motor-
niczy przekazuje sterowanie tramwaju wspoma-
ganym komputerowo układom automatyki.

2. Matematyczne modelowanie ruchu po- jazdu tramwajowego

W niniejszym artykule rozpatruje się pojazd
tramwajowy wyposażony w napędowe silniki
szeregowe prądu stałego, które zasilane są z
układu przekształtnikowego w postaci czope-
rów. Etap rozruchu złożony jest z następują-
cych trzech części: rozruch przy stałej, dużej
wartości prądu, okres osłabiania wzbudzenia
silnika (przy pełnym napięciu sieci), wzrost
prędkości pojazdu (w trzeciej części rozruchu)
przy pełnym napięciu sieci i stałej wartości
współczynnika osłabienia wzbudzenia. Ruch
pojazdu o masie m opisany jest przez następu-
jące równanie:

$$k_w m D v = F_p - W(v) \quad (1)$$

gdzie:

k_w – współczynnik mas wirujących,

D – symbol różniczkowania d/dt ,

v – prędkość pojazdu,

F_p – siła pociągowa,

$W(v)$ – opory traktacji aproksymowane przez
funkcję kwadratową za pomocą wzoru Coopera.
Prędkość tramwaju jest powiązana z prędkością
kątową ω silników w następujący sposób:

$$v = \omega r / z \quad (2)$$

gdzie:

r – promień koła napędowego,

z – przełożenie przekładni mechanicznej.

Związek między siłą napędową i momentem
użytecznym silnika M_1 ma następującą postać:

$$F_p = n_s M_1 z \eta / r \quad (3)$$

gdzie:

n_s – liczba silników napędowych,

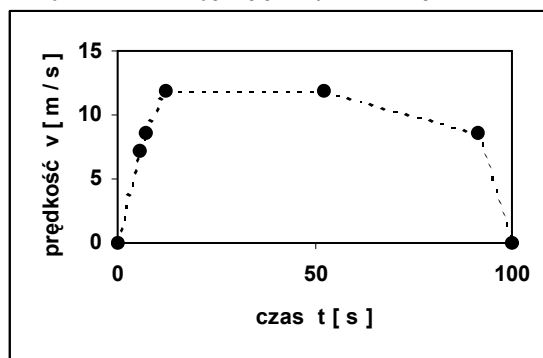
η – sprawność przekładni mechanicznej.

Prąd wzbudzenia i strumień magnetyczny są
powiązane w ramach charakterystyki magne-
sowania. Wartość momentu użytecznego na
wale otrzymuje się po obliczeniu różnicy mo-
mentu elektromagnetycznego silników, mo-
mentu strat mechanicznych oraz momentu strat
w żelazie. Energię elektryczną E_n pobieraną
przez pojazd tramwajowy oblicza się poprzez
całkowanie iloczynu napięcia zasilającego U
silnika, prądu I oraz liczby silników. W wyniku
występowania wielu nieliniowości, tylko me-
tody numeryczne umożliwiają obliczenie mini-
mum zużycia energii elektrycznej w ramach

matematycznego modelu opisującego ruch po-
jazdu tramwajowego.

3. Przykłady obliczeń

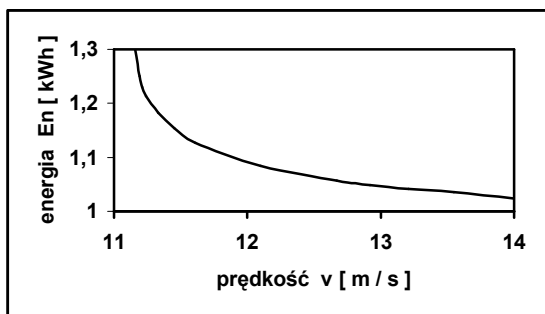
Obliczenia zostały wykonane dla zmodernizo-
wanej wersji tramwaju typu 105N, zawierają-
cego czopery zasilające 4 jednakowe silniki
szeregowe prądu stałego o łącznej mocy
160 kW. W związku z koniecznymi ogranicze-
niami tylko część uzyskanych wyników zosta-
nie przedstawiona w tym artykule. Rys. 1-9
dotyczą przejazdu tramwaju na trasie 1000 m w
czasie 100 s oraz dla masy pojazdu równej
22000 kg. Taka masa odpowiada obciążeniu
pojazdu przy liczbie pasażerów wynoszącej 80,
która stanowi 64% znamionowego obciążenia
tramwaju, odpowiadającego liczbie 125 pasaże-
rów o średniej masie 70 kg. Aby umożliwić
określenie wzrostu zużycia energii elektrycznej
podczas ruchu pojazdu tramwajowego przy wy-
stępowaniu różnorodnych zakłóceń ruchu, na
rys.1-3 zamieszczono przykłady obliczeń doty-
czących bezkolizyjnej jazdy tramwaju.



Rys. 1 Wartości prędkości granicznych v (punkty
na wykresie) dla kolejnych faz jazdy w funkcji
czasu t dla przykładowego przejazdu tramwaju

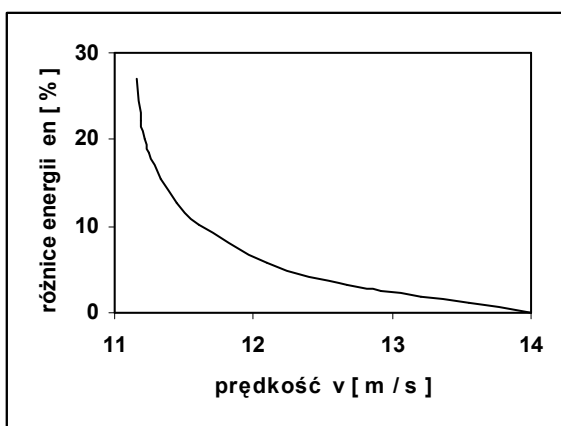
Rys. 1 dotyczy najbardziej ogólnego przypadku
ruchu pojazdu tramwajowego, obejmującego 4
fazy jazdy: rozruch, jazdę ze stałą prędkością,
wybieg i hamowanie, przy czym wartości prę-
dkości granicznych dla kolejnych faz jazdy są
oznaczone za pomocą punktów. W takim przy-
padku wielkość zużycia energii elektrycznej ma
wartość pośrednią pomiędzy najlepszym i naj-
gorszym wariantem przejazdu tramwaju. Ener-
gooszczędny ruch pojazdu na odcinku pomię-
dzy dwoma sąsiednimi przystankami ma miej-
sce wówczas, gdy najdłuższa jest faza wybiegu
oraz nie występuje etap jazdy ze stałą prędko-
ścią. Najbardziej energochłonna jazda dotyczy
takiego przypadku, gdy w ogóle nie ma wy-

biegu, natomiast faza jazdy ze stałą prędkością jest najdłuższa.



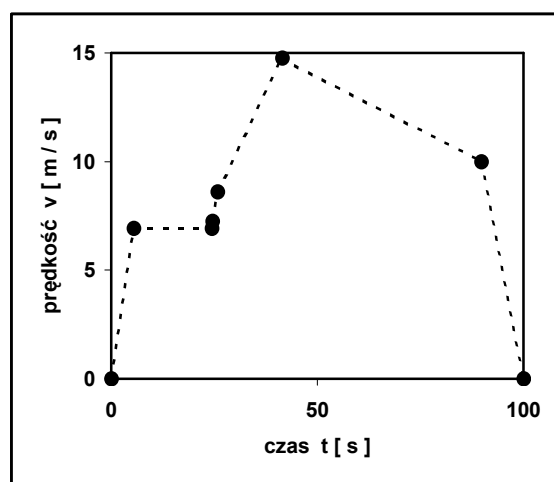
Rys.2. Wartość całkowitej energii elektrycznej E_n w funkcji prędkości końcowej v w rozruchu

Rys.2 dotyczy całkowitej energii elektrycznej pobieranej przez trakcyjne silniki napędowe, przy czym energia jest podana w funkcji prędkości końcowej rozruchu v . Dla minimalnej prędkości v zużycie energii wynosi 1,3 kWh i nie występuje faza wybiegu, natomiast dla największej prędkości końcowej rozruchu uzyskuje się minimalny pobór energii elektrycznej równy 1,024 kWh. Rys. 3 przedstawia procentowy wzrost zużycia energii w odniesieniu do energooszczędnego ruchu pojazdu tramwajowego z najdłuższym wybiegiem. Przy braku etapu wybiegu dla jazdy energochłonnej następuje wzrost zużycia energii o 27 %. Takie wartości liczbowe występują przy braku odzysku energii podczas hamowania tramwaju. Dodatkowe obliczenia pokazały, że jeżeli ma miejsce pełna rekuperacja energii w czasie hamowania, to największe zużycie energii wynosi 0,982 kWh, natomiast minimum energii elektrycznej jest równe 0,87 kWh dla jazdy z najdłuższym wybiegiem.



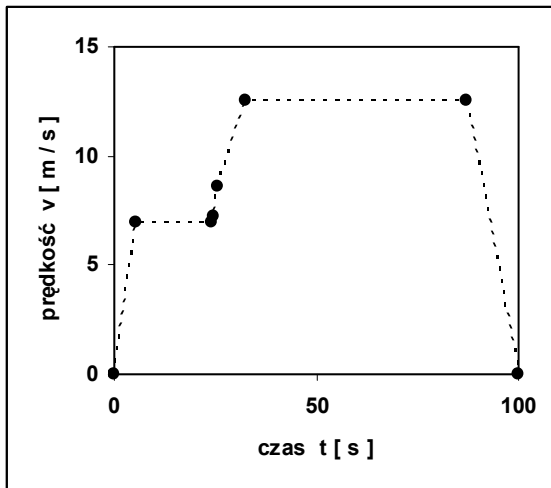
Rys.3. Procentowy wzrost zużycia energii e_n w odniesieniu do energooszczędnego ruchu tramwaju w funkcji prędkości końcowej v w rozruchu

Rys.4 jest związany z ruchem pojazdu tramwajowego przy ograniczeniu prędkości do wartości 25 km/h na początkowym odcinku drogi o długości 150 m. Po przejechaniu przez pojazd tramwajowy dystansu 150 m, po którym kończy się zakłócenie ruchu związane z nieplanowym ograniczeniem prędkości, komputer pokładowy oblicza nowy algorytm dalszej jazdy energooszczędnej, w ramach której wybieg realizowany jest na najdłuższym dystansie równym tutaj 591 m.



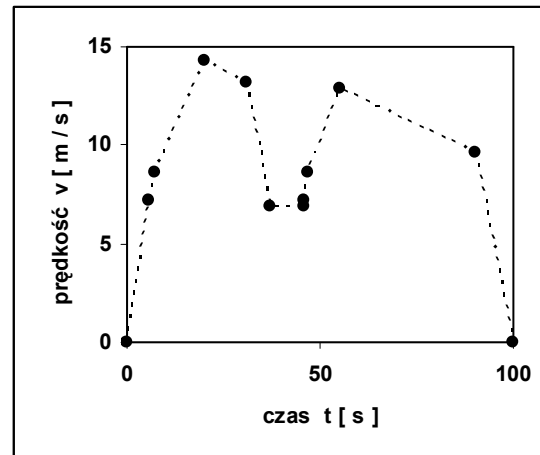
Rys.4. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energooszczędnej przy ograniczeniu prędkości na początku trasy

Jeżeli brak jest fazy wybiegu (rys.5), a jazda ze stałą prędkością odbywa się na najdłuższej drodze równej w tym przypadku 684m, to następuje wzrost zużycia energii o 21 % w porównaniu z jazdą energooszczędną dla przypadku, gdy nie ma odzysku energii podczas hamowania; gdy ma miejsce rekuperacja energii elektrycznej, to przyrost pobieranej energii wynosi 11,3 %. Powolna jazda na początku trasy, wywołana przez zakłócenie ruchu drogowego, powoduje zwiększenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu z bezkolizyjną jazdą tramwaju. Biorąc pod uwagę tzw. energooszczędne przejazdy przy najdłuższym etapie wybiegu, energia elektryczna dla całej trasy między kolejnymi przystankami, zużywana podczas jazdy z początkowym ograniczeniem prędkości, jest o 16,9 % większa, jeżeli nie ma odzysku energii, natomiast o 8,2 %, jeżeli ma miejsce rekuperacja energii podczas hamowania.



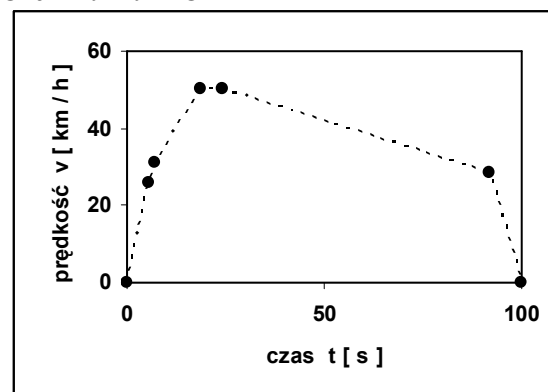
Rys.5. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energochłonnej przy ograniczeniu prędkości na początku trasy

Rys.6 dotyczy energooszczędnej jazdy pojazdu tramwajowego przy ograniczeniu prędkości do wartości 25 km/h na wewnętrznym odcinku o długości 60 m, po przebyciu drogi 400 m. Dla początkowej części jazdy funkcja czasowa prędkości jest identyczna w porównaniu z wariantem ruchu pojazdu bez zakłóceń, ponieważ rozpatrywany jest taki przypadek, w którym tramwaj poruszał się początkowo zgodnie z kryterium minimum zużycia energii elektrycznej, natomiast konieczność ograniczenia prędkości pojawiła się w sposób nieoczekiwany. W badanym przypadku po przejechaniu 460 m tramwaj porusza się zgodnie z nowym algorytmem dalszej jazdy energooszczędnej. Konieczność ponownego rozpędzania się pojazdu po zakłóceniu ruchu związanym ze znacznym obniżeniem wartości prędkości powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej. Dla energooszczędnego ruchu (z najdłuższym wybiegiem) pobór energii jest o 59 % większy w porównaniu z jazdą bez zakłóceń drogowych, jeżeli nie występuje odzysk energii podczas hamowania pojazdu. Odpowiedni wzrost zużycia energii dla przypadku, gdy ma miejsce rekuperacja energii, wynosi 23,2%. Należy podkreślić, że dla wariantu jazdy z hamowaniem z odzyskiem energii całkowity bilans energetyczny jest dużo korzystniejszy, gdyż występuje wytwarzanie energii elektrycznej podczas dodatkowego hamowania pojazdu wywołanego koniecznością nieplanowego zmniejszenia prędkości na pewnym wewnętrznym odcinku trasy.

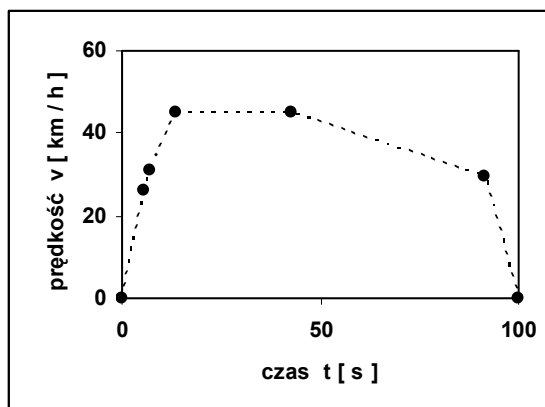


Rys.6. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energooszczędnej przy ograniczeniu prędkości na wewnętrznym odcinku trasy

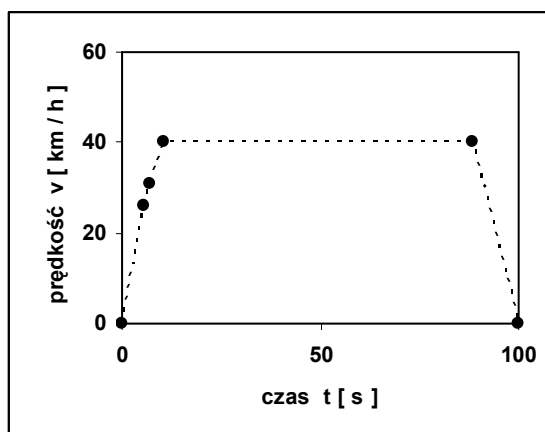
Rys.7-9 ilustrują ruch pojazdu tramwajowego przy różnorodnych globalnych ograniczeniach prędkości na całej trasie, przy czym zamieszczone zostały wyniki obliczeń jazdy z najmniejszym zużyciem energii elektrycznej. Globalne ograniczenie prędkości jazdy tramwaju powoduje występowanie znacznych różnic dla czasu i drogi, które odpowiadają poszczególnym fazom ruchu, a więc rozruchowi, jeździe ze stałą prędkością, wybiegowi i hamowaniu. Z punktu widzenia formowania algorytmu ruchu pojazdu tramwajowego z minimalizacją zużycia energii istotne jest zapewnienie możliwie długiej fazy wybiegu.



Rys.7. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energooszczędnej przy globalnym ograniczeniu prędkości do 50 km/h



Rys.8. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energooszczędnej przy globalnym ograniczeniu prędkości do 45 km/h



Rys.9. Wartości prędkości granicznych v dla poszczególnych faz jazdy energooszczędnej przy globalnym ograniczeniu prędkości do 40 km/h

Dla jazd energooszczędnych uzyskano następujące (znacznie różniące się) długości wybiegu:

ograniczenie prędkości [km / h]	długość wybiegu [m]
50	723
45	508
40	0

Ograniczenie prędkości na całej trasie pomiędzy dwoma kolejnymi przystankami tramwajowymi powoduje zwiększenie zużycia energii elektrycznej. Przykładowo dla jazdy bez odzysku energii podczas hamowania pojazdu otrzymano następujące wyniki:

ograniczenie prędkości [km / h]	wzrost energii [%]
50	0,6
45	3,8
40	27

4. Podsumowanie

- Opracowane w literaturze algorytmy energooszczędnej jazdy pojazdu tramwajowego dotyczą najczęściej przejazdu bez zakłóceń ruchu, możliwego na wydzielonych torowiskach. W rzeczywistości ruch tramwaju w warunkach miejskich odbywa się przy częstych i dynamicznych zmianach parametrów jazdy.

- Uwzględnienie wpływu zakłóceń ruchu, takich jak nieplanowe ograniczenia prędkości jazdy, niezamierzone postoje na trasie, zmiany napięcia sieci trakcyjnej, pozwala na dokładniejsze wyznaczenie algorytmu jazdy pojazdu tramwajowego z minimalnym zużyciem energii elektrycznej, a oszczędności energii mogą wynosić nawet około 30%.

- Zakłócenia ruchu tramwajów wywołują dość często potrzebę dodatkowego hamowania pojazdu na trasie. Przeprowadzone obliczenia wykazują, że w takich przypadkach stosowanie urządzeń elektronicznych umożliwiających odzysk energii podczas hamowania tramwaju jest szczególnie korzystne z punktu widzenia całkowitego, szczegółowego bilansu zużycia energii elektrycznej. Systemy z rekuperacją energii pozwalają na zaoszczędzenie nawet do kilkudziesięciu procent energii, jeśli porównań dokonuje się z tramwajami, które nie mają możliwości odzysku energii.

- Globalne ograniczenie prędkości tramwaju obowiązujące na całej długości odcinka między dwoma sąsiednimi przystankami powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej; w przykładach zamieszczonych w niniejszym artykule powiększenie ilości pobieranej przez pojazd tramwajowy energii dochodziło nawet do 27 %.

- Energooszczędne prowadzenie tramwaju może być zrealizowane 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.

- Parametry energooszczędnego sterowania muszą być w sposób ciągły aktualizowane, ponieważ w każdej chwili mogą pojawić się jakieś zaburzenia, np. wynikające z wahań wartości napięcia sieci trakcyjnej. Cyklicznie należy dokonywać pomiarów i obliczeń następujących wielkości: czasu i odległości dla dalszej jazdy

pojazdu, prędkości tramwaju, napięcia sieci oraz masy pojazdu tramwajowego na postojach.

5. Literatura

- [1]. Frąckowiak J.: *Optymalizacja zużycia energii elektrycznej przez pojazd trakcyjny napędzany silnikami szeregowymi zasilanymi przez czopery*. Materiały V Konferencji Międzynarodowej: Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Regionalnym i Miejskim Transporcie, MET, 2001, Gdańsk
- [2]. Frąckowiak J.: *Symulacja hamowania odzyskowego pojazdu tramwajowego napędzanego przez silniki indukcyjne zasilane z falownika w układzie napędowym tramwaju*. Materiały VI Konferencji Naukowej SEMTRAK, 1994, Zakopane
- [3]. Glia R.: *Determination of Algorithms of Energy Saving Traffic of Tram Vehicle Taking Change of Supply Network Voltage into Consideration*. Proc. of VI International Conf.: Modern Electric Traction MET, 2003, Warsaw
- [4]. 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
- [5]. Ichikawa K.: *Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of train*. Bull. of JSME, Vol. 11, No. 47, 1968
- [6]. Kacprzak J., Koczara W.: *Podstawy napędu elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1990, Warszawa
- [7]. Kwaśnikowski J.: *O badaniach symulacyjnych procesie ruchu pociągu*. Pojazdy Szynowe, nr 5, 1980
- [8]. Nawrowski R., Zielińska M.: *Control of traction vehicles of minimum energy use*. Analysis, Control and Design, Vol. 1, 1994, AMSE Press
- [9]. Podoski J.: *Transport w miastach*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1985, Warszawa
- [10]. Zielińska M.: *Modelling of traction vehicle traffic*. Modelling, Measurement and Control, Part B, Vol. 49, No. 2, 1993, AMSE Press

Autor

Dr hab. inż. Stanisław Rawicki
Politechnika Poznańska
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej
60-965 Poznań
ul. Piotrowo 3A
E-Mail: Stanislaw.Rawicki@put.poznan.pl