

Stanisław Rawicki
Politechnika Poznańska, Poznań

OPROGRAMOWANIE DLA KOMPUTEROWEGO SYSTEMU SKOORDYNOWANEJ ORGANIZACJI ENERGOOSZCZĘDNEGO RUCHU POJAZDÓW TRAMWAJOWYCH

SOFTWARE FOR COMPUTER SYSTEM OF COORDINATED ORGANIZATION OF ENERGY-SAVING TRAFFIC OF TRAM VEHICLES

Streszczenie: W artykule omówiono skoordynowaną organizację ruchu kilku pojazdów tramwajowych, które przejeżdżają przez to samo skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. Dla każdego z tramwajów obliczono takie czasy jazdy dla etapu rozruchu, czasy jazdy ze stałą prędkością, czasy trwania fazy wybiegu oraz etapu hamowania, dla których otrzymuje się minimalne zużycie pobieranej z sieci energii elektrycznej. W ramach przykładów dotyczących ruchu czterech tramwajów pokazano wariant, gdy dla każdego z tramwajów udało się zapewnić bezkolizyjny - przy zielonym świetle – przejazd przez to samo skrzyżowanie. Zamieszczono też takie dwa przykłady, gdy niektóre tramwaje musiały przy czerwonym świetle oczekiwać na skrzyżowaniu na możliwość dalszej jazdy. W ramach dynamicznej jazdy tramwaju w warunkach miejskich formułowanie algorytmów jazdy pojazdu przy minimalnym zużyciu energii komplikuje potrzeba uwzględniania różnych możliwych zakłóceń ruchu, np. występowanie nieplanowych ograniczeń prędkości, zmian wartości napięcia sieci trakcyjnej. Przy długich postojach w oczekiwaniu na zielone światło zlikwidowanie powstałego opóźnienia w ruchu może wymagać zaplanowania przyspieszonej jazdy na kilku kolejnych odcinkach.

Abstract: The paper deals with the coordinated organization of ride of some tram vehicles running through the same crossing with the traffic lights. For every tram and in accordance with the criterion of the minimum electrical energy use, the best time of the starting, time of the running with the constant speed, time of the coasting and braking have been calculated. Within the framework of examples relating to traffic of four tram vehicles there was shown the variant when it was possible to ensure the ride of every tram free from collisions (at green light). Additionally two other examples have been given when trams have stopped at the red light and were in expectation of the green light. In connection with the special city conditions consisting in dynamically changing ride parameters, different traffic disturbances can appear. By way of example, it can be unexpected speed limitation or change of the voltage value of the traction network. In the case of greater time lags of the traffic, the ride delay must be liquidated during the quicker run between some succeeding stops. Also in such case, the best control strategy can ensure the electrical energy savings.

Słowa kluczowe: pojazdy tramwajowe, jazda energooszczędna, sygnalizacja świetlna, ruch skoordynowany
Keywords: tram vehicles, energy-saving ride, traffic lights, coordinated traffic

1. Wstęp

W związku z dużą liczbą tramwajów w wielu miastach na całym świecie należy poszukiwać możliwości oszczędności energii zużywanej na cele trakcyjne. Można wymienić tutaj wiele różnych dróg, jak wprowadzenie doskonalszych konstrukcji pojazdów, zastosowanie silników elektrycznych o większej sprawności, aplikacja lepszych układów sterowania. Optymalizacja doboru czasu rozruchu pojazdu, czasu jazdy ze stałą prędkością, czasu trwania wybiegu oraz hamowania również pozwala na uzyskanie oszczędności w zużyciu energii elektrycznej.

W artykułach [5-7] autor zajmował się optymalnym ruchem pojedynczego tramwaju, przy czym spełnione musiało być kryterium mini-

malnego zużycia energii. Niniejszy artykuł dotyczy skoordynowanej i energooszczędnej organizacji ruchu kilku tramwajów, które przejeżdżają przez to samo skrzyżowanie posiadające sygnalizację świetlną. Jednoczesne rozpatrywanie i koordynowanie ruchu kilku tramwajów wielokrotnie komplikuje obliczenia jazd energooszczędnych.

2. Model matematyczny ruchu tramwaju

W artykule rozpatruje się pojazdy tramwajowe napędzane 3-fazowymi silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników. Do nowoczesnego sterowania indukcyjnymi silnikami trakcyjnymi

zastosowano metodę orientacji wektora pola wirnika [3]. W ramach tej metodyki dokonuje się takich transformacji, dzięki którym wydziela się z wektora prądu stojana składową magnesyjącą oraz składową tworzącą moment elektromagnetyczny. Sterowanie strumieniem wirnika i momentem staje się odsprężone. Układ równań modelu matematycznego silnika indukcyjnego w zastępczym, równoważnym układzie dwufazowym podano w artykule [7]. Dynamikę ruchu tramwaju opisuje równanie:

$$k_m m \frac{dv}{dt} = F_p - W(v) \quad (1)$$

gdzie m to masa pojazdu, k_m - współczynnik mas wirujących, v - prędkość pojazdu, F_p - siła pociągowa, $W(v)$ - opory trakcyjne. Związek między siłą pociągową F_p i użytecznym momentem silnika T_U ma następującą postać:

$$F_p = \frac{n_S T_U z \eta}{r} \quad (2)$$

gdzie n_S - liczba silników napędowych, z - wielkość przełożenia przekładni mechanicznej, η - sprawność przekładni, r - promień koła napędowego. Opory ruchu $W(v)$ wyznacza się na podstawie wzoru Coopera. Elektryczną energię En pobieraną przez silniki trakcyjne oblicza się przez następujące całkowanie:

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

Procedurę jazdy z minimalnym zużyciem energii elektrycznej wiąże się z planem likwidacji opóźnienia w ruchu, powodowanego przez zakłócenia komunikacyjne.

3. Omówienie wyników obliczeń

Obliczenia wykonano dla czterech równych tramwajów. Modernizacja tramwaju typu 105N została zrealizowana przez wprowadzenie trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych z falowników, przy czym każdy tramwaj ma 4 równe silniki trakcyjne o łącznej mocy 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 gwiazdę), częstotliwość 60Hz, prąd: 71,7A, prędkość: 1724obr/min, sprawność 90,8%, współczynnik mocy $\cos\phi$: 0,931. Tutaj podano

tylko część wyników dla masy pojazdu: 22000 kg, co odpowiada liczbie 80 pasażerów (64% znamionowego obciążenia tramwaju).

Dla ruchu bez żadnych zakłóceń w pierwszym wariantcie badań (zielone światło dla każdego zbliżającego się pojazdu na skrzyżowaniu) rozpatrywano (rys. 1 – 8) cztery tramwaje na następujących czterech trasach:

- tramwaj 1 na trasie A (1200m, jazda 120s),
- tramwaj 2 na trasie B (950m, jazda 95s),
- tramwaj 3 na trasie C (700m, jazda 70s),
- tramwaj 4 na trasie D (500m, jazda 52s).

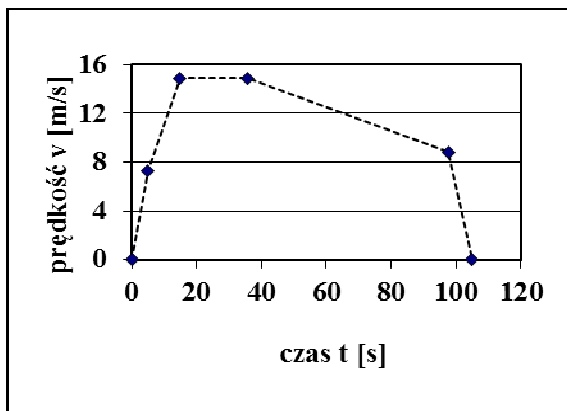
Współczynnik rekuperacji kr określa, jaka część energii jest odzyskiwana podczas hamowania pojazdu. Dla tramwaju 1 i współczynnika $kr = 0$ na rys. 1 przedstawiono jazdę bezkolizyjną (zielone światło), przy czym w wyniku procesu optymalizacji oraz doborze najkorzystniejszych czasów przejazdu dla etapu rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, wybiegu i hamowania uzyskano najmniejsze zużycie energii $En_{min} = 1,455kWh$. Na rys. 1 występuje zarówno faza jazdy ze stałą prędkością, jak i etap wybiegu.

Rys. 2 przedstawia jazdę tramwaju (również o numerze 1) dla przypadku, gdy jest odzysk energii podczas hamowania ($kr = 1$). Po optymalizacyjnym doborze czasów jazdy w poszczególnych etapach ruchu zagwarantowano minimum zużycia energii: $En_{min} = 1,240kWh$. Tutaj etap jazdy ze stałą prędkością jest dłuższy niż na rys. 1, gdy nie było odzysku energii przy hamowaniu. Na rys. 1 zużycie energii jest o 17,3% większe niż na rys. 2. Nowoczesne urządzenia energoelektroniczne, które dają możliwość odzysku energii przy hamowaniu, umożliwiają oszczędzanie energii elektrycznej. Dla tramwaju 2 (950m, 95s) rys. 3, 4 ilustrują przejazd obliczone zgodnie z kryterium minimalnego zużycia energii. Dla współl. $kr = 0$ (rys. 3) $En_{min} = 1,064kWh$, a dla współl. $kr = 1$ (rys. 4) $En_{min} = 0,903kWh$. Oznacza to, że dla przypadku pokazanego na rys. 3 zużycie energii jest większe o 17,8%.

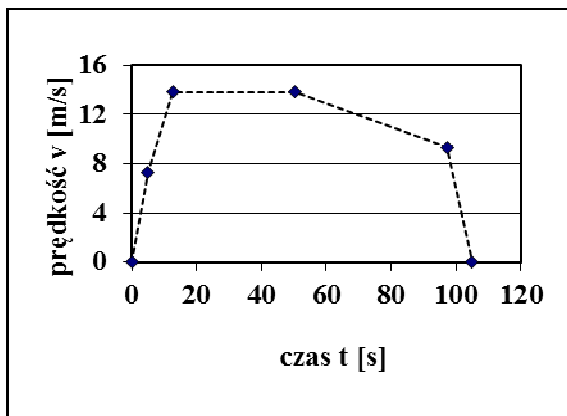
Dla pojazdu 3 (700m, 70s) rys. 5, 6 pokazują jazdę, dla których również zminimalizowano wielkość zużytej energii. Przy $kr = 0$ (rys. 5) mamy: $En_{min} = 0,962kWh$, a dla $kr = 1$ (rys. 6) energetyczne minimum wynosi: $En_{min} = 0,742kWh$ (przy braku odzysku energii jej zużycie jest o 29,7% większe).

Dla tramwaju 4 (500m, 52s) rys. 7, 8 ilustrują przejazd z minimalizacją zużycia energii, przy czym dla $kr = 0$ (rys. 7): $En_{min} = 0,867kWh$, a dla $kr = 1$ (rys. 8): $En_{min} = 0,600kWh$ (bez

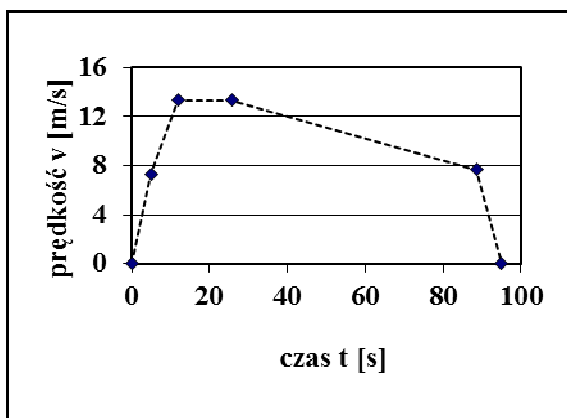
odzysku zużycie jest o 44,5% większe). W porównaniu z jazdą tramwaju na większych odległościach, dla jazdy pojazdu na mniejszym



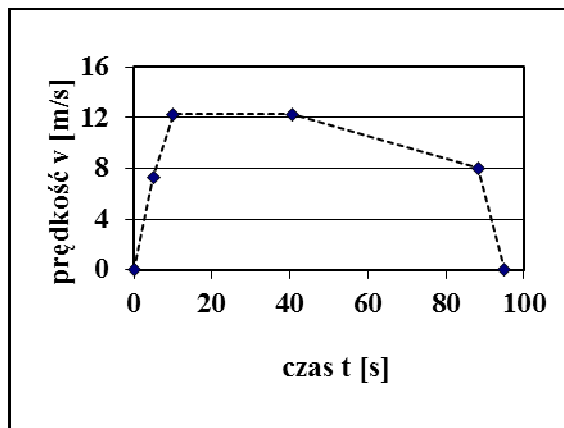
Rys. 1. Tramwaj 1, trasa A o długości 1200m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 105s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 1,455kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 0$



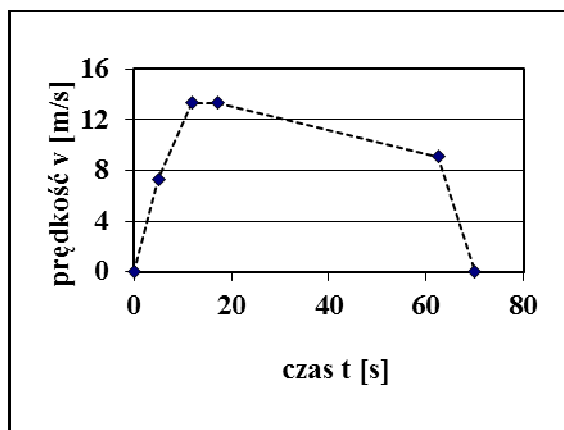
Rys. 2. Tramwaj 1, trasa A o długości 1200m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 105s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 1,240kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 1$



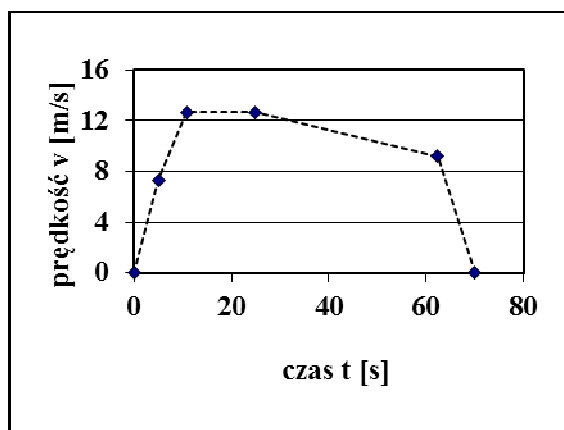
Rys. 3. Tramwaj 2, trasa B o długości 950m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 95s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 1,064kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 0$



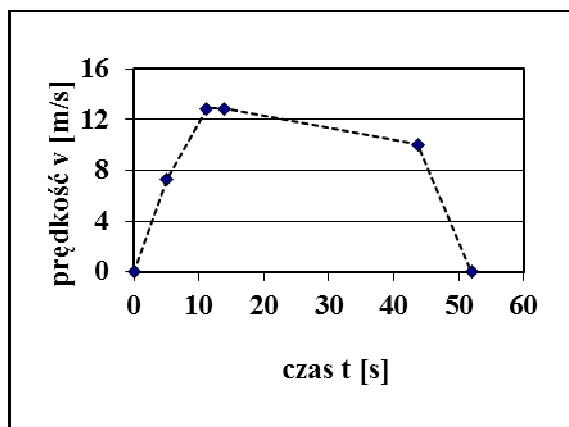
Rys. 4. Tramwaj 2, trasa B o długości 950m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 95s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 0,903kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 1$



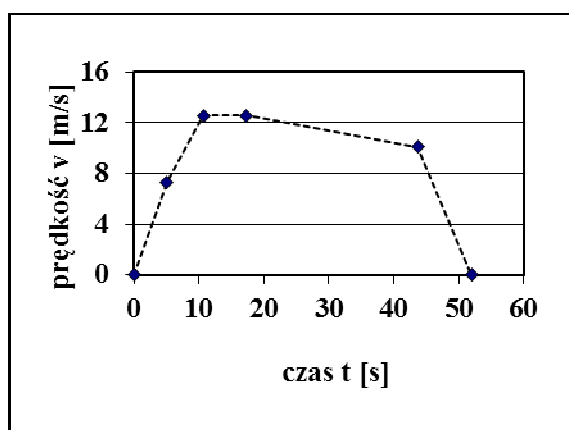
Rys. 5. Tramwaj 3, trasa C o długości 700m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 70s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 0,962kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 0$



Rys. 6. Tramwaj 3, trasa C o długości 700m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 70s; minimalne zużycie energii: $E_{nmin} = 0,742kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 1$



Rys. 7. Tramwaj 4, trasa D o długości 500m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 52s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,867kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 0$



Rys. 8. Tramwaj 4, trasa D o długości 500m, czas jazdy bez zakłóceń (zielone światło): 52s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,600kWh$; współczynnik rekuperacji $kr = 1$

dystansie (tak jak na rys. 7, 8) uzyskuje się procentowo większe oszczędności energii wynikające z działania energoelektronicznych urządzeń dających odzysk podczas hamowania.

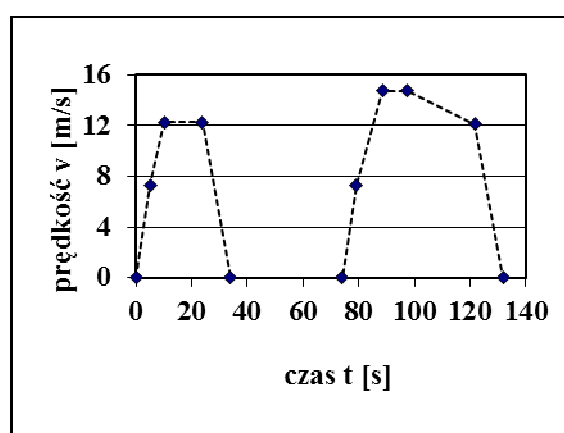
W drugim wariantcie badań, tramwaj 2 na trasie B (950m, jazda 95s) oraz tramwaj 4 na trasie D (500m, 52s) musiały przed skrzyżowaniem zatrzymać się na czerwonym świetle, natomiast dwa pozostałe tramwaje miały światło zielone. Wyniki obliczeń dla wariantu drugiego podano na rys. 9-14 tylko (ograniczenie miejsca) dla przypadku, gdy występuje odzysk energii na etapie hamowania ($kr = 1$), przy czym rys. 9-11 dotyczą tramwaju 2, a rys. 12-14 związane są z pojazdem 4. W każdym przypadku funkcją celu było minimum zużycia energii.

Na rys. 9 pokazano przejazd trasy B (950m) z długim postojem po przejechaniu segmentu I o długości 300m oraz minimalnym zużyciem

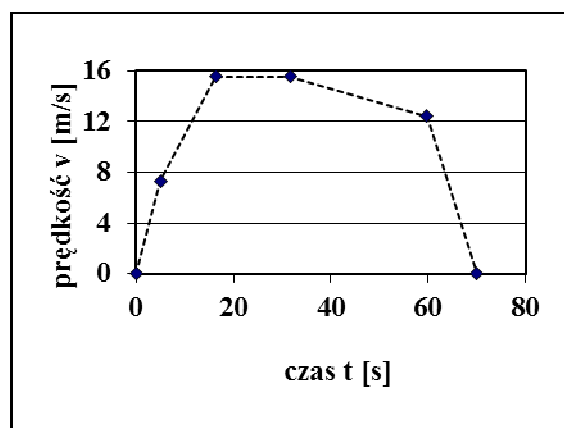
energii $En_{min} = 1,367kWh$. Oczekiwanie na zielone światło trwało 40s, co spowodowało duże opóźnienie w stosunku do rozkładu jazdy, a likwidacja całego opóźnienia została rozłożona na dalsze odcinki (trasy: E, F, G). Odcinki (trasy) E i G były jednakowe: miały długość 850m każdy, a pierwotnie zaplanowany przejazd bez zakłóceń każdego z nich wynosił 85s. Odcinek (trasa) F miał długość 650m, a normalny planowy czas jazdy wynosił tutaj 65s.

W wyniku optymalizacji wyznaczono skrócony czas jazdy (rys. 10) na jednakowych odcinkach E i G równy 70,05s (zamiast 85s). Na każdym z tych odcinków przyspieszona jazda tramwaju ze średnią prędkością 12,13m/s (zamiast 10m/s) umożliwi zmniejszenie opóźnienia o 14,95s.

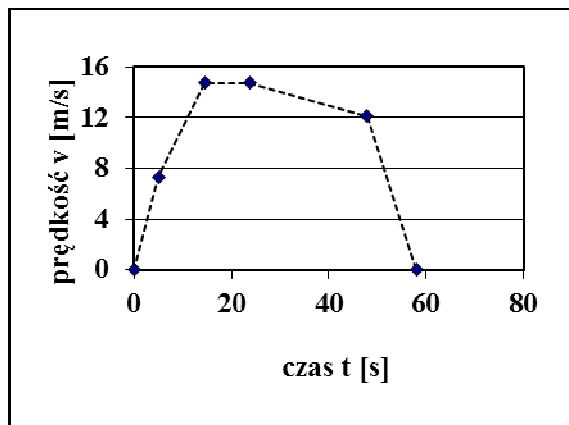
Na skutek koniecznego zwiększenia prędkości



Rys. 9. Tramwaj 2, trasa B o dług. 950m, postój 40s (czerwone światło) po przejechaniu 300m; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,367kWh$; opóźnienie na końcu trasy B: 36,95s; $kr = 1$



Rys. 10. Tramwaj 2, przejazd w ciągu 70,05s na równych trasach E i G o długości 850m przy likwidowaniu opóźnienia z trasy B; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,836kWh$; $kr = 1$



Rys. 11. Tramwaj 2, przejazd w ciągu 57,95s na trasie F o długości 650m przy likwidowaniu opóźnień z trasy B; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,865kWh$; $kr = 1$

jazdy na odcinku E i G zużycie energii podczas zoptymalizowanej jazdy $En_{min} = 1,104kWh$, czyli jest większe o 32,1% w stosunku do bezkolizyjnej, priorytetowej jazdy tramwaju przez skrzyżowanie.

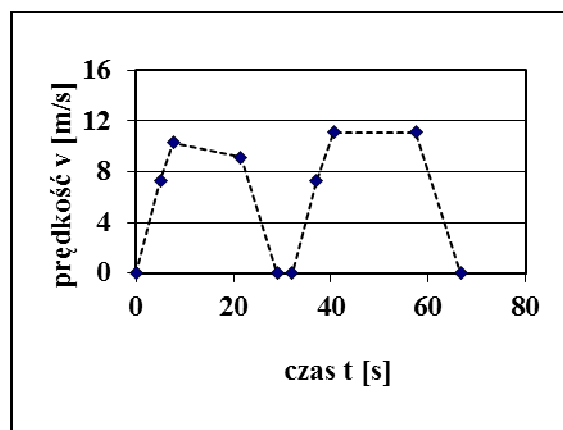
Optimalny czas jazdy tramwaju na trzecim odcinku F (rys.11) wynosi 57,95s (zamiast 65s). Przyspieszona jazda ze średnią prędkością 11,22m/s umożliwi zmniejszenie opóźnienia o 7,05s. Zużycie energii będzie tu jednak o 21,3% większe w stosunku do jazdy z priorytetowym dla tego tramwaju zielonym światłem. Na rys. 12 pokazano przejazd trasy D (500m) z koniecznym zarówno postojem trwającym 3s po przejechaniu segmentu I o długości 210m, jak również przy obowiązującym na segmencie II o długości 390m nieplanowym ograniczeniu prędkości do 40km/h (11,11m/s). Przejechanie całego odcinka D zajęło 66,64s, czyli powstało opóźnienie 14,64s. Likwidacja tego opóźnienia wymagała jazdy na następnych odcinkach z prędkością większą niż pierwotnie planowana. Dla podróżnych regularność ruchu tramwajów ma duże znaczenie i dlatego dokłada się wielu starań, aby tę regularność utrzymać. Wielka prędkość pojazdów przy likwidacji opóźnień może jednak prowadzić do znacznego wzrostu zużycia energii i kosztów jazdy. Z tego powodu celowy jest racjonalny wybór liczby kolejnych odcinków, na których jazda z odpowiednią prędkością umożliwi zlikwidowanie opóźnienia w stosunku do rozkładu jazdy.

W wyniku jazdy z dużymi zakłóceniami ruchu (postój na czerwonym świetle i ograniczenie prędkości za skrzyżowaniem) już na trasie D

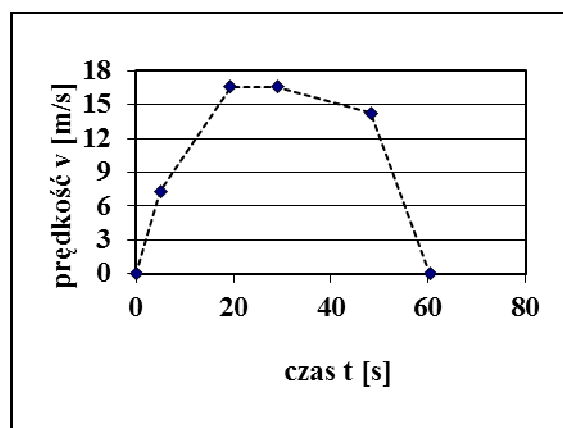
(rys. 12) nastąpił wzrost zużycia energii o 25,5% w stosunku do jazdy bezkolizyjnej.

Na rys. 13 pokazano wyznaczony w wyniku optymalizacji energooszczędny przejazd przez następny odcinek H długości 750m, na którym pierwotnie planowano czas jazdy 75s. Założono zlikwidowanie opóźnienia w ruchu równego 14,64s już tylko tutaj podczas bardzo szybkiej jazdy ze średnią prędkością wynoszącą 12,43m/s (planowana prędkość średnia: 10m/s). W takich uwarunkowaniach na sumarycznej trasie, obejmującej odcinek D oraz odcinek H, wzrost zużycia energii przy wsp. $kr = 1$ był równy 36,9%.

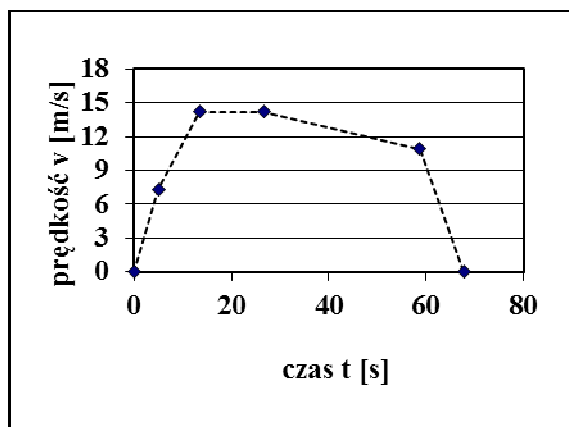
Rys. 14 dotyczy takiego przypadku, gdy łączne opóźnienie w ruchu jest likwidowane podczas



Rys. 12. Tramwaj 4, trasa D o dług. 500m, postój 3s (czerwone światło) po przejechaniu 210m, potem ograniczenie prędk. do 40km/h; zużycie energii: $En = 0,753kWh$; opóźnienie na końcu trasy D: 14,64s; $kr = 1$



Rys. 13. Tramwaj 4, przejazd w ciągu 60,36s na trasie H o długości 750m przy likwidowaniu opóźnień z trasy D; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,125kWh$; $kr = 1$



Rys. 14. Tramwaj 4, dla każdej równej trasy H i I przejazd długości 750m w ciągu 67,68s przy likwidowaniu opóźnienia z trasy D; minimalne zużycie energii: $E_{min} = 0,893kWh$; $kr = 1$

przyspieszonej jazdy przez dwa kolejne, równe odcinki: H oraz I długości 750m i pierwotnie planowanym czasem jazdy 75s. Na każdym z tych dwóch odcinków likwidowana jest połowa wielkości opóźnienia, a więc 7,32s, co daje jazdę ze średnią prędkością 11,08m/s. Łącznie na trasie obejmującej odcinki: D, H oraz I wzrost zużycia energii w stosunku do jazdy bezkolizyjnej wynosi 18,4% dla wsp. $kr = 1$.

Wykonano też obliczenia przy założeniu, że opóźnienie ruchu zlikwiduje się podczas jazdy na 3 równych odcinkach: H, I oraz J (750m oraz pierwotny czas 75s). Potrzebna była jazda z prędkością średnią 10,70m/s, a zużycie energii dla sumy odcinków: D, H, I oraz J wzrosło o 12,9% gdy był odzysk energii przy hamowaniu. Za kompromisowy uznano wariant podany na rys. 14, a więc gdy likwidowanie opóźnienia ruchu będzie wykonane na odcinkach H oraz I.

4. Podsumowanie

Minimalizacja zużycia energii elektrycznej przez pojazd tramwajowy jest możliwa na podstawie odpowiedniego sterowania ruchem. Konieczne jest tutaj określenie optymalnego czasu trwania rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, etapu wybiegu i hamowania.

Opracowane algorytmy przejazdu tramwaju przy minimalnym zużyciu energii umożliwiają zaoszczędzenie około 20% energii elektrycznej w porównaniu z jazdą opierającą się tylko na subiektywnych decyzjach motorniczego.

Prace dotyczące optymalnego sterowania tylko jednego tramwaju nie są wystarczające. Na skrzyżowaniach w ruchu miejskim może spotykać się kilka tramwajów nadjeżdżających z róż-

nych kierunków. W takich przypadkach z punktu widzenia energooszczędności staje się istotne zaplanowanie optymalnych przejazdów kilku tramwajów.

Sprawą zasadniczą dla dynamiki tramwajowego ruchu miejskiego jest odpowiednie działanie sygnalizacji świetlnej. Sygnalizacja może powodować zakłócenia płynności ruchu, a pojazdy mogą być zmuszane do krótkich lub dłuższych nieplanowych postojów.

Przy powstaniu zwiększonych opóźnień energooszczędne likwidowanie opóźnień musi być odpowiednio rozszerzone również na dalsze odcinki jazdy pojazdu tramwajowego.

Dalsze badania powinny obejmować zarówno ruch tramwajów, jak i ruch samochodów.

5. Literatura

- [1]. Kacprzak J.: *Automatyka i sterowanie elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1981, Warszawa.
- [2]. Nawrowski R., Zielińska M.: *Control of traction vehicles of minimum energy use*. Analysis, Control and Design, Vol. 1, 1994, AMSE Press.
- [3]. Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2003, Wrocław.
- [4]. Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J.: *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1980, Warszawa.
- [5]. Rawicki S.: *Nowoczesny system sterowania pojazdu tramwajowego przy minimum zużycia energii*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 73, 2005, KOMEL, s. 131-136.
- [6]. Rawicki S.: *Energooszczędne sterowanie układu napędowego tramwaju z silnikami szeregowymi prądu stałego przy zakłóceniach ruchu pojazdu*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, KOMEL, Nr 77, Katowice, 2007, s. 111-116.
- [7]. Rawicki S., Brodnicki D., Chyła K., Nowak M., Pluciński A.: *Algorytmy energooszczędnej likwidacji dużych opóźnień w ruchu pojazdów tramwajowych z silnikami indukcyjnymi*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, KOMEL, Nr 94, Katowice, 2012, s. 49-53.
- [8]. Zielińska M.: *Modelling of traction vehicle traffic*. Modelling, Measurement and Control, Part B, Vol. 49, No. 2, 1993, AMSE Press.

Autor

Prof. dr hab. inż. Stanisław Rawicki
 Politechnika Poznańska
 Wydział Elektryczny
 Zakład Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych
 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A
 E-mail: stanislaw.rawicki@put.poznan.pl