

Koordinacja przejazdów tramwajów dla minimalizacji zużycia energii

Karol Chyła, Stanisław Rawicki, Marcin Urbański

Wprowadzenie

Praktycznie we wszystkich dziedzinach działalności człowieka obserwuje się obecnie dążenie do oszczędności w zużyciu energii. Pojazdy tramwajowe w miejskiej komunikacji masowej są stosowane w wielu krajach i racjonalizacja zużycia energii przez tramwaje jest w pełni uzasadniona. Oszczędności energii przynosi wprowadzanie nowoczesnych układów napędowych sterowanych za pomocą systemów energoelektronicznych, umożliwiających energooszczędny rozruch i odzysk energii podczas hamowania pojazdu.

W literaturze znany jest fakt, że dla pojedynczego tramwaju przy zadanej długości trasy i określonego czasu jazdy (czyli dla takiej samej wartości prędkości średniej) istnieje wiele różnych sposobów przejazdu, dla których wielkość zużycia energii nie jest jednakowa. Optymalizacja polega tutaj na takim doborze parametrów jazdy podczas etapu rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, etapu wybiegu oraz hamowania, dla których następuje minimalizacja zużycia energii.

Algorytmy przejazdu tramwaju przy minimalnym zużyciu energii umożliwiają zaoszczędzenie nawet około 20% energii elektrycznej w porównaniu z jazdą opierającą się tylko na subiektywnych decyzjach motorniczego. Jazda tramwaju, zwłaszcza w centrum miasta, cechuje się częstym występowaniem różnych zakłóceń ruchu polegających na konieczności czasowego zmniejszenia prędkości, a nawet nieplanowych zatrzymań i postojów. Poważnym zakłóceniem płynności ruchu pojazdu może być sygnalizacja świetlna, wymuszająca czasami długie postoje w oczekiwaniu na zielone światło. Powoduje to zwiększenie zużycia energii, tym bardziej, że dalsza jazda powinna odbywać się ze zwiększoną prędkością średnią w celu zlikwidowania opóźnienia w stosunku do rozkładu jazdy, którego przestrzeganie jest społecznie istotne z punktu widzenia oczekiwań pasażerów.

Motorniczy nie może samodzielnie, bez dodatkowej pomocy, prowadzić tramwaju zgodnie z naukowym algorytmem minimalnego zużycia energii. W szczególności jest to niemożliwe przy występowaniu zakłóceń ruchu. Uwaga motorniczego musi być skupiona głównie na takich działaniach, które zapewniają bezpieczeństwo jazdy. Optymalnym rozwiązaniem może być półautomatyczne, energooszczędne prowadzenie tramwaju. Jeżeli motorniczy zdecyduje, że spełnione są warunki bezpiecznej jazdy, to może on wyłączyć automatyczne prowadzenie pojazdu zgodnie z algorytmem minimalizującym zużycie energii. Działania motorniczego mogą być nadzorowane

Streszczenie: W artykule omówiono skoordynowaną organizację miejskiego ruchu kilku tramwajów poruszających się zgodnie z kryterium minimalnego zużycia energii. Wszystkie tramwaje wyposażone były w trójfazowe silniki indukcyjne. Uwzględniony został wpływ sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniu przy formułowaniu procedury jazdy energooszczędnej. Najpierw podano przykład takiej jazdy trzech tramwajów, gdy sygnalizacja świetlna zapewniła wszystkim pojazdom przejazd przy zielonym świetle, a więc bez żadnego oczekiwania. Zostały również przeanalizowane dwa przypadki, gdy sygnalizacja świetlna spowodowała krótki oraz długi postój tramwaju. Pokazano, że w przypadku długich nieplanowych postojów likwidowanie opóźnienia wymaga odpowiedniego zaplanowania dalszej jazdy z większą prędkością na kilku kolejnych odcinkach jazdy.

COORDINATION OF TRAMS RIDE FOR MINIMIZATION OF ENERGY USE

Abstract: *The paper deals with the coordinated organization of city ride of some trams running in accordance to the criterion of the minimum energy use. All trams were driven by three-phase induction motors. The influence of light signalling on the crossing has been taken into account at elaboration of the procedure of the energy-saving traffic. First the ride of three trams was described at green light for every vehicle and here no waiting was necessary. There were also analysed two variants of disturbances caused by the light signalling: additional short and long tram stop because of the red light. For greater time lags of the traffic, the ride delay must be liquidated during the quicker run between some successive stops; the ride algorithm ought to ensure the minimum energy use.*

i sprawdzane przez nowoczesne systemy kontroli uwagi i gotowości osób kierujących pojazdami oraz przez systemy sygnalizujące różne zagrożenia dla bezpiecznej jazdy. W każdej chwili motorniczy może wyłączyć stan automatycznego prowadzenia i samodzielnie, z większym bezpieczeństwem, kierować pojazdem. Po ustąpieniu zakłóceń ruchu musi być wyznaczony nowy

algorytm dalszej jazdy energooszczędnej, przy czym najczęściej jest to jazda z większą prędkością średnią, co umożliwia zlikwidowanie opóźnienia.

Jeżeli czas opóźnienia jest duży, to procedurę jego likwidacji należy rozłożyć na kilka kolejnych odcinków jazdy tramwaju. Przy wyborze mniejszej liczby takich odcinków zużycie energii będzie większe, ale czas powrotu do jazdy zgodnej z rozkładem jazdy będzie krótszy, co jest zgodne z wymaganiami pasażerów, dotyczącymi punktualności kursowania pojazdów tramwajowych. Wybór optymalnej liczby odcinków przyspieszonej jazdy jest tutaj kompromisem między dążeniem do oszczędności energii z jednej strony, a społecznymi oczekiwaniami osób korzystających z tramwajowej komunikacji.

W ramach dotychczasowych publikacji [1–6, 9] autorzy zajmowali się wyznaczaniem algorytmu takiego przejazdu pojedynczego tramwaju, dla którego uzyskuje się minimalne zużycie energii, przy czym uwzględniano wiele możliwych przypadków występowania zakłóceń podczas jazdy: planowe i niezamierzone ograniczenia prędkości, planowe i nieoczekiwane dodatkowe postoje na trasie, zmiany wartości napięcia sieci trakcyjnej, zmiany masy pojazdu (różna liczba pasażerów na kolejnych odcinkach). W dużych miastach, szczególnie w dzielnicach centralnych, występuje wzajemny wpływ jazdy różnych tramwajów na płynność ruchu. Takie skoordynowanie sposobu poruszania się wielu tramwajów, aby uzyskać minimalizację całkowitego zużycia energii, jest ambitnym celem dla programisty opracowującego algorytm jazdy dla poszczególnych pojazdów. W niektórych przypadkach tramwaje poruszające się na głównych trasach miejskich i przewożące dużą liczbę pasażerów mogą posiadać pewien stopień uprzywilejowania, polegający np. na skracaniu czasu oczekiwania na zielone światło.

Niniejsza publikacja rozpatruje skoordynowaną organizację ruchu kilku tramwajów, które przejeżdżają przez to samo skrzyżowanie z rozbudowaną sygnalizacją świetlną. W stosunku do analizowania jazdy tylko jednego tramwaju, równoczesne rozpatrywanie i skoordynowanie ruchu kilku pojazdów jest dużo bardziej skomplikowane w przypadku obliczeń jazd energooszczędnych.

Przykładowe wyniki obliczeń dla jazdy skoordynowanej tramwajów

Obliczenia zostały przeprowadzone dla trzech jednakowych pojazdów tramwajowych wyposażonych w trójfazowe silniki indukcyjne. Model matematyczny takich silników napędowych zasilanych z układów falownikowych oraz matematyczny opis dynamiki ruchu tramwaju są opisane w monografii [6]. Optymalizację jazdy z minimalnym zużyciem energii powiązano z procedurą likwidowania opóźnienia w ruchu, powodowanego przez zakłócenia komunikacyjne. Badania analityczne wykonano dla zmodernizowanych tramwajów typu 105N, które wyposażono w trójfazowe silniki indukcyjne współpracujące z falownikami. Każdy tramwaj ma cztery równe silniki trakcyjne o łącznej mocy 160 kW. Pojazd zasilany jest z sieci trakcyjnej o napięciu znamionowym 600 V (DC). Inne szczegółowe dane tramwaju są następujące: całkowita długość: 13,5 m, masa własna: 16 500 kg, obciążenie znamionowe: 8750 kg.

Dane znamionowe trakcyjnego trójfazowego silnika indukcyjnego są następujące: moc 40 kW, napięcie 380 V (połączenie w gwiazdę), częstotliwość 60 Hz, prąd 71,7 A, prędkość 1724 obr./min, sprawność 90,8%, współczynnik mocy 0,931. W niniejszym rozdziale zamieszczono tylko część wyników dla masy pojazdu 22 000 kg, co odpowiada liczbie 80 pasażerów, czyli 64% znamionowego obciążenia tramwaju.

Pierwszy blok obliczeniowy (rys. 1–6) dotyczył ruchu trzech tramwajów bez żadnych zakłóceń, tzn. każdy pojazd na skrzyżowaniu miał zielone światło. Wykonano badania trzech pojazdów poruszających się na następujących trzech trasach:

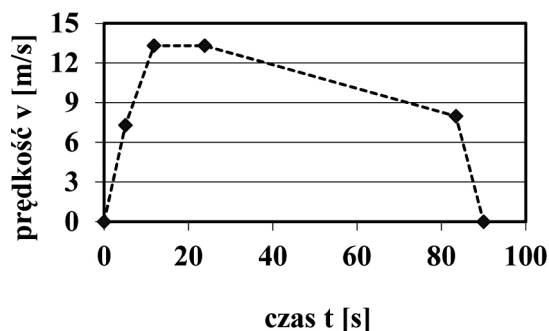
- tramwaj nr 1 na trasie A (długość 900 m, czas jazdy 90 s);
- tramwaj nr 2 na trasie B (długość 500 m, czas jazdy 50 s);
- tramwaj nr 3 na trasie C (długość 950 m, czas jazdy 95 s).

W niniejszym artykule tzw. współczynnik rekuperacji k_r informuje, jaka część energii jest odzyskiwana podczas etapu hamowania tramwaju. Dla tramwaju oznaczonego numerem 1 i współczynnika $k_r = 0$ na rys. 1 przedstawiono bezkolizyjną jazdę bez żadnych zakłóceń ruchu i przy zielonym świetle na skrzyżowaniu. Dzięki przeprowadzonej optymalizacji określono najkorzystniejsze czasy przejazdu dla rozruchu, etapu jazdy ze stałą prędkością, fazy wybiegu i hamowania, dla których uzyskano najmniejsze zużycie energii $En_{min} = 1,039$ kWh. Na wszystkich wykresach zamieszczonych na rys. 1–11 zaznaczono punkty, które określają wartości prędkości granicznych dla poszczególnych etapów jazdy. Z punktu widzenia problematyki algorytmów energooszczędnych przejazdów tramwajów interesujące jest to, że na rys. 1, przy minimalizacji zużycia energii, występuje zarówno etap jazdy ze stałą prędkością, jak i faza wybiegu.

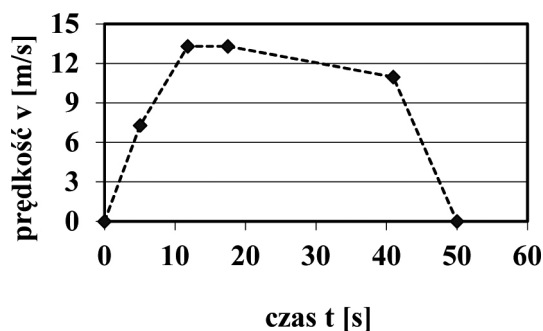
Również dla pojazdu tramwajowego o numerze 1 rys. 2 przedstawia jazdę dla takiego przypadku, gdy występuje odzysk energii elektrycznej podczas etapu hamowania, a współczynnik rekuperacji osiąga maksymalną wartość równą $k_r = 1$. Wykonanie szczegółowych obliczeń optymalizacyjnych zapewniło odpowiedni dobór czasów jazdy w poszczególnych etapach ruchu, dla których minimalne zużycie energii elektrycznej wyniosło $En_{min} = 0,869$ kWh. W tym przypadku etap jazdy ze stałą prędkością jest dłuższy niż na rys. 1, gdy nie było odzysku energii przy hamowaniu.

Dla wariantu podanego na rys. 1 zużycie energii jest o 19,6% większe niż na rys. 2. Jest to typowa relacja, gdyż nowoczesne urządzenia energoelektroniczne, które umożliwiają odzysk energii przy hamowaniu, zapewniają oszczędzanie energii elektrycznej.

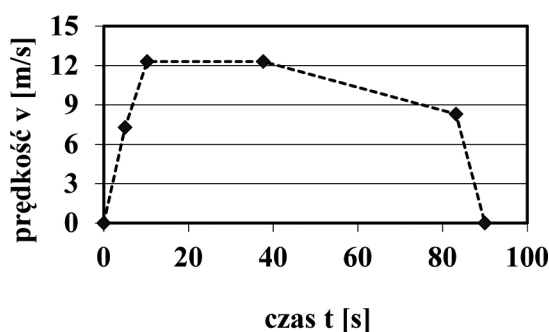
Dla tramwaju nr 2 (500 m, 50 s) rys. 3, 4 ilustrują bezkolizyjne przejazdy obliczone zgodnie z kryterium minimalnego zużycia energii. Dla współczynnika rekuperacji $k_r = 0$ (przejazd tramwaju na rys. 3) zminimalizowane zużycie energii wynosi $En_{min} = 0,960$ kWh, natomiast przy pełnym odzysku energii (współczynnik $k_r = 1$) – przypadek pokazany na rys. 4 – pobrana na cele trakcyjne energia znacznie maleje i dla jazdy zgodnej z kryterium minimum zużycia energii wynosi tylko $En_{min} = 0,644$ kWh. Dla wariantu przedstawionego na rys. 3 zużycie energii jest aż o 49,1% większe niż dla jazdy z odzyskiem energii na rys. 4. Można sformułować wniosek, że dla



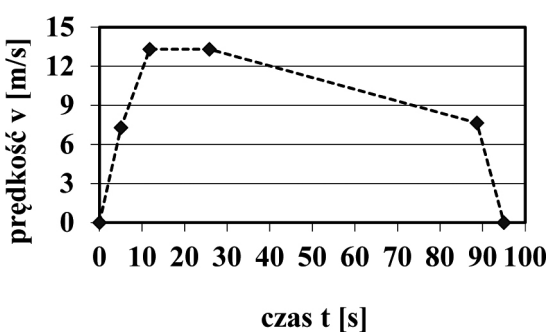
Rys. 1. Tramwaj nr 1, przejazd na trasie A o długości 900 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 90 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,039$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 0$



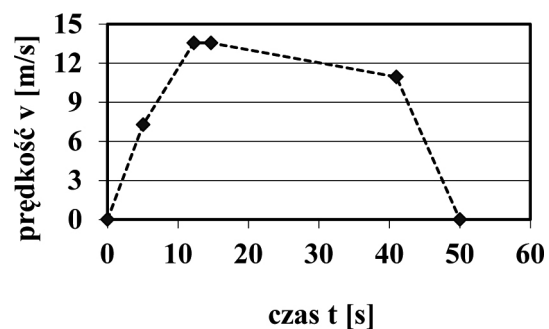
Rys. 4. Tramwaj nr 2, przejazd na trasie B o długości 500 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 50 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,644$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$



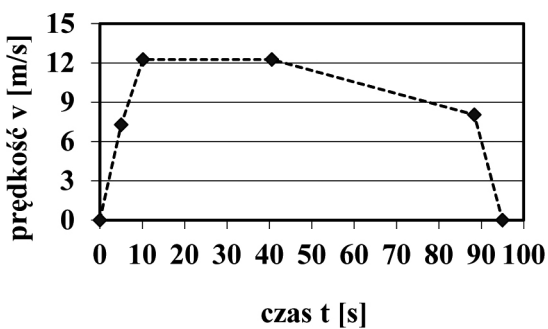
Rys. 2. Tramwaj nr 1, przejazd na trasie A o długości 900 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 90 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,869$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$



Rys. 5. Tramwaj nr 3, przejazd na trasie C o długości 950 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 95 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,064$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 0$



Rys. 3. Tramwaj nr 2, przejazd na trasie B o długości 500 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 50 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,960$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 0$

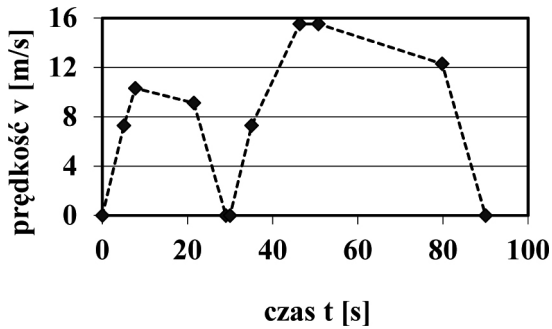


Rys. 6. Tramwaj nr 3, przejazd na trasie C o długości 950 m, czas jazdy bez żadnych zakłóceń (zielone światło na skrzyżowaniu): 95 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,903$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$

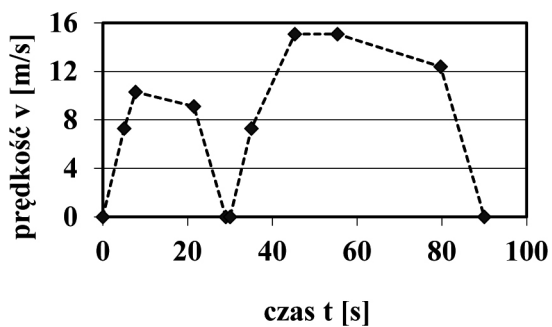
jazdy tramwaju na stosunkowo krótkich odcinkach (tutaj 500 m) procentowe efekty oszczędnościowe, wynikające z korzystnego wpływu procesu odzyskiwania energii podczas fazy hamowania, są większe niż dla jazdy na długich trasach.

Dla pojazdu nr 3 (950 m, 95 s) rys. 5, 6 pokazują jazdy, dla których również zminimalizowano wielkość zużytej energii. Przy współczynniku rekuperacji $k_r = 0$ (rys. 5) mamy:

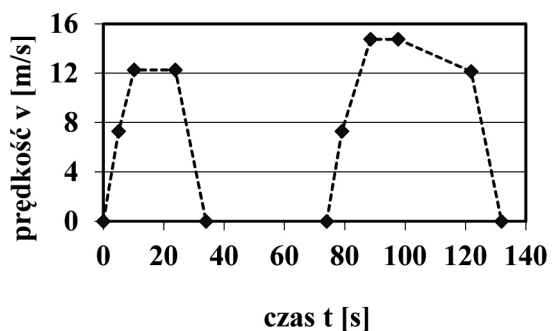
$En_{min} = 1,064$ kWh, a przy odzyskiwaniu energii i współczynnika $k_r = 1$ (rys. 6) energetyczne minimum wynosi $En_{min} = 0,903$ kWh. Na rys. 5 zużycie energii jest o 17,8% większe niż na rys. 6. Dla tramwaju nr 3 jadącego na najdłuższej trasie C (950 m) procentowe korzyści, wynikające z działania energoelektronicznych układów odzysku energii, są najmniejsze w ramach porównawczego bilansu.



Rys. 7. Tramwaj nr 1, trasa A o długości 900 m, czas przejazdu 90 s; krótki postój 1 s (czerwone światło) po przejechaniu 210 m; zminimalizowane zużycie energii: $En_{min} = 1,856$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 0$



Rys. 8. Tramwaj nr 1, trasa A o długości 900 m, czas przejazdu 90 s; krótki postój 1 s (czerwone światło) po przejechaniu 210 m; zminimalizowane zużycie energii: $En_{min} = 1,236$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$



Rys. 9. Tramwaj nr 3, trasa C o długości 950 m, postój 40 s (czerwone światło) po przejechaniu 300 m, powodujący duże opóźnienie ruchu: 36,95 s; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,367$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$

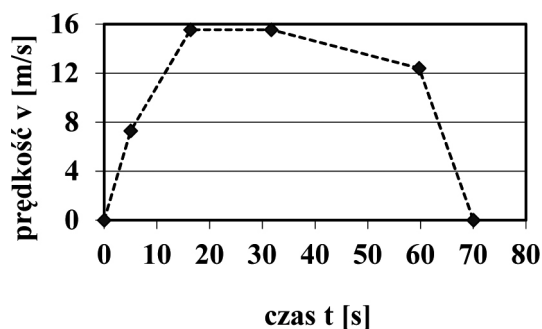
Dla trasy A (900 m, 90 s) rys. 7, 8 przedstawiają wyniki obliczeń dla przypadku, gdy nie było możliwe idealne skoordynowanie ruchu trzech tramwajów o numerach 1–3 tak, aby wszystkie pojazdy przejeżdżały skrzyżowanie na zielonym świetle. Bezkolizyjną jazdę (zielone światło) miały tylko tramwaje nr 2, 3, natomiast tramwaj nr 1 musiał przed skrzyżowaniem najpierw znacznie zmniejszyć prędkość, a potem zatrzymać się na 1 s, w krótkim oczekiwaniu na pojawienie się zielonego światła.

Na początku trasy A tramwaj nr 1 poruszał się zgodnie z pierwotnym algorytmem jazdy z minimalizacją zużycia energii przy wstępnym założeniu, że przejazd odbędzie się bez żadnych zakłóceń ruchu i na priorytetowym dla pojazdu zielonym świetle na skrzyżowaniu. Po czasie jazdy równym 7,71 s motorniczy zauważył (z dużej odległości) pojawienie się żółtego światła sygnalizacji i zdecydował, że tramwaj początkowo przejdzie w fazę wybiegu, a potem będzie hamował. Tramwaj zatrzymał się w miejscu odległym o 210 m od początku trasy A (ta początkowa część trasy będzie tutaj określana jako sekcja I). Już po 1 s postoju (a po 30 s licząc od rozpoczęcia jazdy) pojazd rozpoczął dalszą jazdę w ramach sekcji II o długości 690 m. Aby zlikwidować opóźnienie do końca trasy A, konieczna była jazda ze zwiększoną prędkością, tak aby czas jazdy w sekcji II wynosił 60 s, a łączny czas przejazdu trasy A był równy 90 s, czyli nie zmienił się w stosunku do jazdy bezkolizyjnej. Dla jazdy w sekcji II opracowano nowy, zaktualizowany algorytm przejazdu z minimalizacją zużycia energii.

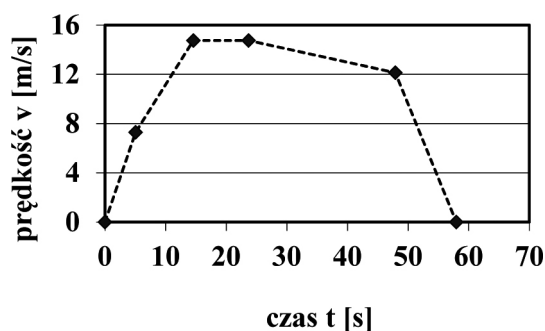
Na rys. 7 obliczenia wykonane są dla jazdy bez odzysku energii (współczynnik $k_r = 0$), przy czym zminimalizowane zużycie energii wynosi $En_{min} = 1,856$ kWh; energia ta jest o 78,6% większa niż dla wariantu na rys. 1 z przejazdem bezkolizyjnym. Przy pełnym odzysku energii na rys. 8 ($k_r = 1$) i zoptymalizowaniu przejazdu najmniejsze zużycie energii jest równe $En_{min} = 1,236$ kWh, co stanowi wartość o 42,2% większą w porównaniu z przypadkiem na rys. 2 bez żadnych zakłóceń ruchu. Zwiększony pobór energii na rys. 7, 8 wynika z konieczności wykonania ponownego rozruchu tramwaju po krótkim zatrzymaniu wewnątrz trasy na czerwonym świetle oraz konieczności jazdy z większą prędkością w sekcji II przy likwidowaniu opóźnienia.

Dla tramwaju nr 3 rys. 9–11 ilustrują przykład jazdy, podczas której na trasie C (długość 950 m i przejazd w ciągu 95 s w przypadku całkowicie bezkolizyjnej jazdy) wystąpiło duże zakłócenie płynności ruchu pojazdu spowodowane przez długi (40 s) postój w oczekiwaniu na zmianę czerwonego światła na zielone. Konieczne zatrzymanie nastąpiło w punkcie odległym o 300 m od miejsca ruszenia tramwaju (jest to sekcja I dla trasy C). Dążąc do pewnej zwięzłości niniejszej publikacji, na rys. 9–11 przedstawiono tylko wyniki obliczeń dla wartości współczynnika rekuperacji $k_r = 1$, czyli dla pełnego odzysku energii podczas hamowania pojazdu.

Likwidacja dużego opóźnienia spowodowanego długim (40 s) postojem wymagała jazdy na następnych odcinkach (trasach) z prędkością większą niż pierwotnie planowana. Dla podróży regularność ruchu tramwajów ma duże znaczenie i dlatego dokłada się wielu starań, aby tę regularność utrzymać. Zbyt 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. Tutaj po specjalnej, porównawczej analizie obliczeniowej sformułowano kompromisową decyzję, że opóźnienie zostanie zlikwidowane w ramach przyspieszonej jazdy na 3 dalszych, kolejnych odcinkach D, E i F. Odcinki: D i F są takie same i mają



Rys. 10. Tramwaj nr 3, przejazd w ciągu 70,05 s na równych trasach Di F o długości 850 m przy likwidowaniu dużego opóźnienia z trasy C; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 1,104$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$



Rys. 11. Tramwaj nr 3, przejazd w ciągu 57,95 s na trasie E o długości 650 m przy likwidowaniu dużego opóźnienia powstałego na trasie C; minimalne zużycie energii: $En_{min} = 0,865$ kWh; współczynnik rekuperacji $k_r = 1$

jednakowe długości równe 850 m oraz równe czasy przejazdu (85 s) dla ruchu bezkolizyjnego. Odcinek E ma długość 650 m, a normalny czas jazdy wynosi tutaj 65 s.

Optymalizowano zarówno najkorzystniejszy rozkład czasów jazdy na poszczególnych odcinkach D, E i F, jak również dobie-rano takie czasy jazdy tramwaju dla poszczególnych wewnętrznych faz ruchu, aby otrzymać minimalne całkowite zużycie energii elektrycznej. Dla równych odcinków D, F wyznaczony optymalny czas przyspieszonej jazdy wynosi 70,05 s (zamiast 85 s). Zwiększona prędkość średnia wynosiła tutaj 12,13 m/s (zamiast planowanej wartości 10 m/s) i umożliwiła zmniejszenie opóźnienia o 14,95 s na każdym z odcinków D, F. Na rys. 10 zminimalizowane zużycie energii jest równe $En_{min} = 1,104$ kWh, co jest wielkością o 32,1% większą niż podczas zaplanowanej bezkolizyjnej jazdy tramwaju nr 3.

Na rys. 11 obliczony optymalny czas jazdy ze zwiększoną prędkością 11,22 m/s (zamiast 10 m/s) na odcinku E wynosi 57,95 s (zamiast 65 s), co zapewnia zmniejszenie opóźnienia o 7,05 s. Jazda zgodnie z kryterium minimalnego zużycia energii prowadzi tutaj do poboru energii $En_{min} = 0,865$ kWh (wzrost o 32,3% na odcinku E).

Przy współczynniku rekuperacji $k_r = 1$ i dla całkowitej trasy obejmującej sumę odcinków C, D, E i F wyznaczone minimum zużycia energii wynosi $En_{min} = 4,440$ kWh, co stanowi wzrost o 35,0% w porównaniu z jazdą bez żadnych zakłóceń i przy zielonym świetle na skrzyżowaniu. W ramach komentarzy do innych obliczeń, wykonanych przez autorów niniejszego artykułu, warto podać informację, że przy braku odzysku energii podczas hamowania pojazdu (współczynnik $k_r = 0$) optymalizowane zużycie energii na całej trasie (odcinki C, D, E, F) jest znacznie większe i wynosi $En_{min} = 6,389$ kWh; jest to wzrost o 57,9% w stosunku do jazdy przy priorytetowym zielonym świetle na skrzyżowaniu.

Uwagi i wnioski końcowe

Przejazdy tramwajów przy minimalnym zużyciu energii są możliwe na podstawie umiejętnego sterowania ruchem. Dla projektantów i programistów jest inspirujące to, że dla zadanej długości trasy i określonego całkowitego czasu jazdy tramwaju, dzięki opracowanemu algorytmowi, który wyznacza najkorzystniejszy dobór czasu trwania rozruchu, fazy jazdy ze stałą prędkością, etapu wybiegu i hamowania, można uzyskać minimum zużycia energii elektrycznej pobieranej z sieci trakcyjnej. Oszczędności mogą dochodzić nawet do 20% w porównaniu z jazdą opartą na subiektywnych decyzjach motorniczego.

Optymalne sterowanie może w lepszy sposób zapewnić również jazdę tramwaju według rozkładu jazdy, co jest zgodne z oczekiwaniami pasażerów, wymagających regularnego, punktualnego kursowania pojazdów.

Dla ruchu miejskiego, zwłaszcza w dzielnicach centralnych, badanie optymalnego sterowania tylko jednego, samodzielnego tramwaju może być niewystarczające, gdyż pojawia się istotny wpływ jazdy innych tramwajów, które poruszają się w pobliżu. Na skrzyżowaniach może spotykać się kilka tramwajów nadjeżdżających z różnych kierunków. Istotne staje się odpowiednie działanie sygnalizacji świetlnej, aby uniknąć dłuższych nieplanowanych postojów.

Autorzy przewidują dalsze badania, które będą obejmować wzajemny wpływ ruchu tramwajów i samochodów.

Literatura

- [1] FRĄCKOWIAK J.: *Metoda obliczania jazd energooszczędnych pojazdu tramwajowego napędzanego trójfazowymi silnikami indukcyjnymi*. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1995.
- [2] GLIA R.S.: *Investigation of the influence of disturbances of the traffic of tram vehicles with series direct current motors on the forecasting of the subsequent energy saving run*. Doctor's thesis, Poznan University of Technology, Poznan 2005.
- [3] HALANGAU A.M.: *A new solution for the optimization of urban public transport consumption*. 11th Intern. Conf.: Modern Electric Traction, Warsaw 2013, p. 1–6.
- [4] KACPRZAK J.: *Automatyka i sterowanie elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.

- [5] NAWROWSKI R., ZIELIŃSKA M.: *Control of traction vehicles of minimum energy use*. Analysis, Control and Design, Vol. 1, AMSE Press, 1994.
- [6] RAWICKI S.: *Energooszczędne przejazdy tramwajów ze sterowanymi wektorowo silnikami indukcyjnymi w dynamicznym ruchu miejskim*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
- [7] RAWICKI S.: *Oprogramowanie dla komputerowego systemu skoordynowanej organizacji energooszczędnego ruchu pojazdów tramwajowych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe KOMEL” 109/2016, s. 115–120.
- [8] SZELĄG A.: *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, z. 123, Warszawa 2002.
- [9] ZIELIŃSKA M.: *Racjonalizacja zużycia energii w ruchu miejskim elektrycznych szynowych pojazdów trakcyjnych*. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1993.



mgr inż. Karol Chyła – Solaris Tram Sp. z o.o.,
e-mail: karol.chyla@gmail.com;
prof. dr hab. inż. Stanisław Rawicki – Politechnika Poznańska,
Wydział Elektryczny,
e-mail: stanislaw.rawicki@put.poznan.pl;
mgr inż. Marcin Urbański – Solaris Tram Sp. z o.o.,
e-mail: ubanski@wp.pl

artykuł recenzowany