

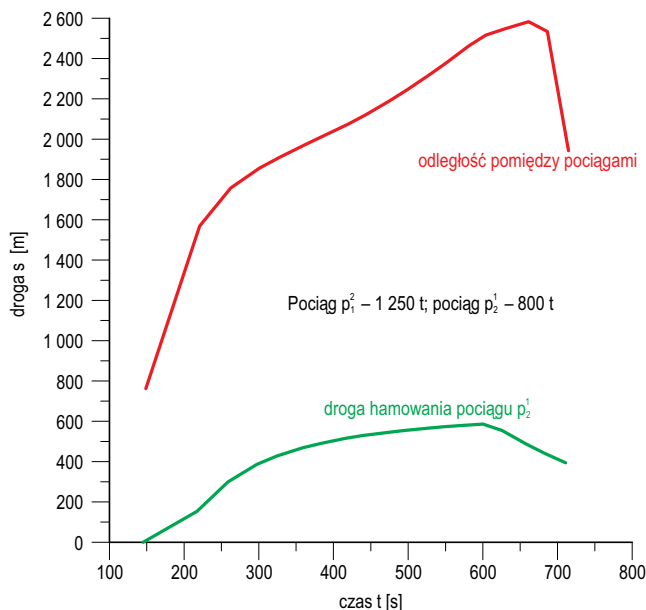
Sterowanie ruchem pociągów na odcinku linii kolejowej

W czasie jazdy występują losowe zakłócenia w ruchu pociągów. W przypadku wystąpienia takiego zakłócenia nastąpi zmniejszenie prędkości; należy wówczas w czasie rzeczywistym wyznaczyć jazdę na dalszą część odcinka. Następnie należy sprawdzić, czy w związku ze zmniejszeniem się prędkości pociągu poprzedzającego jazda pociągu następnego będzie bezpieczna. Jeżeli jazda następnego pociągu będzie zagrażać bezpieczeństwu ruchu, to należy wyznaczyć nową jazdę. Jazda bezpieczna sprawi, że w przypadku nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego pociąg następnym przy hamowaniu służbowym zatrzyma się w odległości odcinka ochronnego. W przypadku, gdy nie zostanie włączone hamowanie, pociąg następnym dojedzie do końca pociągu poprzedzającego w czasie nie krótszym niż założony odstęp czasu. Dany odstęp czasu powoduje, że na odcinku zachowany jest określony stopień bezpieczeństwa w prowadzeniu ruchu. Stopień bezpieczeństwa ruchu pociągów znacznie wzrosnie po wprowadzeniu w czasie rzeczywistym identyfikacji parametrów ruchu pociągu.

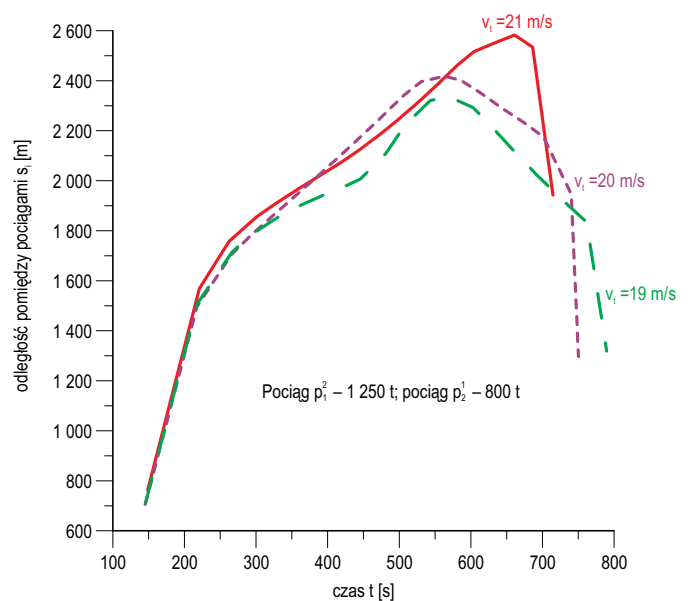
Na odcinku linii kolejowej pomiędzy kolejnymi pociągami istnieją odstępy blokowe, które zapewniają bezpieczne prowadzenie ruchu pociągów. Stałe odstępy blokowe powodują stosunkowo duże ograniczenia przepustowości linii kolejowej. W celu zwiększenia przepustowości linii wprowadzono więc ruchome odstępy blokowe pomiędzy pociągami [1, 2], przy czym wyróżnia się bezwzględny ruchomy odstęp blokowy oraz względny ruchomy odstęp blokowy. Ruchomy odstęp blokowy sprawia, że w przypadku nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego p_1 pociąg następnym – p_2 – przy hamowaniu służbowym zatrzyma się w odległości odcinka ochronnego.

Przy coraz większych prędkościach, jakie osiągają pociągi, bardzo ważne jest bezpieczeństwo ruchu. W związku z tym dąży się do automatycznego prowadzenia pociągu bez udziału maszynisty. Dąży się również do tego, aby w czasie rzeczywistym możliwe było wyznaczanie nowej jazdy od momentu zakłócenia na dalszą część odcinka. Jazda ta zostanie zapisana w postaci szeregu danych (droga, czas i prędkość) w tablicy. Następnie dokonuje się sprawdzenia na podstawie tych danych, czy jazda następnego pociągu ma zapewniony założony stopień bezpie-

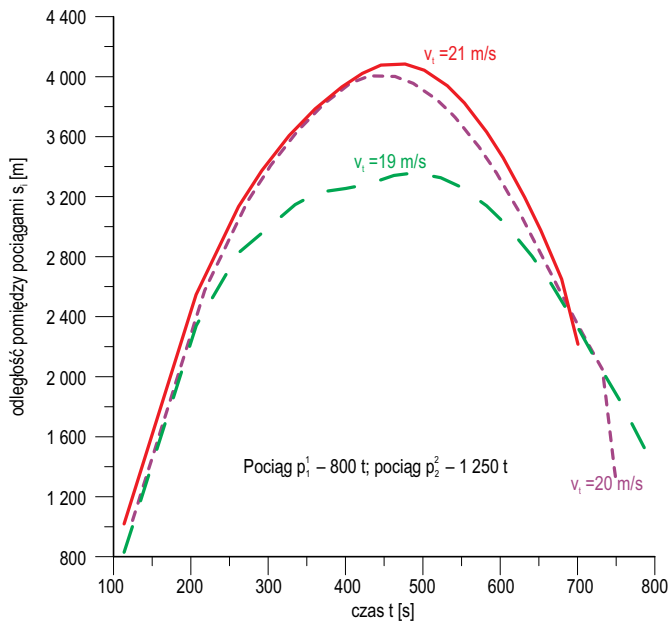
czeństwa. Jazda bezpieczna służy temu, by w przypadku nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego pociąg następnym – przy hamowaniu służbowym – zatrzymał się w odległości odcinka ochronnego. W przypadku, gdy hamowanie nie zostanie włączone, pociąg następnym dojedzie do końca pociągu poprzedniego w czasie nie krótszym niż założony odstęp czasu. Czas ten oznaczono symbolem t_{oc} . Dany odstęp czasu powoduje, że na odcinku w prowadzeniu ruchu zachowany jest określony stopień bezpieczeństwa. Jeżeli dojdzie do zakłócenia ruchu pociągu poprzedzającego, jazda następnego pociągu nie będzie bezpieczna. Wówczas należy wyznaczyć nową jazdę następnego pociągu w taki sposób, aby jazda ta była optymalna ze względu na zużycie energii dla danych parametrów ruchu z zachowaniem założonego stopnia bezpieczeństwa. Wszystkie te jazdy wyznaczane są w czasie rzeczywistym, w sposób automatyczny, na podstawie danych o przebiegu jazdy poprzedniego pociągu. W przedstawionym programie można wyznaczyć zarówno jazdę pociągu, jak również dokonać weryfikacji parametrów ruchu, do których zaliczamy masę pociągu i opory ruchu. Ponieważ masa pociągu podawana jest najczęściej w sposób przybliżony, a opory ruchu



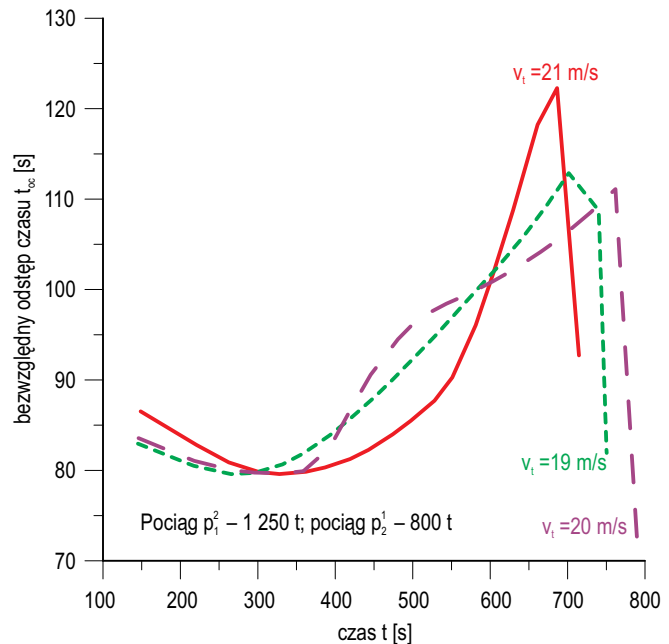
Rys. 1. Odległość pomiędzy pociągami oraz droga hamowania pociągu p_2^1 w zależności od czasu jazdy na odcinku s_k dla prędkości technicznej $v_t = 21$ m/s
Źródło: oprac. własne.



Rys. 2. Odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy na odcinku s_k dla różnych prędkości technicznych
Źródło: oprac. własne.



Rys. 3. Odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy na odcinku s_k dla różnych prędkości technicznych
Źródło: oprac. własne.



Rys. 4. Bezwzględny odstęp czasu pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy pociągów na odcinku s_k dla różnych prędkości technicznych
Źródło: oprac. własne.

zależą od stanu technicznego taboru, weryfikacja w czasie rzeczywistym spowoduje, że pociąg stanie się praktycznie obiektem obserwowalnym. Przyspieszenie pociągu będzie zatem proporcjonalne do siły pojazdu trakcyjnego, ruch pociągu będzie zgodny z jego sterowaniem. Można będzie określić w każdej chwili – ze stosunkowo dużą dokładnością – położenie pociągu oraz jego trajektorię ruchu. Odchylenie od tej trajektorii może być spowodowane powiększeniem zasadniczych oporów ruchu na skutek zahamowania zestawu, uszkodzenia łożyska itp. W każdej chwili podczas jazdy można dokonać diagnostyki części ruchomych pociągu, co niewątpliwie zwiększy bezpieczeństwo ruchu. Przez analogię do prowadzenia pociągu z ruchomym odstępem blokowym nazwano takie prowadzenie pociągów prowadzeniem ze względnym i bezwzględnym odstępem czasu. Badania symulacyjne przeprowadzone zostały dla pociągów o różnym składzie wagonów na poziomym i prostym odcinku linii kolejowej dla następujących parametrów ruchu [5, 6]:

- ❖ długość odcinka $s_k = 15\ 000$ m,
- ❖ lokomotywa elektryczna prądu stałego typu BoBo o mocy $p_h = 2500$ kW i prędkości maksymalnej $v_m = 40$ m/s,
- ❖ wagony towarowe czteroosiowe o masie równej $m_w = 50$ t,
- ❖ skład wagonów $m_{w1} = 16 \times 50 = 800$ t oraz $m_{w2} = 25 \times 50 = 1250$ t,
- ❖ długość pociągów $d_{p1} = 340$ m oraz $d_{p2} = 520$ m,
- ❖ prędkość techniczna pociągów $v_t = 19; 20; 21$ m/s.

Jazda pociągu na odcinku optymalizowana jest ze względu na zużycie energii w pojeździe trakcyjnym i układzie zasilania. Jako zmienne decyzyjne przyjęto [4, 7]:

- ❖ v_g – prędkość górną (maksymalna prędkość pociągu na odcinku),
- ❖ s_d – drogę jazdy pod prądem
- ❖ β – stopień wzbudzenia obwodu magnetycznego silnika,
- ❖ s_h – początek drogi hamowania,
- ❖ t_{np} – czas następstwa pociągu,

Dane początkowe i dane końcowe:

- ❖ dane początkowe $s_p, v_p, t_p,$
- ❖ dane końcowe $s_k, v_k, t_k.$

Jako warunek konieczny przyjęto, że w przypadku zatrzymania się w dowolnym miejscu na odcinku pociągu poprzedzającego p_1 pociąg następny p_2 musi zatrzymać się przy hamowaniu służbowym w odległości odcinka ochronnego za pociągiem p_1 . Warunkiem dostatecznym jest to, aby odstęp czasu t_{oc} w czasie jazdy pociągu był większy od zadanego odstepu czasu T_o . Przy wyznaczaniu jazdy pociągu w każdym kroku obliczeniowym wyznaczana jest droga hamowania służbowego oraz wyznaczane są zależności matematyczne w postaci następujących nierówności:

$$g_1^i = (s_{p2}^i(t^i) + s_{h2}^i + s_{ob} + d_{p1}^i) - s_{p1}^i(t^i) \leq 0 \quad (1)$$

$$g_2^i = t_{oc}(t^i) - T_o \leq 0$$

gdzie:

- s_{p1}^i – droga pociągu p_1 ,
- s_{p2}^i – droga pociągu p_2 ,
- s_{h2}^i – droga hamowania służbowego pociągu p_2 ,
- s_{ob} – odcinek ochronny,
- $i=1 \dots n$ – liczba kroków niezbędna do wyznaczenia jazdy pociągu,
- t_{oci} – odstęp czasu pomiędzy pociągami,
- T_o – zadany odstęp czasu pomiędzy pociągami,
- t^i – czas.

W przypadku, gdy nierówności (1) nie będą spełnione, do funkcji kryterialnej dodawana jest kwadratowa funkcja kary w postaci następującej zależności:

$$f = j + r_0 \sum_{i=1}^n ((g_1^i)^2 + (g_2^i)^2) \quad (2)$$

gdzie:

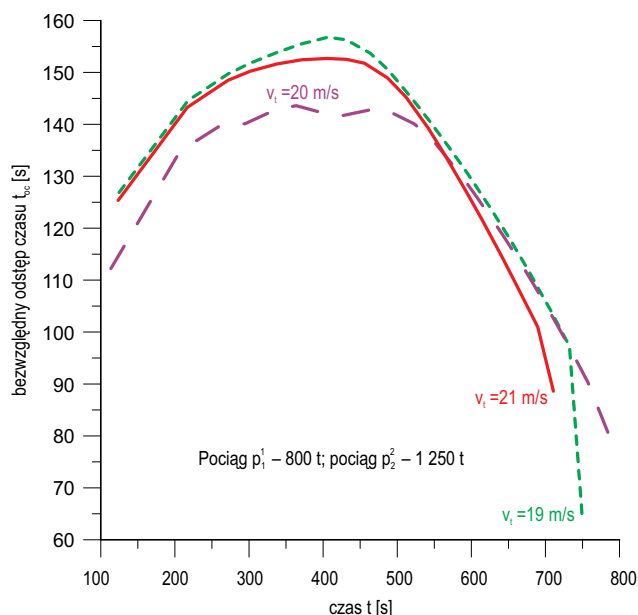
- j – jednostkowe zużycie energii,
- r_0 – promień zbieżności.

Wyznaczanie jazdy następnego pociągu p_2 na odcinku linii

Po dokonaniu optymalizacji jazdy pociągu poprzedzającego p_1 na odcinku jazda ta została zapisana i dołączona w postaci tablicy do programu, w którym wyznaczana jest jazda pociągu następnego p_2 [7]. Czas następstwa t_{np} dodaje się do czasu jazdy pociągu p_1 w celu wyznaczenia jego położenia. Następnie wyznaczana jest droga hamowania służbowego pociągu p_2 w celu sprawdzenia, czy spełniona zostanie nierówność (1). W przypadku niespełnienia tej nierówności do funkcji kryterialnej dodaje się funkcję kary za przekroczenie ograniczeń. Zadaniem programu jest wyznaczenie sterowania optymalnego pociągu p_2 ze względu na zużycie energii przy jednoczesnym spełnieniu ograniczeń nałożonych na tę jazdę [9]. Na rys. 1 i 2 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k . Pociąg p_2^1 o masie wagonów $m_w = 800$ t odjechał z przystanku po czasie $t_{np} = 145$ s za pociągiem p_1^2 o masie $m_w = 1250$ t. Przyjęto odstęp czasu $T_0 = 80$ s.

Na rys. 1 przedstawiona została odległość pomiędzy pociągami oraz – dla porównania – droga hamowania pociągu p_2^1 w czasie jazdy na odcinku s_k . Z przebiegu tych wykresów wynika, że odległość pomiędzy pociągami jest o wiele większa niż droga hamowania pociągu p_2^1 ; świadczy to o istnieniu dużego marginesu bezpieczeństwa w prowadzeniu ruchu pociągów. Krytyczna jest chwila, kiedy pociąg p_1^2 rozpoczyna ruch z przystanku, a pociąg p_2^1 dojeżdża do tego przystanku. Na rys. 2 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami dla różnych prędkości technicznych. Prędkość techniczna pociągu w zasadniczy sposób nie wpływa na odległość pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k .

Na rys. 3 przedstawiono odległość pomiędzy pociągiem poprzedzającym p_1^1 (o masie $m_w = 800$ t) a pociągiem następnym p_2^2 (o masie $m_w = 1250$ t). Jeżeli masa pociągu p_1^1 jest mniejsza od masy pociągu p_2^2 , mniejszy jest czas następstwa i dużo większa jest odległość pomiędzy pociągami (niż w przypadku odwrotnej kolejności jazdy pociągów). Dla porównania na rys. 2 przedstawiono odległość pomiędzy pociągiem p_1^2 o masie $m_w = 1250$ t a pociągiem p_2^1 o masie $m_w = 800$ t. Pomimo tego, że czas na-



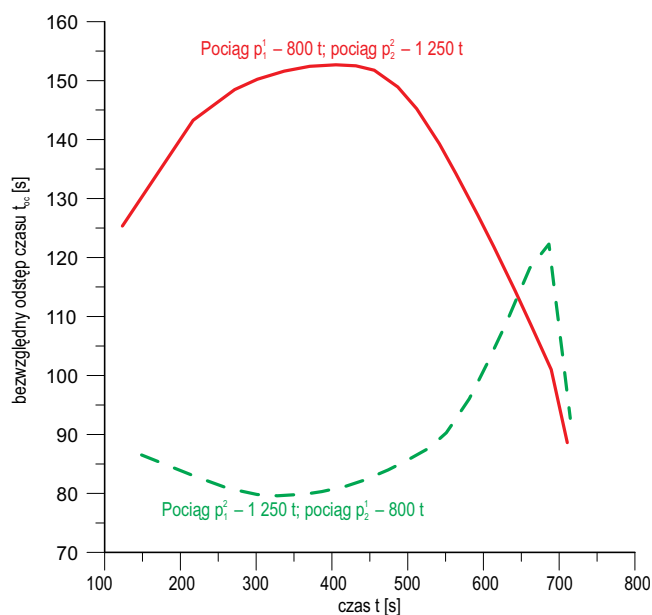
Rys. 5. Bezwzględny odstęp czasu pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy pociągów na odcinku s_k dla różnych prędkości technicznych
Źródło: oprac. własne.

stępstwa pociągu p_2^1 jest większy, odległość pomiędzy tymi pociągami jest zdecydowanie mniejsza.

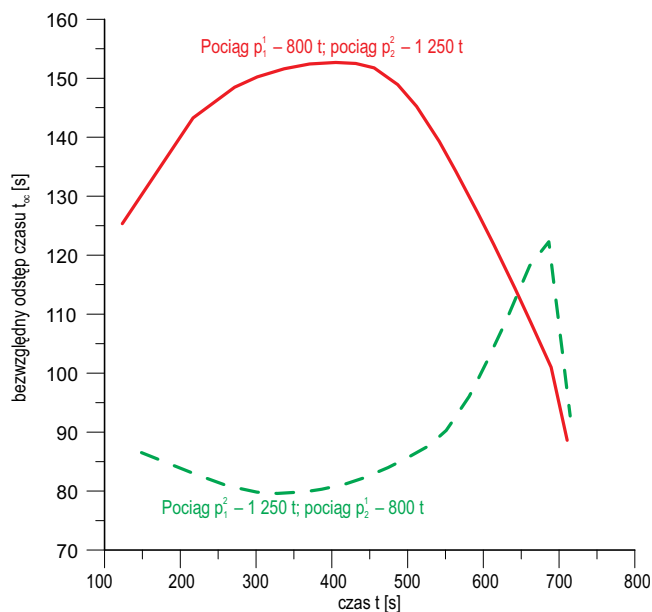
Na rys. 4 i 5 przedstawiono bezwzględny odstęp czasu pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k dla różnych prędkości technicznych i różnych mas pociągów. Jeżeli masa pociągu poprzedzającego p_1^1 jest mniejsza, wykres odstępu czasu jest wklęsły (z charakterystycznym załamaniem na końcu). Natomiast dla większej masy pociągu poprzedzającego p_1^2 wykres odstępu czasu jest wypukły. Prędkość techniczna pociągu nie ma zasadniczego wpływu na przebieg wykresu odstępu czasu w czasie jazdy pociągu na odcinku s_k . Krytyczny jest moment, gdy pociąg p_1 rusza z przystanku, a p_2 zbliża się do tego przystanku.

Analiza sterowania następnego pociągu p_2

Sterowanie następnego pociągu p_2 powinno zapewnić maksimum bezpieczeństwa przy możliwie dużej przepustowości linii i minimalnym zużyciu energii dla danej prędkości technicznej. Bezpieczeństwo ruchu pociągów zależy od prędkości technicznej oraz czasu następstwa pociągów. Celem opracowania jest dokonanie oceny bezpieczeństwa ruchu na podstawie czasu następstwa pociągów, odległości pomiędzy pociągami w czasie jazdy oraz prędkości technicznej pociągu na odcinku s_k . Na podstawie wykresów odległości pomiędzy pociągami, które przedstawiono na rys. 1–3, bardzo trudno jest ocenić margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu. Wprowadzono więc nową miarę, która – w przypadku ruchu jednorodnego – wydaje się miarą obiektywną, za pomocą której można ocenić bezpieczeństwo prowadzenia ruchu pociągów. Jest to chwilowy odstęp czasu, występujący pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k . Czas ten liczony jest od chwili nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego p_1 do momentu, w którym pociąg następny p_2 dojedzie do końca pociągu poprzedzającego, w którym – pomimo zatrzymania się pociągu poprzedzającego – nie włączono hamowania. Oczywiście, im większy będzie odstęp czasu, tym większy będzie margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. Duży czas następstwa występuje przy stosunkowo niewielkim natężeniu



Rys. 6. Bezwzględny odstęp czasu pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnych kolejności pociągów na odcinku s_k . Prędkość techniczna $v_t = 21$ m/s
Źródło: oprac. własne.



Rys. 7. Odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnej kolejności pociągów na odcinku s_k . Prędkość techniczna pociągu to $v_t = 21$ m/s

Źródło: oprac. własne.

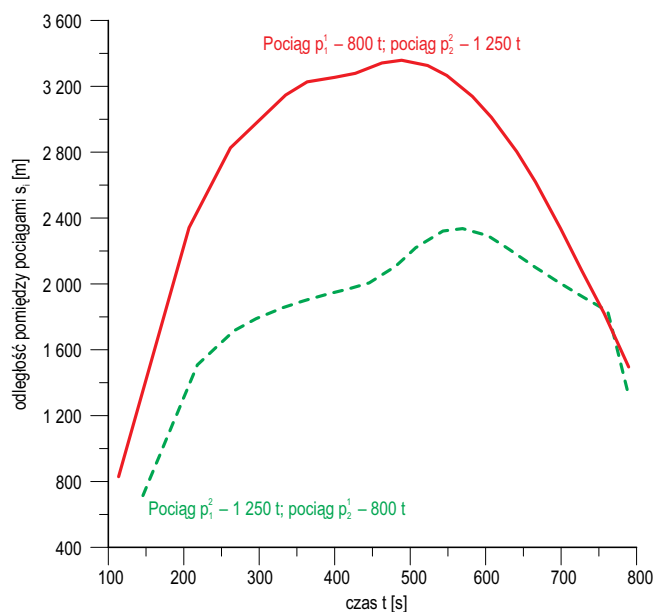
ruchu pociągów. Celem opracowania jest wyznaczenie dla danej prędkości technicznej pociągu na odcinku s_k takiego sterowania i takiego czasu odjazdu następnego pociągu, aby odstęp czasu w przybliżeniu był stały w czasie jazdy na odcinku i odpowiadał założonemu marginesowi bezpieczeństwa prowadzenia ruchu.

Na rys. 7 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k dla mniejszej masy, a następnie – w celu porównania – dla większej masy pociągu p_1 . Odległość pomiędzy pociągami o mniejszej masie p_1 jest zdecydowanie większa (pomimo mniejszego czasu następstwa). Natomiast dla większej masy pociągu p_1 czas następstwa pociągu p_2 jest większy; pomimo tego odległość pomiędzy kolejnymi pociągami jest znacznie mniejsza niż w sytuacji, kiedy masa pociągu p_1 jest mniejsza.

Na rys. 6 przedstawiono dla ww. przypadków odstęp czasu pomiędzy pociągami w czasie jazdy pociągów na odcinku s_k . W przypadku mniejszej masy pociągu poprzedzającego p_1 , w porównaniu z pociągiem następnym p_2 , odstęp czasu, podobnie jak odległość pomiędzy pociągami, rośnie, osiąga maksimum, a następnie maleje. Natomiast gdy mówimy o innej kolejności jazdy pociągów, tzn. masa pociągu p_1 jest większa niż p_2 , odstęp czasu pomiędzy pociągami maleje w czasie jazdy, osiąga minimum, a następnie rośnie. Na rys. 8 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami dla mniejszej prędkości technicznej pociągu. Zmniejszenie prędkości technicznej pociągu z 21 do 19 m/s powoduje znaczne zmniejszenie zarówno maksymalnej odległości, jak i maksymalnego odstępu czasu pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku s_k .

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy sterowania pociągu następnego p_2 stwierdzono, że sterowanie odległością pomiędzy pociągami jest skomplikowane. Odległość pomiędzy pociągami o podobnym składzie zmienia się znacznie. Odległość między pociągami na odcinku s_k zależy zarówno od czasu następstwa, jak i prędkości technicznej pociągu. W związku z tym bardzo trudne jest prowadzenie pociągu ze zmiennym odstępem



Rys. 8. Odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy na odcinku s_k dla prędkości technicznej pociągu $v_t = 19$ m/s

Źródło: oprac. własne.

blokowym, w którym zapewniony ma być stały margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu. Sterowanie optymalne pociągu – ze względu na zużycie energii – przy zachowaniu stałego marginesu bezpieczeństwa wymaga, aby właściwie dobrany był odstęp czasu. Za pomocą odległości pomiędzy pociągami trudno jest określić margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. Jak wykazano w pracy [10], dla ruchu jednorodnego odstęp czasu jest praktycznie stały w czasie jazdy pociągów na odcinku s_k . Dla ruchu jednorodnego wystarczy sprawdzić w kilku punktach odstęp czasu, natomiast dla ruchu pociągów o różnych masach należy kontrolować odstęp czasu w regularnych odstępach drogi. Bezpieczeństwo ruchu pociągów na odcinku łatwiej jest określić za pomocą zadanego odstępu czasu niż za pomocą odległości pomiędzy kolejnymi pociągami. W związku z tym autor proponuje prowadzenie pociągów za pomocą odstępu czasu. Bezpieczeństwo ruchu pociągów znacznie wzrośnie, jeżeli w czasie rzeczywistym dokonywana będzie identyfikacja parametrów ruchu pociągu [9]. W wyniku identyfikacji parametrów, do których zaliczamy masę pociągu, zasadnicze opory ruchu oraz opory ośrodka, można określić w każdej chwili – ze stosunkowo dużą dokładnością – położenie pociągu oraz jego trajektorię ruchu. Odchylenie od tej trajektorii może być spowodowane powiększeniem zasadniczych oporów ruchu na skutek zahamowania zestawu, uszkodzenia łożyska itp. W każdej chwili podczas jazdy można dokonać diagnostyki części ruchomych pociągu, co niewątpliwie zwiększy bezpieczeństwo ruchu.

Bibliografia:

1. Bergiel K., Karbowiak H., *Automatyzacja prowadzenia pociągu*, EMI-PRESS, Łódź 2005.
2. Dąbrowa-Bajon M., *Podstawy sterowania ruchem kolejowym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
3. Dyduch J., Kornaszewski M., *Systemy sterowania ruchem kolejowym*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2003.
4. Findeisen W., Szymanowski W., Wierzbicki A., *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, Warszawa 1980.

5. Kałuża E., *Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej*, Politechnika Śląska, Gliwice 1994.
6. Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J., *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
7. Wnuk M., *Metoda wyznaczania optymalnych parametrów składu pociągu* [rozprawa doktorska], Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
8. Wnuk M., *Optymalizacja jazdy pociągu na odcinku linii kolejowej*, „Technika Transportu Szynowego” 2011, nr 5-6.
9. Wnuk M., *Optymalne sterowanie ruchem pociągu w czasie rzeczywistym*, XI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, Politechnika Krakowska, Zakopane 2004.
10. Wnuk M., *Sterowanie jednorodnym ruchem pociągów na odcinku linii*, „Napędy i Sterowanie” 2013, nr 7-8.
11. Wnuk M., *Wyznaczanie jazdy optymalnej pociągu na odcinku z ograniczeniem prędkości*, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 4.

Train traffic control at a railway line section

During train service random railway traffic disturbances take place. In case any disturbances in train motion and reduction of its speed occur it is necessary to determine the motion for the further part of the section in real time. Then it is necessary to check if due to the reduced speed of the foregoing train the motion of the next train would be safe. If the motion of the next train would be dangerous for railway traffic a new motion must be determined. Safe motion must provide that in case the foregoing train would brake the next train when braking would stop at the protective section distance behind the foregoing train, while in case braking would not be on, next train would reach the end of the foregoing train in time period not shorter than the assumed time. The given time period makes it possible to maintain an assumed degree of traffic safety. The railway traffic safety degree would considerably increase when identification of train motion parameters in real time would be introduced.

X KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

Zintegrowany transport publiczny w obsłudze miast i regionów

PublicTrans 2015

Zakopane, 21–23 października 2015

Tematem przewodnim konferencji będzie integracja różnych środków i technologii transportu publicznego w Polsce w aspekcie tworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu.

Obrady konferencji przebiegały będą w następujących obszarach problemowych:

- ⇒ polityka transportowa jako czynnik integracji systemów transportowych miast i regionów,
- ⇒ regulacja rynku przewozów pasażerskich i towarowych w miastach i regionach,
- ⇒ transport jako czynnik kreujący konkurencyjność miast i regionów,
- ⇒ konkurencja i współpraca operatorów w obsłudze miast i regionów,
- ⇒ finansowanie zintegrowanych systemów transportowych w miastach i regionach,
- ⇒ technologie integracji przewozów pasażerskich i towarowych w miastach i regionach,
- ⇒ logistyka miejska,
- ⇒ telematyczne systemy wspierania przewozów pasażerskich i towarowych w miastach i regionach,
- ⇒ funkcjonowanie ustawy o publicznym transporcie zbiorowym,
- ⇒ konstruowanie planów transportowych.
- ⇒ wykorzystanie unijnych środków pomocowych w publicznym transporcie zbiorowym.

Informacje o konferencji:

SITK RP O/Radom, 26-600 Radom, ul. prof. W. Krukowskiego 1

Tel./fax.: 48 360 26 97, tel. kom.: 695 985 185

e-mail: radom@sitkrp.org.pl

www.sitkrpradom.pl