

Sterowanie jednorodnym ruchem pociągów na odcinku linii

Mirosław Wnuk

1. Wprowadzenie

Na odcinku linii kolejowej pomiędzy kolejnymi pociągami istnieją odstępy blokowe, które zapewniają bezpieczne prowadzenie ruchu pociągów. Stałe odstępy blokowe powodują duże ograniczenia przepustowości linii kolejowej. W związku z tym, w celu zwiększenia przepustowości linii, wprowadzono ruchomy odstęp blokowy pomiędzy pociągami. Przy czym wyróżnia się bezwzględny ruchomy odstęp blokowy oraz względny ruchomy odstęp blokowy [1, 2]. Bezwzględny odstęp blokowy to taki odstęp, który w przypadku nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego p_1 ma zapewnić, że pociąg następny p_2 przy hamowaniu służbowym zatrzyma się w odległości odcinka ochronnego za pociągiem p_1 . Natomiast przy wyznaczaniu względnego ruchomego odstępu blokowego uwzględnia się drogę nagłego hamowania pociągu p_1 . Względny odstęp blokowy to taki odstęp, który w przypadku zatrzymania się pociągu p_1 przy hamowaniu nagłym ma zapewnić, że pociąg p_2 przy hamowaniu służbowym zatrzyma się w odległości odcinka ochronnego za pociągiem p_1 . Badania symulacyjne zostały przeprowadzone na prostym i poziomym odcinku linii kolejowej dla następujących parametrów ruchu [5, 6]:

- długość odcinka $s_k = 15\,000$ m;
- pojazd trakcyjny 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;
- długość pociągu $d_p = 340$ m;
- prędkość techniczna pociągu jest równa $v_t = 21$ m/s.

Pociąg następny p_2 powinien być sterowany w taki sposób, aby odległość pomiędzy pociągami:

- była większa od odcinka ochronnego;
- w czasie jazdy pociągu następnego p_2 przy hamowaniu służbowym pociąg ten powinien zatrzymać się w odległości odcinka ochronnego za pociągiem p_1 w przypadku jego nagłego zatrzymania.

Jazda pociągu na odcinku optymalizowana jest ze względu na zużycie energii. Jako ograniczenia przyjęto dane początkowe i końcowe oraz czas jazdy na odcinku. Sterowanie pociągu musi być tak dobrane, aby nie przekroczył dopuszczalnej temperatury silnika. Jako zmienne decyzyjne przyjęto [4, 7]:

- v_g – prędkość górna (maksymalna prędkość pociągu na odcinku);
- s_d – droga jazdy pod prądem;
- β – stopień wzbudzenia obwodu magnetycznego silnika;
- s_h – początek drogi hamowania;

(1)

Streszczenie: Prowadzenie pociągów ze stałym odstępem blokowym powoduje stosunkowo duże ograniczenie przepustowości linii kolejowej, w związku z czym wprowadzono ruchome odstępy blokowe pomiędzy pociągami. Ponieważ odległość pomiędzy pociągami zmienia się w czasie jazdy na odcinku w bardzo szerokich granicach, w dużym stopniu utrudnia to prowadzenie pociągu z zadanym marginesem bezpieczeństwa. Autor proponuje więc prowadzenie pociągów ze stałym odstępem czasu. Czas ten liczony jest od chwili przypadkowego zatrzymania się pociągu poprzedzającego w dowolnym miejscu na odcinku do chwili, w której może nastąpić kolizja z pociągiem następnym, w przypadku niewłączenia w nim hamowania. Prowadzenie pociągów ze stałym odstępem czasu oznacza, że ruch pociągów prowadzony jest ze stałym marginesem bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: sterowanie pociągu, stały odstęp czasu

Abstract: driving trains with constant spacing results in a relatively large block limited capacity of the railway line, therefore, introduced movable block spacing between trains. Since the distance between the trains change while driving on the section within very wide limits, to a large extent hinder the operation of a train with a predetermined safety margin. The author suggests, so running trains with a fixed time interval. The time is counted from the moment of accidental stop the train before anywhere in the episode until that could result in a collision with a train next time, if it does not include braking. Driving trains with a constant time interval means that the movement of trains is carried out with a fixed safety margin.

Keywords: control of the train, fixed interval of time

droga, czas, prędkość początkowa i końcowa pociągu:

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

Sterowanie pociągu następnego p_2 musi zapewnić zatrzymanie pociągu przy hamowaniu służbowym w odległości odcinka ochronnego za pociągiem poprzedzającym p_1 , gdy ten zatrzyma się w jednej chwili. W związku z tym przy wyznaczaniu jazdy pociągu w każdym kroku obliczeniowym wyznaczana jest zarówno droga hamowania pociągu p_2 , jak i zależność analityczna w postaci następującej nierówności:

$$g_1^i = (s_{p2}^i(t^i) + s_{h2}^i + s_{ob} + d_p^1) - s_{p1}^i(t^i) \leq 0 \quad (2)$$

gdzie:

- s_{p1}^i – droga pociągu p_1 ;
- d_{p1} – długość 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_i – czas.

W przypadku, gdy nierówność (2) nie będzie spełniona, wówczas do funkcji kryterialnej dodawana jest kwadratowa funkcja kary w postaci następującej zależności:

$$f = j + r_0 \sum_{i=1}^n (g_1^i)^2 \quad (3)$$

gdzie:

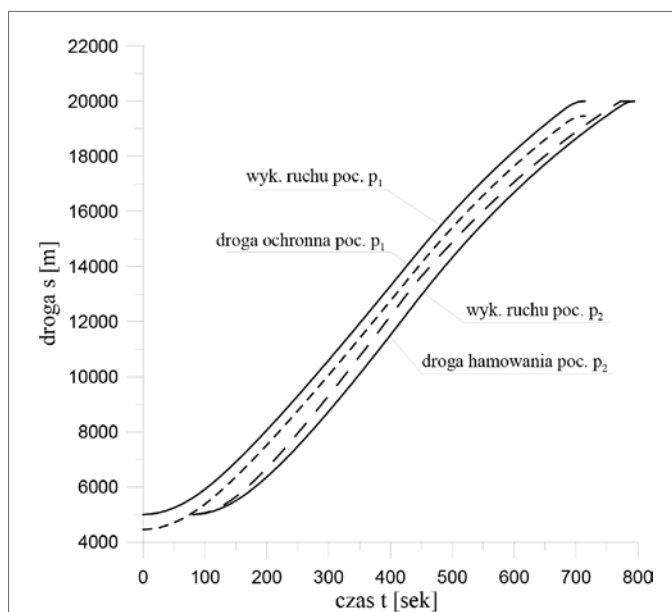
- j – jednostkowe zużycie energii;
- r_0 – promień zbieżności.

2. Wyznaczenie jazdy pociągu następnego p_2 na odcinku linii

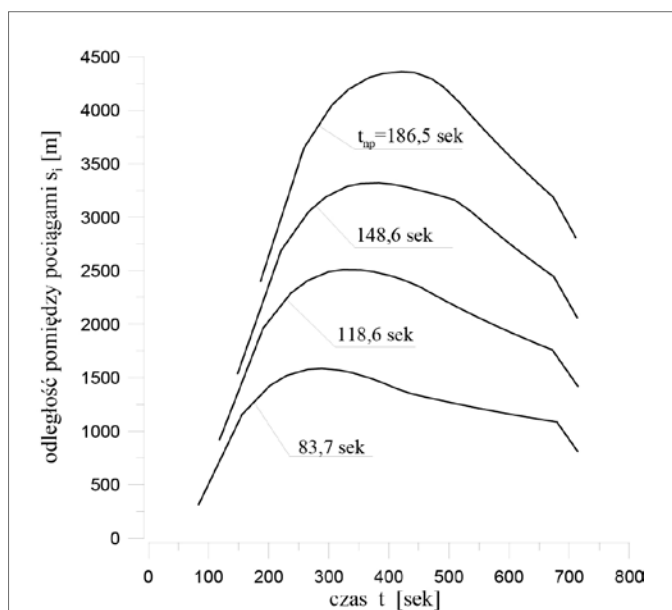
Po wyznaczeniu jazdy optymalnej pociągu poprzedzającego p_1 na odcinku linii, jazda ta zostanie następnie wpisana w postaci tablicy do programu, w którym wyznaczana jest jazda pociągu następnego p_2 [7, 8]. W programie tym wyznaczono t_{np} – czas odjazdu pociągu p_2 , w następujący sposób. Pociąg p_2 nie może ruszyć z przystanku wcześniej niż pociąg p_1 pokona odcinek równy długości pociągu p_1 plus długość odcinka ochronnego s_{ob} . Następnie czas odjazdu t_{np} został dodany do czasu jazdy pociągu p_1 w celu wyznaczenia, w którym miejscu znajduje się on na odcinku w zależności od czasu jazdy. Następnie wyznaczono drogę hamowania służbowego pociągu p_2 w celu sprawdzenia, czy spełniona została nierówność (2). W przypadku niespełnienia tej nierówności dodaje się ją w postaci kwadratowej funkcji kary (3) do funkcji kryterialnej. Zadaniem programu jest wyznaczenie sterowania optymalnego pociągu p_2 ze względu na zużycie energii oraz wyznaczenie czasu odjazdu w taki sposób, aby spełniona była nierówność w każdym przedziale (kroku obliczeniowym programu jazdy).

Na rys. 1 przedstawiono wykres ruchu pociągu p_1 oraz wykres drogi ochronnej o długości równej sumie długości pociągu d_{p1} i odcinka ochronnego s_{ob} . Po czasie równym $t_{np} = 80,7$ s pociąg p_2 rozpoczął jazdę. Sterowanie pociągu p_2 powinno zapewnić zatrzymanie się pociągu przy hamowaniu służbowym w odległości odcinka ochronnego za pociągiem p_1 wówczas, gdy ten ostatni zatrzyma się przypadkowo w czasie równym zero. Na rys. 1 drogę hamowania pociągu p_2 zaznaczono linią przerywaną, droga ta nie przecina drogi ochronnej pociągu p_1 , co oznacza, że sterowanie pociągu p_2 zostało wyznaczone poprawnie.

Na podstawie wykresów ruchu pociągów przedstawionych na rys. 1 trudno jest dokonać analizy jazdy tych pociągów. Nie można określić, jak zmienia się odległość pomiędzy kolejnymi pociągami w zależności od prędkości i czasu jazdy na odcinku. W związku z tym na rys. 2 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnych czasów następstwa. Pociągi te prowadzone są z bezwzględnym ruchowym odstępem blokowym. Ze wzrostem czasu następstwa t_{np} zwiększa się odległość pomiędzy pociągami, a tym samym



Rys. 1. Wykresy ruchu pociągu poprzedzającego p_1 i pociągu następnego p_2 , który rozpoczął jazdę po czasie równym $t_{np} = 80,7$ s



Rys. 2. Odległość pomiędzy pociągami w czasie jazdy dla różnych czasów następstwa pociągów t_{np} prowadzonych z bezwzględnym ruchowym odstępem blokowym

wzrasta margines bezpieczeństwa. Na rys. 3 przedstawiono odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnych odcinków ochronnych. W celu porównania przedstawiono na wykresie odległość pomiędzy pociągami dla prowadzenia pociągów z bezwzględnym oraz względnym ruchowym odstępem blokowym.

3. Analiza sterowania pociągu następnego p_2

Prowadzenie pociągu następnego p_2 powinno być takie, aby zapewnić maksimum bezpieczeństwa przy możliwie dużej

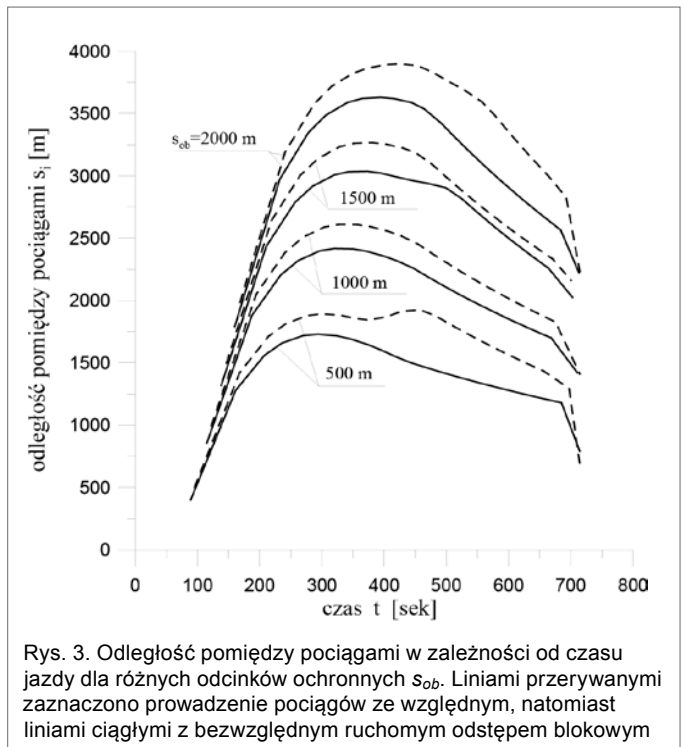
przepustowości linii i minimalnym zużyciu energii dla danej prędkości technicznej. Bezpieczeństwo jazdy jest większe dla mniejszego natężenia ruchu i dla mniejszej prędkości technicznej, natomiast celem opracowania jest wyznaczenie takiego sterowania pociągu, aby dla danej prędkości technicznej uzyskać maksymalny margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu. Wykresy ruchu tych pociągów przedstawiono na rys. 1, a wynika z nich, że droga hamowania służbowego pociągu p_2 nie przecina drogi ochronnej pociągu p_1 w czasie jazdy na odcinku. Jeżeli droga hamowania służbowego pociągu p_2 nie przecina drogi ochronnej pociągu p_1 , to znaczy, że pociąg p_2 jest prowadzony w sposób bezpieczny. Z tego jednak nie można wyciągnąć wniosku, jaki jest stopień tego bezpieczeństwa, czy stopień bezpieczeństwa jest stały w czasie jazdy na całym odcinku oraz w jaki sposób zależy on od prędkości technicznej pociągu. Niekiedy trudno jest określić, w jaki sposób bezpieczeństwo ruchu pociągu zależy od czasu następstwa, odległości pomiędzy pociągami w czasie jazdy, prędkości technicznej itp. W tym celu na podstawie jazd pociągów p_1 i p_2 wyznaczono odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy. Odległość pomiędzy pociągami bardzo szybko rośnie na początku jazdy, osiąga wartość maksymalną, a następnie zaczyna powoli maleć. Odległość ta jest zdecydowanie większa dla pociągu, którego czas następstwa jest większy. Z wykresów przedstawionych na rys. 2 i 3, na których przedstawiono odległości pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnych czasów następstwa oraz różnych odcinków ochronnych, można w sposób ogólny wyciągnąć wnioski dotyczące bezpieczeństwa ruchu pociągów. Można tylko ogólnie stwierdzić, że ze wzrostem odległości pomiędzy kolejnymi pociągami zwiększa się bezpieczeństwo ruchu, natomiast trudno jest określić, w jakim stopniu ono się zwiększa. Za pomocą czasu następstwa, jak i wielkości odcinka ochronnego nie można określić w sposób jednoznaczny stopnia bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. W związku z tym autor zaczął poszukiwać nowej miary, za pomocą której możliwe będzie w sposób przybliżony dokonanie oceny bezpieczeństwa ruchu. Wprowadzono więc nową miarę, za pomocą której, zdaniem autora, można ocenić stopień bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. Jest to chwilowy odstęp czasu występujący pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku. Czas ten liczony jest od chwili nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego p_1 do momentu, w którym może nastąpić kolizja z pociągiem następnym p_2 w przypadku niewłączenia w nim hamowania służbowego. Oczywiście, im większy będzie odstęp czasu, tym większy będzie stopień bezpieczeństwa przy prowadzeniu ruchu pociągów. Duży czas następstwa występuje przy stosunkowo niewielkim natężeniu ruchu pociągów. Celem opracowania jest wyznaczenie dla danej prędkości technicznej pociągu takiego sterowania i takiego czasu odjazdu pociągu p_2 , aby odstęp czasu w przybliżeniu był stały w czasie jazdy na odcinku i odpowiadał założonemu stopniowi bezpieczeństwa. W tym celu do programu dołączono nierówność w postaci następującej zależności matematycznej:

$$g_2^i = t_{oc}^i - T_o \leq 0 \quad (4)$$

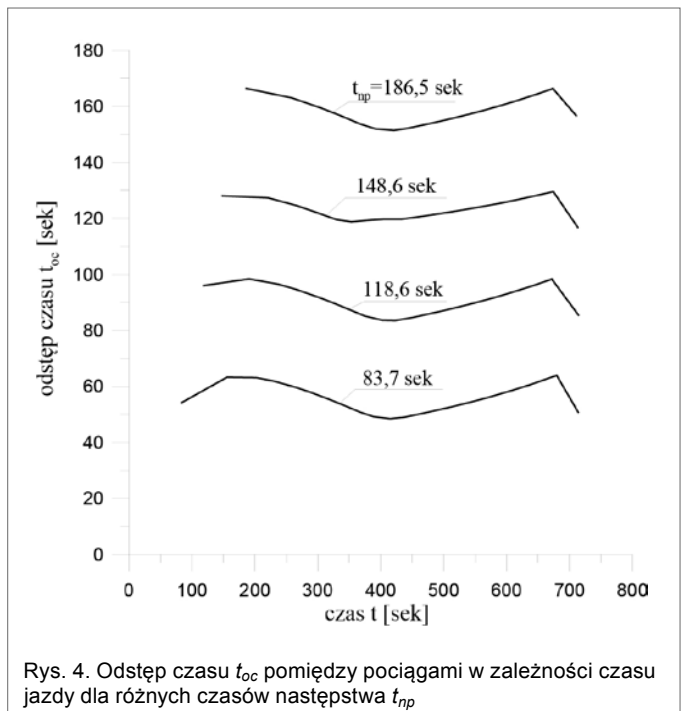
gdzie:

t_{oc}^i – odstęp czasu pomiędzy pociągami;

T_o – zadany odstęp czasu pomiędzy pociągami.



Rys. 3. Odległość pomiędzy pociągami w zależności od czasu jazdy dla różnych odcinków ochronnych s_{ob} . Liniami przerywanymi zaznaczono prowadzenie pociągów ze względnym, natomiast liniami ciągłymi z bezwzględnym ruchomym odstępem blokowym



Rys. 4. Odstęp czasu t_{oc} pomiędzy pociągami w zależności czasu jazdy dla różnych czasów następstwa t_{np}

Wówczas funkcja kryterialna przyjmie następującą postać:

$$f = j + r_0 \sum_{i=1}^n ((g_1^i)^2 + ((g_2^i)^2)) \quad (5)$$

W przypadku, gdy nie będzie spełniona nierówność (2) lub (3), wówczas do funkcji kryterialnej (5) dodawana jest kwadratowa funkcja kary.

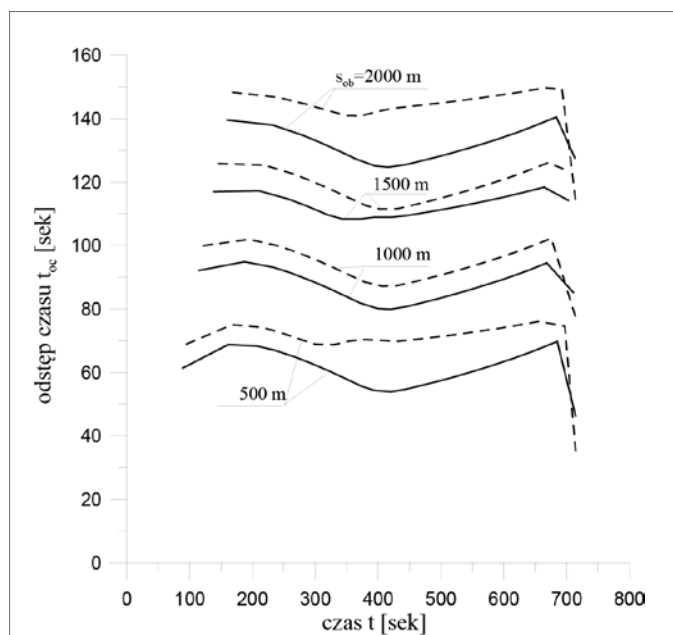
Na rys. 4 przedstawiono odstęp czasu t_{oc} występujący pomiędzy kolejnymi pociągami w czasie jazdy na odcinku dla różnych czasów następstwa pociągu p_2 . Wartość odstępu czasu zmienia się w niewielkich granicach, w pierwszym przybliżeniu można uznać ją za wartość stałą. Odległość pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku zmienia się w bardzo szerokich granicach, w pełni uzasadniona jest więc nazwa prowadzenie pociągu ze zmiennym odstępem blokowym. Ponieważ tak zdefiniowany odstęp czasu t_{oc} , który występuje pomiędzy kolejnymi pociągami na odcinku, praktycznie jest stały, odpowiednia nazwa dla takiego prowadzenia pociągów będzie brzmiała: prowadzenie pociągów z bezwzględnym odstępem czasu. Dla większego czasu następstwa zwiększa się odstęp czasu.

Na rys. 5 przedstawiono bezwzględny oraz względny odstęp czasu w zależności od czasu jazdy dla różnych odcinków ochronnych. Względny odstęp czasu jest to czas od chwili zatrzymania się pociągu p_1 po zahamowaniu go w sposób nagły, do momentu ewentualnej kolizji z pociągiem następnym p_2 , w którym z nieznanymi przyczyn nie włączono hamowania służbowego. Prowadzenie pociągu z względnym odstępem czasu wydaje się prostsze z uwagi na to, że jest możliwe takie prowadzenie pociągów, aby ten odstęp był praktycznie stały. Na rys. 5 przedstawiono wykresy względnego odstępu czasu, zaznaczono je liniami przerywanymi, które dla odcinków ochronnych równych $s_{ob} = 500$ i 2000 m można uznać za stałe w czasie jazdy pociągu na odcinku.

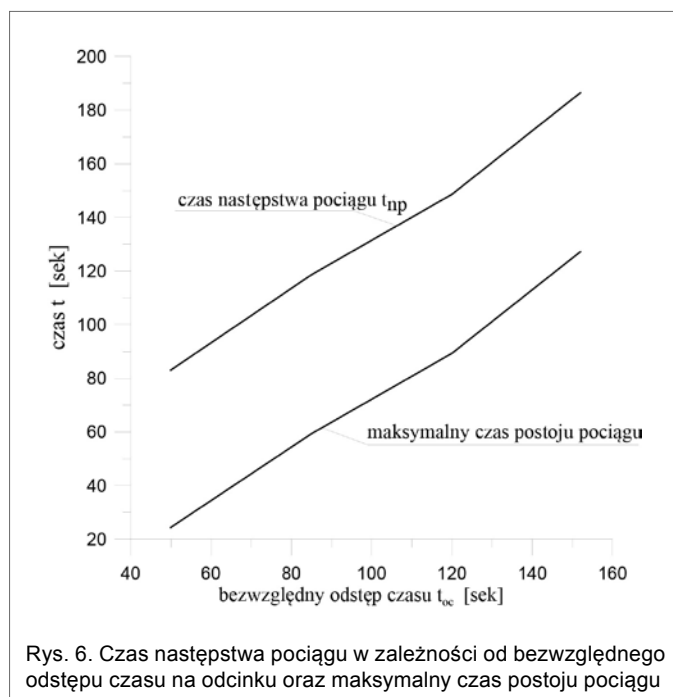
Na rys. 6 przedstawiony został wykres następstwa czasu pociągów w zależności od bezwzględnego odstępu czasu oraz dla tego czasu następstwa określony został maksymalny czas postoju pociągu na przystanku.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy sterowania ruchem pociągów stwierdzono, że stałe odstępy blokowe zapewniają stosunkowo duży margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu, niestety powodują znaczne ograniczenia przepustowości linii kolejowej. Wprowadzono więc zmienne odstępy blokowe, które wymagają, aby pociąg w każdej chwili był obiektem obserwowalnym. W tym przypadku prowadzenie pociągu odbywa się z centrum sterowania, w którym wyznaczana jest droga hamowania pociągu oraz odległość pomiędzy pociągami. Odległość pomiędzy pociągami o podobnym składzie, poruszających się z taką samą prędkością techniczną na odcinku, zmienia się w szerokich granicach. Odległość ta zależy zarówno od czasu następstwa, jak i prędkości technicznej pociągu. W związku z tym bardzo trudno jest prowadzić pociąg ze zmiennym odstępem blokowym, w którym zapewniony ma być stały margines bezpieczeństwa prowadzenia ruchu. Można tylko ogólnie stwierdzić, że ze wzrostem odległości pomiędzy kolejnymi pociągami zwiększa się bezpieczeństwo ruchu, natomiast trudno jest określić, jak zwiększa się stopień bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. Za pomocą czasu następstwa, jak i wielkości odcinka ochronnego nie można określić w sposób zadawalający stopnia bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. W związku z tym autor zaczął poszukiwać nowej miary, za pomocą której możliwe będzie w sposób przybliżony dokonanie oceny bezpieczeństwa ruchu. Wprowadzono więc nową miarę, za pomocą której można ocenić stopień bezpieczeństwa prowadzenia ruchu pociągów. Jest to chwilowy



Rys. 5. Odstęp czasu t_{oc} pomiędzy pociągami w zależności czasu jazdy dla różnych odcinków ochronnych s_{ob}



Rys. 6. Czas następstwa pociągu w zależności od bezwzględnego odstępu czasu na odcinku oraz maksymalny czas postoju pociągu

odstęp czasu występujący pomiędzy pociągami w czasie jazdy na odcinku. Czas ten liczony jest od chwili nagłego zatrzymania się pociągu poprzedzającego p_1 do momentu, w którym może nastąpić kolizja z pociągiem następnym p_2 wówczas, gdy w pociągu p_2 nie zostało włączone hamowanie służbowe i pociąg poruszał się zgodnie z wcześniej wyznaczonym rozkładem jazdy. Oczywiście im większy będzie odstęp czasu, tym większy będzie stopień bezpieczeństwa przy prowadzeniu ruchu pociągów. Autor proponuje więc prowadzenie ruchu pociągów ze stałym odstępem czasu pomiędzy pociągami. Stały odstęp czasu powoduje, że prowadzenie ruchu pociągów odbywa się ze stałym marginesem bezpieczeństwa. Prowadzenie ruchu pociąg-

gów zarówno ze stałym, jak i zmiennym odstępem blokowym nie zapewnia prowadzenia tego ruchu ze stałym marginesem bezpieczeństwa. Stopień bezpieczeństwa można zdecydowanie poprawić, jeżeli do programu jazdy dołączony zostanie podprogram, w którym można dokonać identyfikacji parametrów ruchu pociągu. Działanie programu polega na tym, że w czasie rzeczywistym w punktach pomiarowych, które umieszczono wzdłuż drogi, dokonuje się pomiaru prędkości i czasu jazdy pociągu. Następnie te wartości porównywane są z wartościami wyznaczonymi w programie jazdy symulacyjnej, a następnie dokonuje się analizy w czasie rzeczywistym. W programie identyfikacyjnym wyznaczane są rzeczywiste parametry pociągu, do których zaliczamy masę pociągu i zasadnicze opory ruchu. Następnie od danego punktu pomiarowego wyznaczana jest jazda optymalna pociągu z masą i oporami ruchu, które otrzymano w wyniku identyfikacji. Dzięki identyfikacji pociąg stał się obiektem obserwowalnym w każdej chwili. Równocześnie można dokonać diagnostyki układu biegowego pociągu poprzez wyznaczanie w każdym kroku obliczeniowym zasadniczych oporów ruchu. Program identyfikacyjny powoduje, że w każdej chwili znane jest położenie pociągu w czasie jazdy, co umożliwia zmniejszenie odcinka ochronnego i zwiększenie przepustowości linii kolejowej.

Literatura

- [1] BERGIEL K., KARBOWIAK H.: *Automatyzacja prowadzenia pociągu*. EMI- PRESS, Łódź 2005.

- [2] DĄBROWA-BAJON M.: *Podstawy sterowania ruchem kolejowym*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2007.
- [3] DYDUCH J., KOMASZEWSKI 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] KALUŻA E.: *Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej*. Politechnika Śląska skrypt. Gliwice 1994.
- [6] PODOSKI J., KACPRZAK J., MYSLEK J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. WKiŁ, Warszawa 1980.
- [7] WNUK M.: *Metoda wyznaczania optymalnych parametrów składu pociągu*. Politechnika Śląska Wydział Elektryczny – rozprawa doktorska, Gliwice 2002.
- [8] WNUK M.: *Optymalne sterowanie ruchem pociągu w czasie rzeczywistym*. XI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, s. 441–448. Politechnika Krakowska, Zakopane 2004.

dr inż. Mirosław Wnuk – emerytowany pracownik Wydziału Transportu PW

artykuł recenzowany