

Automatyczne sterowanie ruchem pociągu na odcinku o zmiennym profilu

Mirosław Wnuk

1. Wprowadzenie

W miarę zwiększania się natężenia ruchu i prędkości pociągów sterowanie pojazdu trakcyjnego przez maszynistę staje się coraz bardziej uciążliwe. Sterowanie takie przy dużych prędkościach ze względów bezpieczeństwa jest nawet niewskazane. W takim przypadku wprowadza się coraz powszechniej automatyczne sterowanie ruchem pociągu bez udziału maszynisty. W starszych rozwiązaniach rozruch i hamowanie pociągu przebiegało według stałego programu. Dla danego składu pociągu wyznaczana była trajektoria odniesienia i na tej podstawie rozmieszczano przy torze czujniki, które określały miejsca włączenia i wyłączenia napędu oraz miejsce rozpoczęcia hamowania. W starszych rozwiązaniach hamowanie przebiegało według stałego programu poprzez odpowiednie rozmieszczenie w torze czujników, które oddziaływały na pociąg. Urządzenia pojazdowe mierzą czas przejazdu pomiędzy tymi czujnikami i porównują z czasem odniesienia, który został wyznaczony dla odpowiedniej trajektorii hamowania. Jeżeli czas jazdy jest większy od czasu odniesienia, to pociąg jedzie wolniej, jeżeli jest mniejszy, to jedzie szybciej. Dokładne zatrzymanie pociągu w odpowiednim miejscu wymaga wielokrotnej zmiany siły hamowania. Sterowanie pociągu według stałego programu jest niedogodne i posiada następujące wady:

- bardzo trudno jest sterować danym składem pociągu, jeżeli nie jest znana dokładna jego masa;
- wymagane jest umieszczenie wielu czujników przy torze;
- trudno jest określić zasadnicze opory ruchu, ponieważ zależą one od masy składu, warunków atmosferycznych i stanu technicznego pociągu;
- nie można sterować pociągiem o innym składzie.

Powyższe wady można usunąć przez zastosowanie metody identyfikacji parametrów ruchu przedstawionej w artykule. Sposoby sterowania ruchem pociągu bardzo dobrze zostały opisane w literaturze [1, 2]. Automatyczne sterowanie ruchem pociągu, w przypadku, gdy nie są znane zarówno dokładna masa wagonów, jak i zasadnicze opory ruchu, jest utrudnione, ponieważ wymaga wielokrotnych włączeń i wyłączeń urządzeń napędowych i hamulcowych, a w dodatku taki sposób sterowania nie daje gwarancji uzyskania założonej prędkości technicznej pociągu. Nie można sterować w sposób optymalny pociągiem w przypadku, gdy nie są znane jego parametry ruchu [11, 12]. Celem opracowania jest przedstawienie automatycznego sterowania ruchem pociągu w sposób nowatorski. W czasie jazdy pociągu w poszczególnych punktach pomiarowych wykonywana jest w czasie rzeczywistym identyfikacja masy wagonów i zasadniczych oporów ruchu. Następnie dla tak wyznaczonych wartości parametrów ruchu wyznaczone zostaje ponownie

Streszczenie: Automatyczne sterowanie ruchem pociągu w czasie rzeczywistym wymaga znajomości dokładnej masy składu pociągu, oporów ruchu i profilu odcinka, na którym odbywa się jazda. W tym celu w punktach pomiarowych umieszczonych wzdłuż linii kolejowej, należy porównać chwilowe prędkości i czasy jazdy pociągu z wartościami wyznaczonymi w programie jazdy symulacyjnej. Na podstawie tych wartości w programie identyfikacyjnym można wyznaczyć dokładną masę pociągu i opory ruchu w sposób, który pozwoli automatycznie i optymalnie ze względu na zużycie energii sterować ruchem pociągu na odcinku.

Słowa kluczowe: automatyczne sterowanie pociągu.

Abstract: The automatic control of train movement in real time requires knowledge of the exact composition of the train mass, the resistance movement and the profile of the section in which you are driving. To do this, compare the measuring points located along the railway line, the instantaneous velocity and train times with the values set out in the program, driving simulation. From these values, the identification program can determine the exact weight of the train and the movement resistance in a way that will automatically and optimally because of the power consumption control the movement of a train over.

Keywords: automatic control of the train.

od danego punktu pomiarowego nowe sterowanie pociągu na pozostałą część odcinka. W tym celu przy torze należy umieścić czujniki dokonujące pomiaru prędkości pociągu. Prędkość pociągu należy porównać z prędkością wyznaczoną za pomocą jazdy symulacyjnej. Jeżeli wystąpi różnica w prędkościach, jest to oznaką, że przyjęte do obliczeń parametry pociągu (masa i opory ruchu) są różne od parametrów rzeczywistych. Czujników, które mają wpływ na masę wagonów i opory ruchu, jest bardzo dużo (zmiennie zapełnienie wagonów, warunki atmosferyczne, stan techniczny, przeładunek na stacjach pośrednich). W związku z tym prawidłowe określenie masy wagonów i oporów ruchu nastręcza szereg trudności. Okazuje się, że możliwa jest identyfikacja ww. parametrów pociągu w czasie rzeczywistym podczas jazdy pociągu. W tym celu opracowano program komputerowy, który ma za zadanie wyznaczyć masę składu wagonów, opory linii kolejowej dla tej masy oraz zasadnicze opory ruchu. Identyfikacji parametrów dokonuje się na podstawie porównania symulacyjnej jazdy pociągu z jazdą rzeczywistą

stą poprzez zestawienie ich prędkości i czasu jazdy w punktach pomiarowych. W przypadku wystąpienia różnicy pomiędzy trajektoriami rzeczywistą a wyznaczoną przez program komputerowy dokonuje się jej analizy. W wyniku tej analizy można wyznaczyć masę składu wagonów, zasadnicze opory ruchu oraz opory linii dla rozłożonej masy pociągu. Następnie dla tak wyznaczonych parametrów pociągu wyznaczone zostanie w czasie rzeczywistym nowe sterowanie pociągu – droga jazdy pod prądem, jazda z wybiegu oraz początek hamowania. Na drodze hamowania należy umieścić przy torze co najmniej dwa czujniki w celu dokonania ewentualnej korekty siły hamującej niezbędnej do tego, aby pociąg zatrzymał się w określonym miejscu przy peronie. Przy identyfikacji masy wagonów i oporów ruchu bardzo ważne jest, aby opory wzniesień, spadków i łuków linii kolejowej sprowadzone były do czoła pojazdu trakcyjnego, a masa była masą rozłożoną wzdłuż całego składu pociągu. W tym celu należy wczytać profil odcinka linii oraz dokładne parametry składu pociągu. W opracowaniu przedstawiono efektywną metodę wyznaczania oporów wzniesień, spadków i łuków linii kolejowej dla danego składu pociągu. Następnie przedstawiono optymalizację jazdy pociągu w czasie rzeczywistym oraz dokonano identyfikacji parametrów ruchu pociągu.

2. Opory linii kolejowej

Linie kolejowe najczęściej położone są na terenach, na których występują spadki i wzniesienia, w związku z tym do zasadniczych oporów ruchu pociągu należy dodać opory wynikające z jazdy pociągu na wzniesieniach, spadkach oraz w łukach linii. Opory te w skrócie nazwano oporami linii kolejowej. Przy wyznaczaniu oporów linii nie można przyjmować składu pociągu jako masy punktowej umieszczonej w środku pociągu – masę tę należy traktować jako masę rozłożoną wzdłuż całego pociągu. W celu dokładnego wyznaczenia oporów linii należy dokonać obliczeń dla każdego wagonu, a następnie je zsumować. Opory te powinny być wyznaczone wzdłuż całej linii kolejowej w sposób dyskretny z krokiem równym ds . Im długość kroku ds będzie mniejsza tym dokładniej wyznaczone zostaną opory linii. Z drugiej strony ze zmniejszaniem się kroku ds rośnie liczba danych, które trzeba przechowywać w tablicach. Poza tym dla tak wyznaczonych oporów linii zdecydowanie zwiększa się liczba kroków przy wyznaczaniu jazdy symulacyjnej pociągu, ponieważ zmiana oporów linii nie może występować w środku przedziału wyznaczanej jazdy. W związku z tym w celu zmniejszenia liczby danych wyznaczone są opory linii ze stosunkowo niewielkim krokiem ($ds \leq 1$ m), a następnie dokonuje się aproksymacji tych wyników i umieszcza się je w odpowiednich przedziałach. Z uwagi na to, że aproksymacja dużej liczby wyników wymaga wielu obliczeń, przyjęto bardzo uproszczony sposób wyznaczania średnich oporów linii. Poszczególne wyniki pogrupowano w przedziały według następującego algorytmu:

$$|w_l - w_{sr}| \leq q \quad [\text{N/t}] \quad (1)$$

gdzie:

- w_l – jednostkowe opory linii wyznaczone w l -tym kroku przedziału $[\text{N/t}]$;
- w_{sr} – średnie jednostkowe opory linii w przedziale $[\text{N/t}]$;
- q – dopuszczalne odchylenie oporów linii od wartości średniej $[\text{N/t}]$;

przy czym średnie opory linii w przedziale wyznaczone są z następującej zależności

$$w_{sr} = w_0 + \Delta w_0 (s_l - s_0) \quad [\text{N/t}] \quad (2)$$

gdzie:

- w_0 – jednostkowe opory linii na początku przedziału $[\text{N/t}]$;
- Δw_0 – przyrost jednostkowych oporów linii w pierwszym kroku przedziału $[\text{N/t} \cdot \text{m}]$;
- s_l – droga w l -tym kroku przedziału $[\text{m}]$;
- s_0 – droga początkowa przedziału $[\text{m}]$.

Opory linii wyznaczone są dla masy rozłożonej pociągu, drogi początkowej przedziału s_0 oraz drogi w l -tym kroku przedziału $s_l = s_0 + lds$. Następnie z zależności (2) wyznaczone są średnie opory linii w_{sr} , następnie ten wynik podstawiany jest do nierówności (1). W przypadku spełnienia tej nierówności cykl obliczeń należy powtórzyć aż do momentu, kiedy nie będzie spełniona nierówność (1). Wówczas należy zamknąć dany przedział, wyznaczyć jego średnie opory w przedziale oraz przyrost oporów w zależności od drogi, a następnie otworzyć nowy przedział, w którym wyznaczone będą opory kolejnego odcinka linii. Liczba przedziałów zależy od dokładności, z jaką uśredniane są opory linii (współczynnika q), profilu linii oraz od tego, w jaki sposób rozmieszczona została masa w składzie pociągu. Bardzo ważne jest, jaki wpływ na symulacyjną jazdę pociągu ma dokładność, z jaką uśrednione są opory linii. A następnie, w jakim stopniu tak wyznaczona jazda symulacyjna będzie się różnić od rzeczywistej jazdy pociągu na odcinku s_k . Jeżeli ta różnica będzie się mieścić w granicach błędu dopuszczalnego, wówczas uznajemy, że opory linii zostały poprawnie wyznaczone. Przy wyznaczaniu jazdy optymalnej pociągu na odcinku s_k jako funkcję kryterialną przyjęto zużycie energii. W związku z tym jedną z miar, która określi prawidłowe wyznaczenie oporów linii, będzie dobranie takiego dopuszczalnego odchylenia oporów linii od wartości średniej – q , aby spełniona była następująca zależność:

$$|j(q) - j(1,5q)| \leq \varepsilon \quad (3)$$

gdzie:

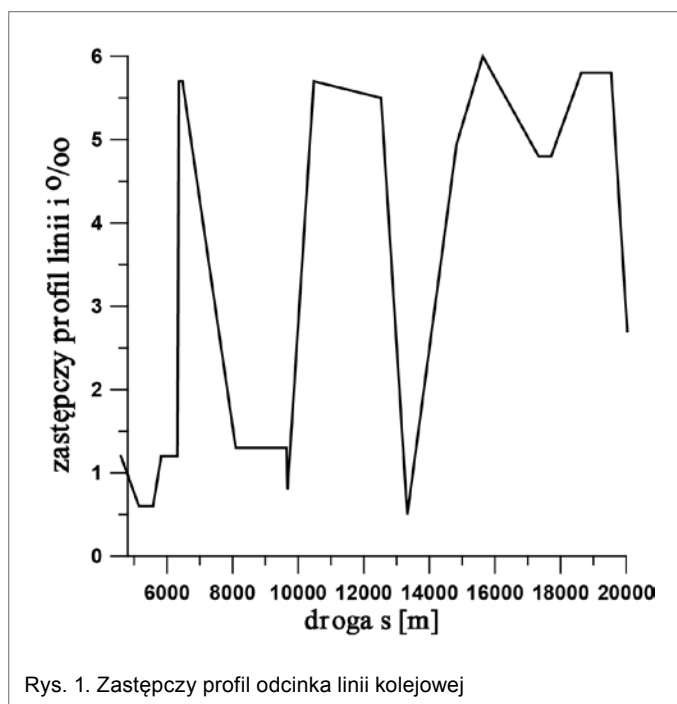
$j(q)$ – zużycie energii dla jazdy pociągu na odcinku s_k , na którym wyznaczone zostały opory linii dla współczynnika q ;

ε – stała.

W pracy [8] wykazano, że opory linii wyznaczone dla współczynnika $q = 10[\text{N/t}]$ spełniają nierówność (3) dla jazdy optymalnej pociągu na torze prostym i poziomym. Wyznaczanie jazdy optymalnej pociągu na odcinku s_k , którego profil zastępczy przedstawiono dla przykładu na rysunku 1, jest stosunkowo proste w porównaniu z wyznaczeniem automatycznego sterowania pociągu w czasie rzeczywistym, ponieważ przy wyznaczaniu sterowania automatycznego należy wielokrotnie wyznaczać w poszczególnych punktach pomiarowych jazdę optymalną pociągu wraz z dokonaniem analizy jazdy w tym celu, aby dokonać identyfikacji parametrów pociągu.

3. Optymalizacja jazdy pociągu w czasie rzeczywistym

Optymalne sterowanie ruchem pociągu w czasie rzeczywistym będzie możliwe wówczas, jeżeli dokonana zostanie identyfikacja masy wagonów, oporów ruchu oraz nieznannej siły



Rys. 1. Zastępczy profil odcinka linii kolejowej

zewewnętrznej, która działa na poruszający się pociąg. Przy czym zakłada się, że znany jest skład wagonów, masa przewożonych ładunków, parametry pojazdu trakcyjnego oraz dokładny profil linii kolejowej. Okazuje się, że najprostszym sposobem identyfikacji masy wagonów i oporów ruchu jest uzmiennienie tych wielkości i dołączenie ich do zmiennych decyzyjnych parametrów ruchu, jako kolejnych zmiennych decyzyjnych w programie jazdy pociągu. Poniżej przedstawione zostały zmienne decyzyjne programu jazdy, w którym dokonana zostanie identyfikacja masy wagonów i oporów ruchu pociągu:

- zmienne decyzyjne parametrów ruchu:
 - v_g – prędkość górna (maksymalna prędkość pociągu na odcinku);
 - s_d – droga jazdy pod prądem;
 - s_h – współrzędna drogi początku hamowania;
- (4)
- dołączone zmienne decyzyjne parametrów pociągu:
 - δm_w – względny przyrost masy wagonów;
 - δw – względny przyrost zasadniczych oporów ruchu;
 - δf_t – względny przyrost siły trakcyjnej.

Jako funkcję kryterialną przyjęto jednostkowe zużycie energii w pojeździe trakcyjnym i układzie zasilania odniesione do masy wagonów [3, 4]:

$$F = j \quad (5)$$

W programie wprowadzono następujące ograniczenia: (6)

- ograniczenia nierównościowe:
 - prędkość górna pociągu jest mniejsza od ograniczenia prędkości na odcinku $v_g \leq v_1$;
 - prędkość górna pociągu jest mniejsza od prędkości maksymalnej pojazdu trakcyjnego $v_g \leq v_m$;
 - współrzędna początku hamowania jest większa od współrzędnej końca jazdy pod prądem $s_d \leq s_h$.

- ograniczenia równościowe:
 - czas jazdy $t_j = t_k$;
 - droga przebyta przez pociąg $s = s_k$.

Poza tym czas jazdy i prędkość chwilowa wyznaczone w programie jazdy muszą spełniać ograniczenia równościowe z czasem i prędkością pociągu pomierzoną w kolejnych punktach pomiarowych:

$$\begin{aligned} v - v_j' &= 0, \\ t - t_j' &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

- v, v_j', t, t_j' – prędkości chwilowe i czasy jazdy wyznaczone w programie jazdy pociągu oraz odczytane w punkcie pomiarowym s_j' o numerze j .

Ograniczenia równościowe $v - v_j' = 0, t - t_j' = 0$ powodują, że w programie identyfikacyjnym nieznane parametry (masa wagonów, opory ruchu i siła działająca na pociąg) dobierane są w taki sposób, aby prędkość i czas jazdy wyznaczone w punktach pomiarowych różniły się od wielkości wyznaczonych w programie symulacyjnym jazdy nie więcej niż o stałą ϵ .

Jednostkowe zużycie energii j wyznaczono z następującej zależności [7, 9]:

$$j = \frac{k_w m}{3.6 m_w s_k} \left[\sum_{i=1}^n \frac{w_s^i v_j^i}{\eta^i} \int_{v_0^i}^{v^i} \left(\frac{f(v)^i}{(f(v)^i - w(v, m, p) - w_0^i)} \right) v dv \right] \left[\frac{Wh}{bt \cdot km} \right] \quad (8)$$

gdzie:

- $f(v)^i \in \Gamma$ – zbiór dopuszczalnych sterowań – jednostkowa siła pojazdu trakcyjnego [N/t];
- v_0^i, v^i – prędkość początkowa i końcowa przedziału i [m/s];
- $w_s^i = \frac{U_t^i}{k_s U_s^i}$ – współczynnik typu rozruchu;
- k_s – liczba silników połączonych szeregowo;
- U_t^i – napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego [V];
- U_s^i – napięcie silnika [V];
- m – masa pociągu [t];
- n – liczba przedziałów;
- s_k – odcinek linii kolejowej [km];
- $w(v, m, p)$ – jednostkowe opory ruchu pociągu [N/t];
- w_0^i – opory linii kolejowej w przedziale i [N/t];
- $\eta = \eta_t \eta_u$;
- η_t^i – współczynnik sprawności układu napędowego pojazdu trakcyjnego w przedziale i ;
- η_u^i – współczynnik sprawności układu zasilania w zależności od odległości od podstacji i parametrów układu zasilania;
- p – parametry składu pociągu.

4. Identyfikacja masy wagonów i oporów ruchu pociągu

Identyfikację masy wagonów i zasadniczych oporów ruchu dokonano na odcinku s_k dla następującego składu pociągu [5, 6]:

- skład wagonów:
 - wagony towarowe czteroosiowe:
 - początkowa masa wagonów – $m_w = 18 \times 50 = 900$ t;
 - identyfikowana masa wagonów różniła się od masy początkowej o $\pm 15\%$ i odpowiednio wynosiła: $m_{w1} = 765$ t i $m_{w2} = 1035$ t.

- pojazd trakcyjny:
lokomotywa elektryczna prądu stałego BoBo o parametrach [7]:
moc godzinna $P_h = 2500$ kW,
prędkość maksymalna $v_m = 36$ m/s,
masa lokomotywy $m_t = 86,9$ t;
- parametry ruchu:
długość odcinka $s_k = 15000$ m,
prędkość techniczna $v_t = 18$ m/s,
droga początkowa: $s_p = 5000$ m.

Identyfikacja masy wagonów dokonana została w następujących punktach pomiarowych:

$$\begin{aligned} s_1' &= s_p + 500 \text{ [m]} \\ s_2' &= s_p + 1500 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Na rysunku 1 przedstawiono zastępczy profil odcinka linii, do którego dodano opory wynikające z jazdy pociągu w łukach linii kolejowej. Przyjęto, że punkty pomiarowe, w których odczytywana jest prędkość i czas jazdy pociągu, rozmieszczone zostały wzdłuż odcinka s_k . Po odczytaniu czasu jazdy i prędkości pociągu w punkcie pomiarowym s_j' wielkości te przesyłane są automatycznie do programu jaz^i , w którym dokonuje się identyfikacji masy wagonów i oporów ruchu pociągu w czasie rzeczywistym. Procedura optymalizacyjna ma za zadanie wyznaczyć nową masę wagonów oraz dla tej masy zasadnicze opory ruchu i opory linii dla rozłożonej masy wagonów. Następnie dla tak wyznaczonych wartości parametrów należy wyznaczyć nowe sterowanie pociągu od danego punktu pomiarowego do końca odcinka. Procedura ta wyznacza zmienne decyzyjne δm_w , δw , δf_i w taki sposób, aby czas jazdy i prędkość pociągu (w danym punkcie pomiarowym wyznaczone w programie jaz_i dla nowych parametrów pociągu) były równe rzeczywistej prędkości i czasowi jazdy pociągu. Natomiast zmienne decyzyjne: v_g , s_d , s_h wyznaczone są w programie w taki sposób, aby zapewnić optymalne sterowanie pociągu ze względu na zużycie energii, przy jednoczesnym spełnieniu ograniczeń (6) i (7). Identyfikacja masy wagonów i oporów ruchu pociągu jest zadaniem wielowątkowym, w skład którego wchodzi następujące zadania cząstkowe:

- w pierwszym kroku obliczeniowym [4]:
wyznaczane jest sterowanie optymalne pociągu jaz^{p*} na odcinku s_k dla początkowej masy wagonów. Równocześnie dla tak wyznaczonego sterowania określona jest symulacyjna jazda jaz^{r*} dla rzeczywistych parametrów pociągu. Zadaniem jazdy jaz^{r*} jest odwzorowanie rzeczywistej jazdy pociągu na odcinku. Następnie w punkcie pomiarowym s_j' wyznaczone są w programie jaz^* prędkość i czas jazdy pociągu o parametrach początkowych v_j' i t_j' , a następnie w programie jaz^{r*} wyznaczone są prędkość i czas jazdy pociągu dla rzeczywistej masy pociągu, rzeczywistych oporów ruchu oraz oporów linii dla rozłożonej masy pociągu. Wielkości wyznaczone w programach jaz^* i jaz^{r*} , wprowadzane są następnie do programu identyfikacyjnego jaz^i , w którym następuje wyznaczenie zmiennych decyzyjnych: δm_w , δw , δf_i w taki sposób, aby dla nowych parametrów pociągu czas jazdy t^i i prędkość v^i wyznaczone w programie jaz^i w punkcie pomiarowym były równe wartościom wyznaczonym w programie symulacyjnym jaz^{r*} dla rzeczywistych parametrów pociągu. Oznacza to

spełnienie ograniczeń równościowych: $t^{r*} - t^i = 0$ i $v^{r*} - v^i = 0$ w punkcie pomiarowym s_j' . Nowe parametry pociągu przyjmują wówczas następujące wartości:

1. masa pociągu $m' = m_w(1 + \delta m_w) + m_t$
2. jednostkowe opory ruchu $w'(v, m', p) = w(v, m', p)(1 + \delta w)$ (9)
3. jednostkowa siła pojazdu trakcyjnego $f'(v) = f(v)(1 + \delta f_i)$

- w drugim kroku obliczeniowym w punkcie pomiarowym s_j' dokonuje się następujących podstawień:
przyjmuje się, że dane początkowe: s_p , v_p , t_p oraz dane końcowe ruchu pociągu: t_k , s_k , są odpowiednio równe:

$$s_p' = s_j', v_p' = v_j', t_p' = t_j', t_k' = t_k - t_j', s_k' = s_k - (s_j' - s_p) \quad (10)$$

Powyższe wartości wprowadzane są jako dane początkowe dla nowej jazdy pociągu, która rozpoczyna się w punkcie pomiarowym s_j' . Wówczas prędkość początkowa, droga i czas końcowy pociągu będą odpowiednio równe $v_p' = v_j'$, $s_k' = s_k - (s_j' - s_p)$, $t_k' = t_k - t_j'$. Równocześnie do dalszych obliczeń wprowadzana jest nowa masa pociągu, która będzie odpowiednio równa $m' = m_w(1 + \delta m_w) + m_t$ (9). Następnie dla tak wyznaczonej masy m' obliczane są zasadnicze opory ruchu oraz opory linii dla rozłożonej masy pociągu. Następnie w programie jaz^* wyznaczana jest nowa jazda optymalna pociągu, zgodnie z którą pociąg sterowany jest do następnego punktu pomiarowego. Po wyznaczeniu w następnym punkcie pomiarowym prędkości i czasu jazdy pociągu w programie symulacyjnym jaz^{r*} przechodzimy do pierwszego kroku obliczeń i cykl się powtarza.

Identyfikacji masy wagonów i oporów ruchu dokonuje się w dwóch lub trzech punktach pomiarowych, natomiast przy hamowaniu pociągu dokonuje się tylko korekty siły hamującej pociągu w tym celu, aby pociąg zatrzymał się w określonym miejscu przy peronie.

Programy symulacyjne oznaczone zostały w następujący sposób:

- jaz^i – identyfikacja parametrów pociągu w czasie rzeczywistym;
- jaz^* – sterowanie optymalne wyznaczone dla parametrów, które zostały wyznaczone w programie jaz^i w czasie identyfikacji;
- jaz^{r*} – sterowanie zgodne z jaz^* dla rzeczywistych parametrów pociągu;
- jaz^{p*} – sterowanie optymalne wyznaczone dla parametrów początkowych pociągu.

Identyfikacji parametrów pociągu dokonano na odcinku $s_k = 15000$ m dla prędkości technicznej równej $v_t = 18$ m/s i masy wagonów równej $m_w = 900$ t. W rzeczywistości masa wagonów była różna od masy początkowej m_w o $\pm 15\%$ i odpowiednio wynosiła $m_{w1} = 765$ t i $m_{w2} = 1035$ t. Zadaniem programu komputerowego było dokonanie identyfikacji ww. mas wagonów oraz oporów wzniesień, spadków i łuków na linii kolejowej o zmiennym profilu. W dotychczasowych opracowaniach [10, 11, 12] autor dokonał identyfikacji masy wagonów na torze prostym i poziomym. Natomiast celem niniejszego opracowania jest zbadanie, czy taka identyfikacja jest również możliwa na torze, na którym występują spadki, wzniesienia i łuki linii

Tabela 1. Wartości uzyskane w wyniku identyfikacji masy wagonów i parametrów ruchu pociągu w pierwszym punkcie pomiarowym

m_w	v_t	$\frac{\delta w}{\Delta w^p}$	$\frac{\delta m_w}{\Delta m_w^p}$	$\frac{\delta f_t}{\Delta f_t^p}$	j	Δs dokładność zatrzymania
t	m/s				Wh/bt·km	m
765	17,95	$\frac{0,186}{0,000}$	$\frac{-0,200}{-0,150}$	$\frac{0,080}{0,000}$	28,01	2,58
1035	17,89	$\frac{-0,184}{0,000}$	$\frac{0,193}{0,150}$	$\frac{0,079}{0,000}$	28,23	-5,27
900	18,09	$\frac{0,198}{0,150}$	$\frac{-0,016}{0,000}$	$\frac{0,100}{-0,150}$	29,06	4,03

Tabela 2. Wartości chwilowe prędkości i czasu jazdy pociągu w pierwszym punkcie pomiarowym, w którym dokonano identyfikacji mas wagonów i oporów ruchu pociągu

lp	s'	v	t	δw	δm_w	δf_t	oznaczenia programów
	m	m/s	sek				
1	5500	13,140	71,837	0,000	0,000	0,000	<i>jaz^p</i>
2		14,083	66,906	0,000	-0,150	0,000	<i>jaz^{rz}</i>
3		14,271	65,778	0,186	-0,200	0,080	<i>jaz[*], jazⁱ</i>
Rzeczywista masa wagonów jest mniejsza od masy początkowej o 15% i wynosi $m_{w1} = 765$ t							

kolejowej, a następnie, w jaki sposób zmienny profil odcinka linii kolejowej wpływa na dokładność identyfikacji parametrów pociągu. Badania przeprowadzono na odcinku s_k , którego profil zastępczy przedstawiono na rysunku 1. W tabeli 1 w wierszu 1 i 2 przedstawiono wyniki identyfikacji parametrów pociągu w pierwszym punkcie pomiarowym, dla masy wagonów różnej od masy m_w o $\Delta m_w^p = \pm 0,15 m_w$. Natomiast w wierszu 3 przedstawiono wyniki dla masy wagonów równej masie m_w oraz dla oporów ruchu powiększonych o $\Delta w^p = 0,15 w^p$ i równocześnie dla siły pojazdu trakcyjnego pomniejszonej o $\Delta f_t^p = -0,15 f_t^p$.

Wyniki identyfikacji przedstawiono w tabeli 1, poza tym w tabeli 2 przedstawiono czasy jazdy i prędkości chwilowe w pierwszym punkcie pomiarowym s_1' . Od drogi początkowej $s_p = 5000$ m do pierwszego punktu pomiarowego s_1' symulacyjna jazda pociągu wyznaczona została dla masy wagonów $m_w = 900$ t. Zgodnie z tak wyznaczonym sterowaniem odbywa się jazda pociągu, którego masa wagonów w rzeczywistości była mniejsza o 15% i wynosiła $m_{w1} = 765$ t. Następnie w programie *jazⁱ* dokonano identyfikacji masy wagonów $m_w' = m_w + \delta m_w$. Zmienne decyzyjne δw , δm_w , δf_t wyznaczone zostały przez procedurę optymalizacyjną w taki sposób, aby czas jazdy i prędkość chwilowa pociągu dla masy m_{w1} wyznaczone w punkcie pomiarowym różniły się nie więcej niż wynosi stała ϵ od czasu i prędkości jazdy symulacyjnej wyznaczonej dla masy m_w . Poniżej przedstawiono te parametry w postaci następujących zależności:

$$m' = m_w(1 + \delta m_w) + m_t, w'(v, m', p) = w(v, m', p)(1 + \delta w), f'(v) = f(v)(1 + \delta f_t) \quad (12)$$

W pierwszym punkcie pomiarowym $s_1' \cong 5500$ m uzyskano następujące wartości chwilowe prędkości i czasu jazdy pociągu:

- początkowa masa wagonów była równa $m_w^p = 900$ t, natomiast identyfikowana masa wagonów wynosiła $m_{w1} = 765$ t.

v (m/s) t (s) m_w (t)
 13,140 71,837 900 *jaz^p* – jazda z początkową masą wagonów równą $m_w = 900$ t
 14,083 66,906 765 *jaz^{rz}* – jazda z rzeczywistą masą wagonów równą $m_{w1} = 765$ t
 14,271 65,778 720 *jaz^{*}* – optymalna jazda wyznaczona dla parametrów pociągu otrzymanych w wyniku identyfikacji.

Optymalną jazdę pociągu *jaz^{*}* wyznaczono dla masy wagonów i oporów ruchu, które otrzymano w wyniku identyfikacji w programie *jazⁱ*.

W pierwszym punkcie pomiarowym czas jazdy pociągu z masą wagonów $m_w = 900$ t był większy o $\Delta t = 4,931$ s, równocześnie prędkość chwilowa była mniejsza o $\Delta v = 0,943$ m/s od wartości wyznaczonych w programie *jaz^{rz}* dla identyfikowanej masy wagonów równej $m_{w1} = 765$ t. W wyniku identyfikacji masy wagonów i parametrów ruchu w programie *jazⁱ* uzyskano następujące wartości masy wagonów m_w' , oporów ruchu w' oraz siły trakcyjnej lokomotywy $f(v)'$:

$$m_w' = 720 \text{ t.}; w' = 1,186w; f(v)' = 1,08f(v) \quad (14)$$

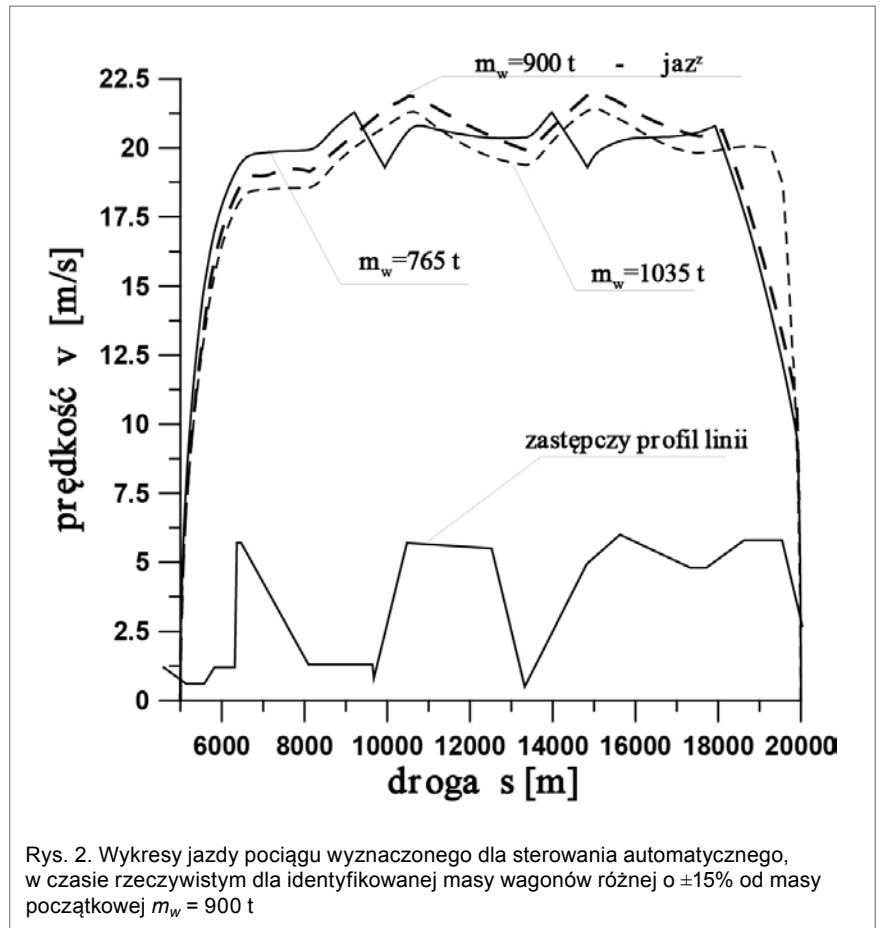
Dla takich wartości parametrów wyznaczono w programie *jaz^{*}* nowe sterowanie pociągu, począwszy od punktu pomiarowego s_1' dla następujących parametrów ruchu: drogi $s_k' = s_k - (s_1' - s_p)$, prędkości początkowej $v_p' = 14,083$ m/s i czasu jazdy $t_k' = t_k - 66,906$ s. Sterowanie to powinno spełniać ograniczenia ruchu (6) i (7) i być optymalne ze względu na zużycie energii. Na rysunku 2 przedstawiono dla porównania wykresy jazdy dla masy wagonów równej $m_w = 900$ t oraz dla identyfikowanych mas wagonów, które były odpowiednio równe $m_{w1} = 765$ t i $m_{w2} = 1035$ t. Do pierwszego punktu pomiarowego sterowanie pociągu dla identyfikowanych mas wagonów m_{w1} i m_{w2} odbywało się zgodnie ze sterowaniem wyznaczonym dla początkowej masy wagonów m_w .

W pierwszym punkcie pomiarowym prędkość pociągu z mniejszą masą wagonów m_{w1} była większa o 6,7%, natomiast z większą masą m_{w2} prędkość była mniejsza o 6,36% od prędkości pociągu z masą m_w . Natomiast czas jazdy pociągu do pierwszego punktu pomiarowego z masą wagonów m_{w1} był krótszy o 7,37%, a z masą wagonów m_{w2} był dłuższy o 6,13% od czasu jazdy z masą wagonów m_w . W wyniku identyfikacji masy wagonów m_{w1} w pierwszym punkcie pomiarowym uzyskano wartości parametrów pociągu, które opisano za pomocą zależności (14). Wartości te różnią się znacznie od wartości identyfikowanych, stąd wniosek, że identyfikacja parametrów pociągu w czasie rzeczywistym jest zagadnieniem złożonym. Nasuwa się pytanie czy identyfikacja parametrów pociągu w czasie rzeczywistym jest możliwa i czy w ogóle ma sens taka identyfikacja na odcinku o zmiennym profilu.

Okazuje się, że identyfikacja trzech parametrów na odcinku o zmiennym profilu w czasie rzeczywistym wymaga dużego nakładu obliczeń. Identyfikacja ta jest identyfikacją pośrednią, która w przypadku braku obiektu rzeczywistego polega na wyznaczaniu jazdy optymalnej pociągu dla parametrów początkowych. Następnie dla takiego sterowania wyznaczona zostaje jazda symulacyjna z parametrami rzeczywistymi, a po dokonaniu porównania prędkości i czasu tych jazd w punkcie pomiarowym wyznaczona zostaje w programie identyfikacyjnym nowa masa wagonów, nowe opory ruchu oraz siła zewnętrzna działająca na pociąg (jazda w tunelach, siła wiatru itp.). Obliczenia trwają do momentu, gdy w programie identyfikacyjnym wyznaczona zostanie dla nowych parametrów ruchu jazda pociągu w taki sposób, aby czas jazdy i prędkość pociągu spełniały wszystkie nałożone ograniczenia, tzn. aby czas jazdy i prędkość pociągu w punkcie pomiarowym różniły się od czasu jazdy i prędkości pociągu z parametrami rzeczywistymi (w naszym przypadku identyfikowanymi) nie więcej niż wynosi pewna stała ε . Następnie, aby pociąg z nowymi parametrami zatrzymał się w określonym miejscu przy peronie. Należy nadmienić, że dla każdej nowej wartości masy wagonów wyznaczane są zasadnicze opory ruchu oraz opory linii kolejowej dla rozłożonej masy pociągu. Dlatego tak ważne jest efektywne i jednoznaczne wyznaczanie oporów linii kolejowej, które zostało przedstawione szczegółowo w opracowaniu. Z wyników zamieszczonych w tabeli 3 wyraźnie widać różnice, jakie występują pomiędzy parametrami nieznanymi, które były identyfikowane, a parametrami uzyskanymi w wyniku tej identyfikacji. W związku z tym nasuwa się pytanie, czy jest możliwe optymalne sterowanie pociągiem w sposób automatyczny, jeżeli występują tak duże różnice pomiędzy ww. parametrami przy identyfikacji, a następnie czy pociąg zatrzyma się w wyznaczonym miejscu przy peronie. Odpowiedź na te pytania można znaleźć w tabeli 1 i tabeli 4. W tabeli 1 zawarte są wyniki jednostkowego zużycia energii oraz dokładności Δs , z jaką pociąg zatrzymuje się przy peronie. Dokładność drogi Δs , z jaką zatrzymuje się pociąg, wynosi kilka metrów, co można uznać za wynik zadawalający, jeżeli weźmie się pod uwagę fakt, że na odcinku drogi równym $s_k = 15\,000$ m identyfikacji parametrów dokonuje się w dwóch pierwszych punktach pomiarowych, a w dwóch kolejnych dokonuje się tylko korekty jazdy.

Pomimo dużych różnic, jakie występują pomiędzy parametrami identyfikowanymi a parametrami wyznaczonymi w wyniku tej identyfikacji, uzyskane wyniki są obiecujące. W tabeli 4 zamieszczono przyrosty prędkości i czasu, uzyskane w pierwszym punkcie pomiarowym w stosunku do prędkości i czasu pociągu o parametrach identyfikowanych. Przyrosty te dla masy wagonów różnej o $\pm 15\%$ od masy początkowej wynoszą ponad sześć procent.

Natomiast przyrosty prędkości i czasu na tym samym odcinku dla pociągu z parametrami, które zostały wyznaczone



Rys. 2. Wykresy jazdy pociągu wyznaczonego dla sterowania automatycznego, w czasie rzeczywistym dla identyfikowanej masy wagonów różnej o $\pm 15\%$ od masy początkowej $m_w = 900$ t

Tabela 3. Wartości początkowe (masy wagonów, oporów ruchu i siły działającej na pociąg) oraz wartości uzyskane w wyniku identyfikacji w pierwszym punkcie pomiarowym

m_w	wartości różniące się od parametrów początkowych pociągu			wartości parametrów uzyskane w wyniku identyfikacji		
	Δm_w	Δw	$\Delta f_t(v)$	$\delta m_w'$	$\delta w'$	$\delta f_t(v)'$
t	%	%	%	%	%	%
765	-15	0	0	-20,0	18,6	8,0
1035	15	0	0	19,3	-18,4	7,9
900	0	15	-15	-1,6	19,8	10,0

Tabela 4. Przyrosty prędkości i czasu jazdy pociągu wyznaczone w wyniku identyfikacji w pierwszym punkcie pomiarowym

m_w	przyrosty prędkości i czasu jazdy pociągu w punkcie pomiarowym			
	dla rzeczywistej masy pociągu		dla parametrów poc. uzyskanych w wyniku identyfikacji	
	Δv	Δt	$\delta v'$	$\delta t'$
t	%	%	%	%
765	6,7	-7,37	-1,33	1,69
1035	-6,36	6,13	0,49	-0,74
900	-0,85	0,71	-0,25	0,43

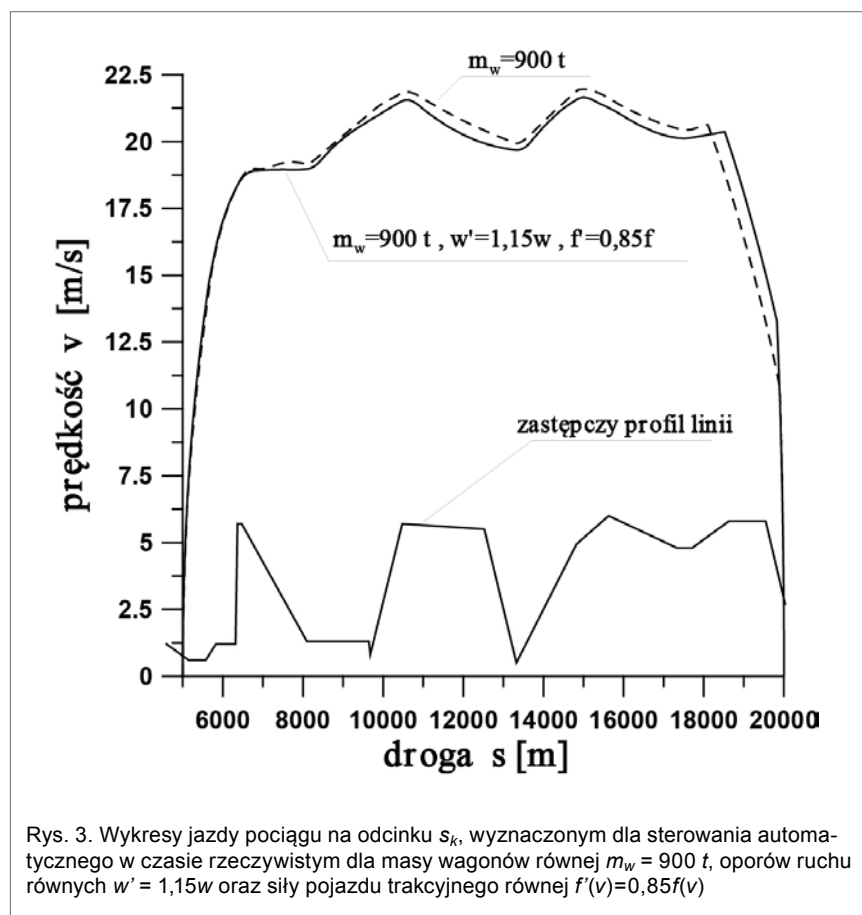
w wyniku identyfikacji, wynoszą około jednego procenta. Zmniejszenie przyrostu prędkości i czasu z około sześciu do około jednego procenta można uznać za wynik zadawalający.

W wierszu trzecim tabeli 3 i 4 zamieszczono wyniki identyfikacji oporów ruchu i siły trakcyjnej dla masy wagonów równej masie rzeczywistej. Stwierdzono, że zmiana zasadniczych oporów ruchu pociągu i siły pojazdu trakcyjnego mają zdecydowanie mniejszy wpływ na przebieg jazdy niż zmiana masy wagonów, co potwierdzają wyniki, jak i wykres jazdy przedstawiony na rysunku 3. W związku z tym dalsze badania zostały ograniczone tylko do identyfikacji masy wagonów.

Automatyczne sterowanie ruchem pociągu na odcinku s_k [1, 2] wymaga dokładnej znajomości zarówno masy wagonów, jak i oporów wzniesień, spadków i łuków, które zależą od tej masy w szczególności na spadkach i wzniesieniach linii. W przypadku, gdy nie jest znana dokładna masa składu wagonów, która dla pociągów pasażerskich zależy od liczby przewożonych pasażerów, a dla pociągów towarowych przy przewożeniu towarów masowych, jak węgiel i piasek, masa wagonów często zależy od warunków atmosferycznych. Wówczas nie jest możliwe prawidłowe wyznaczenie oporu wzniesień i spadków na liniach o zmiennym profilu. W związku z tym bardzo ważne jest zbadanie, jaki wpływ ma zmienny profil linii kolejowej na identyfikację masy wagonów. Wykonano szereg jazd symulacyjnych na linii kolejowej o zmiennym profilu i stwierdzono, że jest możliwe przeprowadzenie takiej identyfikacji, co jest świadectwem, że można automatycznie sterować ruchem pociągów.

5. Podsumowanie

Automatyczne sterowanie ruchem pociągu na odcinku s_k wymaga rozmieszczenia wzdłuż toru punktów pomiarowych, które umożliwią odczytanie prędkości, czasu i drogi przebytej przez pociąg. W przypadku, gdy parametry pociągu, do których zaliczamy masę wagonów, zasadnicze opory ruchu i siłę działającą na pociąg, są identyfikowane, wówczas można rozmieścić o wiele mniej takich punktów pomiarowych niż w przypadku, gdyby nie były one identyfikowane. Od liczby punktów pomiarowych umieszczonych przy torze ważniejsze jest, w jaki sposób sterowany jest pociąg. Okazuje się, że w przypadku, gdy nie będą identyfikowane parametry pociągu, wówczas wyznaczenie sterowania optymalnego nie jest możliwe [10, 11, 12]. Trudno jest wyznaczyć takie sterowanie wówczas, gdy identyfikacja parametrów pociągu będzie wykonana niedokładnie. Dokładność identyfikacji zależy od profilu linii, rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz w pewnym stopniu od wartości początkowych. Jeżeli jazda odbywa się na wybranej linii kolejowej, to parametry wyznaczone na danym odcinku mogą być wykorzystane jako dane wejściowe dla następnego odcinka. W taki prosty sposób można zwiększyć dokład-



Rys. 3. Wykresy jazdy pociągu na odcinku s_k , wyznaczonym dla sterowania automatycznego w czasie rzeczywistym dla masy wagonów równej $m_w = 900$ t, oporów ruchu równych $w' = 1,15w$ oraz siły pojazdu trakcyjnego równej $f'(v) = 0,85f(v)$

ność identyfikacji. Na liniach kolejowych o zmiennym profilu identyfikacja będzie możliwa wówczas, gdy opory wynikające z jazdy pociągu na wzniesieniach, spadkach i łukach linii będą wyznaczone dokładnie i jednoznacznie w czasie rzeczywistym. W niniejszym opracowaniu przedstawiono metodę wyznaczania z żadaną dokładnością oporów wzniesień, spadków i łuków linii w sposób jednoznaczny i równocześnie efektywny dla rozłożonej masy składu pociągu. Identyfikacji parametrów pociągu dokonuje się za pomocą procedur optymalizacyjnych, które wymagają dużej dokładności i jednoznaczności. Nie można stosować uproszczonych metod zarówno przy wyznaczaniu jazdy pociągu, jak i przy wyznaczaniu oporów linii. Stąd niniejsze opracowanie jest nowatorskie, ponieważ przy identyfikacji parametrów pociągu zastosowano procedury optymalizacyjne. Jako zmienne decyzyjne przyjęto zarówno parametry ruchu, jak i parametry pociągu, które są identyfikowane w czasie rzeczywistym. Funkcją kryterialną jest zużycie energii w pojeździe trakcyjnym i układzie zasilania. Jazda pociągu na odcinku s_k podzielona została na n przedziałów o zmiennej długości, co pozwala na wyznaczenie siły trakcyjnej w zależności od zmian napięcia w sieci, prądu i sprawności w funkcji drogi, a ponadto możliwe jest uwzględnienie zmiennych oporów linii w zależności od drogi. Można dobrać długość kroku w taki sposób, aby możliwe było wyznaczanie jazdy z żadaną dokładnością. Dokładność i jednoznaczność wyznaczania jazdy pociągu, jak i oporów linii jest warunkiem niezbędnym przy identyfikacji parametrów pociągu. Przyjęcie nawet najmniejszych uproszczeń uniemożliwi prawidłową identyfikację. Jak wykazano w niniejszym opracowaniu, poprawna identyfikacja parametrów pociągu umożliwia jego automatyczne prowa-

dzenie w sposób optymalny na odcinku s_k . Celem niniejszego opracowania było wykazanie, że nie jest możliwe sterowanie pociągu w sposób racjonalny za pomocą wcześniej wyznaczonych jazd symulacyjnych z uwagi na to, że duży wpływ na jazdę pociągu ma wiele czynników zewnętrznych, do których zaliczamy warunki atmosferyczne, zmienne zapelnienie wagonów, stan techniczny torów i pociągu. Wszystkie te czynniki powodują, że sterowanie pociągu według założonego wcześniej schematu może okazać się trudne do realizacji. Taka jazda wymaga wielokrotnego włączania urządzeń napędowo-hamulcowych, co powoduje dużo większe zużycie energii. Natomiast przeprowadzenie identyfikacji parametrów pociągu w czasie rzeczywistym umożliwia automatyczne sterowanie pociągu w sposób optymalny ze względu na zużycie energii. Pociąg staje się w każdej chwili czasowej obiektem obserwowalnym, co umożliwia wprowadzenie ruchomego odstępu blokowego [1, 2]. Poza tym taka identyfikacja umożliwia w dowolnej chwili czasowej dokonywanie oceny zasadniczych oporów ruchu pociągu. Zwiększenie zasadniczych oporów ruchu może wystąpić na skutek zakleszczenia zestawu kołowego, uszkodzenia maźnicy, wystąpienia części płaskiej na obręczach itp. Taka ocena oporów ruchu w czasie rzeczywistym umożliwia w znacznym stopniu dokonywanie diagnostyki układu biegowego pociągu, co prowadzi do podniesienia bezpieczeństwa ruchu. Ma to istotne znaczenie przy ciągle wzrastającej prędkości technicznej pociągu.

W niniejszym opracowaniu autor proponował trzy zmienne decyzyjne, które są identyfikowane. Nasuwa się pytanie, dlaczego właśnie trzy. Poprawną odpowiedź na tak postawione pytanie może dać weryfikacja jazdy w różnych warunkach atmosferycznych na odcinku linii kolejowej. Sterowanie pociągu przy wykorzystaniu metody identyfikacji jego parametrów może znaleźć zastosowanie w metrze, gdzie niemal na każdym przystanku występuje zmienne zapelnienie pociągu oraz wymagana jest duża dokładność zatrzymania czoła pociągu w określonym miejscu przy peronie.

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] FINDEISEN W., SZYMANOWSKI W., WIERZBICKI A.: *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*. PWN, Warszawa 1980.
- [4] FINDEISEN W.: *Wielopoziomowe metody optymalizacji*. PWN, Warszawa 1995.
- [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.: *Matematyczny model lokomotywy elektrycznej*. Prace Instytutu Transportu PW z. 29. Wydawnictwo PW, Warszawa 1990.
- [8] WNUK M.: *Wpływ aproksymacji oporów linii kolejowej na zużycie energii*. Prace Naukowe PW Transport z. 45, s. 70–90. Warszawa 2001.
- [9] WNUK M.: *Metoda wyznaczania optymalnych parametrów składu pociągu*. Politechnika Śląska Wydział Elektryczny – rozprawa doktorska. Gliwice 2002.
- [10] WNUK M., JÓZWIAK B.: *Automatyczne sterowanie ruchem pociągu na odcinku linii*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Wydziału Transportu PW sekcja 1, s. 265–271, Warszawa 2004.
- [11] WNUK M.: *Optymalne sterowanie ruchem pociągu w czasie rzeczywistym*. XI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, s. 441–448, Politechnika Krakowska, Zakopane 2004.
- [12] WNUK M.: *Identyfikacja parametrów ruchu pociągu w czasie rzeczywistym*. 7 Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowoczesna trakcja elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku” MET’2005, s. 126–129. Wydział Elektryczny PW, Sekcja Trakcji Komitetu Elektrotechniki PAN, Polska sekcja IEE, Instytut Elektrotechniki Warszawa, Warszawa 2005.

dr inż. Mirosław Wnuk – emerytowany
pracownik Wydziału Transportu PW

artykuł recenzowany