

Jan Anuszczyk, Sławomir Barański, Andrzej Gocek
Politechnika Łódzka, Łódź

OCENA JAKOŚCI HAMOWANIA DOCELOWEGO POCIĄGÓW METRA ZA POMOCĄ FUNKCJI SPEŁNIANIA WYMAGAŃ HARRINGTONA

THE HARRINGTON'S DESIRABILITY FUNCTION AS A METHOD OF EVALUATION OF THE QUALITY OF TARGET BRAKING APPLIED IN UNDERGROUND TRAINS

Abstract: In the paper a method of target braking quality calculation and an evaluation of it has been discussed. The quality of target braking was featured and a quality indicator of target braking was dealt. Authors have attempted to define the braking quality and explained how to assess it. The Harrington's desirability function as a method of quality assessment has been described. A certain technical parameters and subjective impressions of passengers affects on the quality of target braking. Therefore, the evaluation of braking quality is more complex process.

1. Wstęp

Hamowanie docelowe pociągów metra jest specyficznym przypadkiem hamowania pojazdu szynowego. Jest ono realizowane za pomocą systemu automatycznej jazdy pociągu (*ATO - Automatic Train Operation*) i odbywa się przy uwzględnieniu ściśle określonych danych opisujących drogę hamowania. Proces hamowania docelowego można zweryfikować pod względem dokładności i jakości hamowania pociągu. W przypadku dokładności hamowania kwestia jej weryfikacji jest dosyć prosta, ponieważ ocenie podlega przede wszystkim dokładność trafienia w punkt zatrzymania. Jednym z najważniejszych kryteriów oceny jakości hamowania docelowego jest sposób regulacji opóźnienia hamowania w czasie. Opóźnienie hamowania nie może być wartością zbyt dużą, ponieważ spowoduje np. przewrócenie się pasażerów podczas hamowania, ale zarazem przedłoży się na zwiększenie prędkości handlowej na linii. Wartość opóźnienia hamowania nie może też być zbyt mała, ponieważ wpłynie to na zmniejszenie prędkości handlowej, a co za tym idzie spowoduje spadek przepustowości linii metra. Takie kryteria stają się trudne do weryfikacji i kwestią sprzeczną może być wówczas np. subiektywne odczucie pasażera podczas hamowania. Do prawidłowej oceny jakości przeprowadzonego procesu hamowania autorzy postanowili zastosować funkcję spełniania wymagań (*desirability function*), wprowadzoną w roku 1965 przez Harringtona. Zastosowanie

omawianej funkcji pozwoli na agregację kryteriów jakości hamowania docelowego.

2. Hamowanie docelowe

Szczególnym przypadkiem hamowania zasadniczego pociągu metra jest hamowanie docelowe. Ten rodzaj hamowania polega na stopniowym zmniejszaniu prędkości rzeczywistej pociągu V_{rz} do wartości prędkości granicznej $V_d=0$, którą należy uzyskać w punkcie ograniczenia prędkości x_d , przy nie przekroczeniu dopuszczalnego opóźnienia hamowania a_n . Samooczynne hamowanie docelowe pociągu występuje w czasie zatrzymywania pociągu, tzn.:

- Przy peronie, gdzie zatrzymanie pociągu powinno być bardzo dokładne, a rzeczywiste miejsce zatrzymania pociągu określone parametrem x_{rz} musi być równe:

$$x_{rz} = x_d \pm c \quad (1)$$

- Przy semaforze, gdzie rzeczywiste miejsce zatrzymania powinno spełniać warunek:

$$x_{rz} \pm c \leq x_d \quad (2)$$

gdzie: c – dopuszczalna tolerancja zatrzymania. Hamowanie docelowe stosuje się głównie na liniach metra do zatrzymania pociągu w peronie. Hamowanie docelowe na linii metra jest automatycznym procesem zatrzymania pociągu na stacji. Jest to bardzo ważny element jazdy pociągu metra, ponieważ wymaga zatrzymania pociągu w peronie o określonej długości. Coraz częściej projektuje się stacje metra z zamykanymi peronami, w których zatrzyma-

nie pociągu musi być bardzo dokładne i realizować zasadę „drzwi w drzwi”. Precyzyjne zatrzymanie pociągu jest również bardzo ważne z punktu widzenia pasażerów. Podczas zatrzymania pociągu w peronie nie można dopuścić do sytuacji, aby pociąg zatrzymał się w nieodpowiednim miejscu i mogło nastąpić utknięcie pasażera w szczelinie między peronem a pociągiem. Automatyczne hamowanie pociągu musi rozpocząć się we właściwej odległości od punktu zatrzymania oraz wymaga odpowiedniej regulacji siły hamowania, która zapewni zatrzymanie pociągu w odpowiednim miejscu na linii. Spełnienie tych wymagań pozwala na precyzyjne zatrzymanie pociągu z bardzo dużą dokładnością, rzędu kilku centymetrów [1, 2, 3].

3. System automatycznej jazdy

System ATO automatyzuje jazdę pociągu pomiędzy stacjami. Podstawowe czynności realizowane przez ten system to:

- włączanie i wyłączanie silników,
- włączanie i wyłączanie hamulców,
- regulacja siły napędowej,
- regulacja siły hamowania.

System automatycznej jazdy pociągu jest odpowiedzialny za realizację procesu hamowania docelowego. W zależności od potrzeb, automatyzacja może obejmować niektóre, bądź wszystkie fazy jazdy pociągu. System ATO może także spełniać inne dodatkowe zadania np.: otwierać i zamykać drzwi w peronie, zawracać pociąg na stacji końcowej, sterować wyświetlaniem komunikatów dla pasażerów. Działanie systemu ATO może być oparte o sztywny, bądź elastyczny program jazdy. Pierwsze rozwiązanie stosuje się na liniach z ruchem jednorodnym, jednak staje się ono kłopotliwe w momencie wystąpienia zakłóceń ruchowych na linii. Drugi wariant sprawdza się znacznie lepiej w sytuacji, gdy wystąpią zakłócenia w ruchu pociągów. W pełni elastyczny system ATO na bieżąco wyznacza prędkość zadaną dla każdego pociągu [1, 2].

4. Jakość procesu hamowania docelowego

4.1. Wskaźnik jakości hamowania

Pojęcie ogólne jakości hamowania jest trudne do jednoznacznego zdefiniowania. Według normy PN-EN ISO 9000:2001 obowiązującej także w transporcie „jakość to stopień, w jakim

zbiór inherentnych właściwości spełnia wymagania” [5]. Można przyjąć, że jakość hamowania docelowego jest nastawiona na wysoką wartość dokładności zatrzymania pociągu w ściśle określonym punkcie na linii oraz na wartość spełniania wymagań czasowych procesu hamowania przy uwzględnieniu oczekiwań pasażerów.

Jakość hamowania określana jest na podstawie wskaźnika jakości, który charakteryzuje automatyczny proces zatrzymania pociągu na stacji. Ocena jakości hamowania powinna uwzględniać parametry statyczne procesu hamowania takie, jak: dokładność zatrzymania pociągu w danym punkcie oraz parametry dynamiczne tego procesu, czyli dokładność realizacji sterowania hamowaniem i realizację teoretycznej krzywej hamowania $V_h(t_h)$. Można przyjąć zatem, następujący wskaźnik jakości procesu hamowania:

$$I_r = \alpha \cdot \Delta_d + \beta \cdot \Delta_v + \gamma \cdot \Delta_a \quad (3)$$

gdzie:

$$\Delta_d = |x_{rz}(t_k) - x_g| \quad (4)$$

$$\Delta_v = \int_{t_0}^{t_k} (V_h - V_{rz})^2 dt \quad (5)$$

$$\Delta_a = \int_{t_0}^{t_k} (a_h - a_{rz})^2 dt \quad (6)$$

Przy czym: α, β, γ są stałymi współczynnikami poszczególnych wag składników wskaźnika jakości. Dokładność statyczną określa składnik Δ_d , natomiast dokładność dynamiczną określają składniki Δ_v oraz Δ_a [1, 3]. Składnik statyczny opisuje drogę hamowania, natomiast składniki dynamiczne opisują odpowiednio zmieniającą się prędkość oraz opóźnienie hamowania podczas procesu zatrzymywania pociągu.

4.2. Kryteria oceny jakości hamowania

W celu oceny jakości hamowania autorzy proponują przyjmować trzy podstawowe kryteria:

I. Podstawowym kryterium jakości hamowania pociągu przed przystankiem jest dokładność trafienia w punkt zatrzymania.

II. Drugim kryterium jest komfort jazdy pasażerów wymagający takiego przeprowadzenia procesu hamowania, aby nie wystąpiły gwałtowne zmiany opóźnienia hamowania w trakcie realizowania procesu zatrzymywania.

III. Trzecim kryterium jest czas procesu hamowania.

Pierwszym kryterium jakości hamowania docelowego pociągu metra jest dokładność z jaką pociąg zatrzymuje się w peronie. Zatem w tym przypadku o jakości wykonanego procesu hamowania świadczyć będzie różnica w długości drogi hamowania pociągu względem punktu rzeczywistego zatrzymania się pociągu, a punktem docelowym. Pociąg może zatrzymać się przed punktem zatrzymania, bądź w pewnej odległości za nim. Drugie kryterium dotyczy względów zarówno czysto technicznych, jak i odczuć subiektywnych podróżujących pasażerów. Proces hamowania pociągu (w trakcie hamowania służbowego) nie może rozpoczynać się zbyt gwałtownie tzn. opóźnienie hamowania nie może zbyt intensywnie narastać, ponieważ pasażerowie mogą stracić równowagę. W tym przypadku odpowiednia wartość opóźnienia hamowania może być odbierana różnie przez podróżujących. Dla osób starszych gwałtowne narastanie opóźnienia hamowania będzie bardziej dokuczliwe, niż dla osób w wieku średnim. Zbyt duże zmiany opóźnienia hamowania służbowego w trakcie realizacji hamowania pociągu prowadzą do szarpnięć negatywnie odczuwanych przez podróżujących. Trzecie kryterium wiąże się z czasem realizacji procesu hamowania docelowego. Nie może ono trwać zbyt długo, ponieważ czas wpływa na prędkość handlową na linii. Za zmniejszającą się prędkość na drodze hamowania odpowiada opóźnienie hamowania.

5. Wykorzystanie funkcji spełniania wymagań do oceny jakości hamowania docelowego

5.1. Funkcja Harringtona

Agregacja w pojęciu ogólnym polega na połączeniu składowych części (np. różnych parametrów uzyskanych doświadczalnie opisujących dany proces, bądź zjawisko) w całość. Dwuwykładnicza funkcja spełniania wymagań (desirability function) została wprowadzona przez Harringtona w celu agregacji kryteriów [4]. Zastosowanie funkcji spełniania wymagań pozwala na agregację kryteriów np. jakości hamowania docelowego. Funkcja Harringtona przekształca bezwymiarową zmienną h związaną z j -tym wymaganiem w unormowaną (od 0 do 1) ocenę H spełniania wymagania. Ma ona stałą wartość równą 0 dla h poniżej -2 i wartość równą 1 dla zmiennej powyżej 5. Zmienna h

jest związana z miarą J spełniania wymagania opisaną funkcją transformującą:

$$h_j = f(J_j) \quad (7)$$

Funkcja ta może przyjąć postać liniową:

$$h_j = c_0 + c_T J_j \quad (8)$$

Współczynniki c_0 oraz c_T są wyznaczane z warunku:

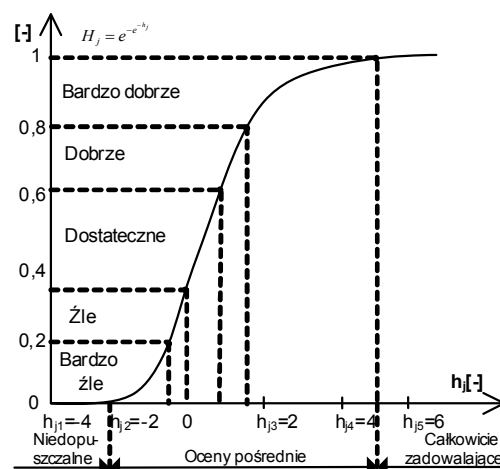
- wartość J , dla której wystąpi stan niedopuszczalny $h=-2$,
- dla J , od którego stan jest zadowalający $h=5$.

Agregacja w oparciu o funkcję z Rys.1 dla N -wymagań następuje wg. zależności:

$$H = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N H_j} \quad (9)$$

Omawiana funkcja w sposób szczególny spełnia wymagania służące do oceny kryteriów składających się z kilku, bądź kilkunastu składników. Funkcję spełniania wymagań pod tymi względami cechuje:

- różniczkowalność w całym zakresie przebiegu,
- funkcja oddaje przebieg wielu naturalnych procesów zachodzących w przyrodzie, a co za tym idzie naturalną reakcją człowieka przy ocenie spełniania wymagań,
- pozwala jednoznacznie ocenić uzyskane wyniki, ponieważ opiera się na dwóch punktach – niedopuszczalnym i całkowicie dopuszczalnym, które mogą zostać w łatwy sposób określone.



Rys. 1. Funkcja spełniania wymagań [wg. 4]

W celu agregacji wymagań w oparciu o funkcję Harringtona oraz optymalizacji obiektu, bądź procesu należy określić:

- 1) mierzalne bądź obliczeniowe wskaźniki J_j poszczególnych j -tych wymagań,
- 2) wartości wskaźników J_j , od których rozpoczyna się stan niedopuszczalny oraz do których przebiega stan zadowalający,
- 3) transformację wyznaczonych wskaźników w bezwymiarowe zmienne $h_j = c_0 + c_1 J_j$,
- 4) wartości poszczególnych składników funkcji Harringtona dla danych h_j , poprzez wyznaczenie funkcji $H_j = e^{-e^{-h_j}}$,
- 5) obliczenie wartości wskaźnika agregacji H .

Określanie danych zgodnie z punktami 1÷3 odbywają się na początku agregacji, natomiast wyznaczanie wartości z punktów 4÷5 odbywa się w każdym kroku agregacji [4].

5.2. Koncepcja oceny jakości hamowania

Agregacja może zostać użyta do złączenia w całość wyników badań doświadczalnych, które uzyskuje się na podstawie badań określonego zjawiska. Wynikiem badań mogą być różne parametry charakteryzujące zjawisko, uzyskane np. w trakcie jednej serii badań. Przyjęcie takiej metody oceny wyników pozwala stwierdzić, czy uzyskane składowe parametry występujące wspólnie, są zadowalające czy też nie. Ocena jakości hamowania docelowego nie może obejmować bezpośrednio samego opóźnienia hamowania pociągu. Hamowanie docelowe odbywa się na zasadzie odpowiedniej regulacji siły hamowania oraz na śledzeniu trajektorii hamowania pociągu, która została wyznaczona doświadczalnie. Tak więc, bezpośrednio ocenie nie będzie podlegać opóźnienie hamowania, ponieważ jest ono wartością wynikową określaną w urządzeniach odpowiedzialnych za proces hamowania pociągu. Za podstawową wartość mierzalną przyjmowaną do oceny jakości hamowania przyjmuje się dokładność hamowania w odpowiedniej jednostce miary. Kolejną wartością jaką należy uwzględnić podczas wyznaczania jakości hamowania metodą Harringtona, jest prędkość zmieniająca się w czasie, na określonej długości drogi.

6. Podsumowanie

Najczęściej spotykaną metodą uwzględniania wielu wymagań jest sumowanie wskaźników

będących miarą stopnia spełniania wymagań. Problemem praktycznym jest wybór wag odpowiednich składników. W takim przypadku brakuje wskazań jak dobrać wagi takich składników, szczególnie gdy składowe wskaźniki są różnej natury fizycznej. Wraz ze zwiększaniem się liczby składowych, powstaje problem jednoznaczności określenia całości zjawiska. Problem takiej natury pojawia się przy ocenie jakości hamowania opisaną wzorem 3. Przedstawiona metoda agregacji za pomocą funkcji Harringtona pozwala uzyskać wynik zerowy, jeśli jedno z wymagań pozostaje niespełnione. Wartość wynosząca 1 otrzymana jest tylko wtedy, gdy każde z założonych wymagań zostaje spełnione. A zatem analizując jakość hamowania proponowaną metodą, za miarę spełniania wymagania należy przyjąć dokładność hamowania względem punktu docelowego oraz zmianę prędkości podczas hamowania pociągu.

7. Literatura

- [1]. Anuszczyk J., Gocek A.: *Hamowanie pociągów metra z napędem prądu stałego i przemiennego przy wykorzystaniu systemu ATO*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL Nr 86/2010, Ryto 2010, ss. 23-28.
- [2]. Anuszczyk J., Gocek A.: *Obliczenia hamowania docelowego pociągów metra z uwzględnieniem różnych rodzajów napędu*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL Nr 90/2/2011, Ryto 2011, ss. 23-28.
- [3]. Jezierski E., Karbowski H.: *Problemy optymalizacji automatycznego hamowania*. Zagadnienia Transportu nr 3/4, 1985, s. 69-83.
- [4]. Muszyński R.: *Optymalizacja struktur napędów z falownikiem napięcia przy uwzględnieniu oddziaływania na sieć*. Materiały XIV Sympozjum PPEEm 2011 - Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki, Wisła, 2011, ss. 83-88.
- [5]. Norma PN-EN ISO 9000:2001. *Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia*.

Autorzy

Zakład Transportu i Przetwarzania Energii
Instytut Elektroenergetyki Politechniki
Łódzkiej

Kontakt z autorami publikacji:

Prof. Jan Anuszczyk, kierownik Zakładu
jan.anuszczyk@p.lodz.pl

Dr inż. Sławomir Barański, adiunkt
slawomir.baranski@p.lodz.pl

Mgr inż. Andrzej Gocek, doktorant
andrzej.gocek@p.lodz.pl