

Jan Anuszczyk, Andrzej Gocek
Politechnika Łódzka, Łódź

OBLICZENIA HAMOWANIA DOCELOWEGO POCIĄGÓW METRA Z UWZGLĘDNIENIEM RÓŻNYCH RODZAJÓW NAPĘDU

CALCULATION OF TARGET BRAKING OF UNDERGROUND TRAINS TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENT TYPES OF DRIVES

Abstract: In the paper target braking of underground trains as a function of an Automatic Train Operation (ATO) system has been described. Target braking relies on automatic train stopping at the stations, wherein braking process is fully controlled by a computer device and it is executed by a proper control of electric motors. Also functionality of the SOP-2 system used in the Warsaw underground is presented. The rolling stock powered by an AC and DC motor as an example of target braking has been taken into consideration. Finally, a direct braking simulation model created in the SIMULINK software has been discussed. The calculations of target braking performed for a Alstom Metropolis train are presented.

1. Wstęp

Ruch pociągów metra odbywa się w specyficznych podziemnych warunkach. Jazdę pociągu metra charakteryzuje wysoka prędkość rozwijana między przystankami oraz niewielkie odstępy pomiędzy pociągami. Jednocześnie długości peronów są zbliżone do długości pociągów. Takie warunki podróżowania wymagają zaawansowanych rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo ruchu. Realizację ograniczeń prędkości zapewnia system automatycznego ograniczania prędkości (*ATP*), którego zadaniem jest kontrolowanie prędkości pociągu. W przypadku przekroczenia dozwolonej prędkości system ogranicza ją do prędkości dopuszczalnej (bezpiecznej), obowiązującej na danym odcinku linii. System *ATP* jest systemem nadrzędnym i może współpracować z podrzędnym systemem automatycznej jazdy pociągu (*ATO*). Zadaniem tego systemu jest automatyzacja czynności maszynisty związanych z prowadzeniem pociągu.

Przez hamowanie docelowe rozumie się proces automatycznego zatrzymywania pociągu na stacji. Takie hamowanie stosuje się przede wszystkim na liniach metra, a proces ten jest realizowany jako jedna z funkcji systemu automatycznej jazdy pociągów *ATO*. Przeprowadzenie procesu hamowania docelowego wymaga rozwiązania dwóch podstawowych problemów: rozpoczęcia hamowania w odpowiednim miejscu przed punktem zatrzymania oraz przeprowadzenia właściwej regulacji siły hamowania [1,4].

2. Automatyzacja jazdy pociągu metra

2.1. Automatyczna jazda pociągu w systemie ATO

System ATO realizuje automatyczną jazdę pociągu od stacji do stacji. Podstawowe czynności tego systemu to:

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

W zależności od potrzeb, automatyzacji można poddać niektóre bądź wszystkie fazy jazdy pociągu. Automatyczna jazda pociągu musi odbywać się zgodnie z ustalonym algorytmem. Algorytm musi zapewnić przejazd pociągu zgodnie z rozkładem jazdy i zatrzymać pociąg w odpowiednim miejscu. Jednocześnie powinna być zapewniona energooszczędna jazda pociągu. System ATO może także spełniać inne dodatkowe zadania np.: otwierać i zamykać drzwi w peronie, zawracać pociąg na stacji końcowej. System automatycznej jazdy pociągu steruje automatycznie napędem i hamulcami pociągu, tak aby w każdej chwili i w każdym miejscu drogi prędkość rzeczywista pociągu była równa prędkości zadanej. 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 ruchu pociągów. W pełni elastyczny system ATO na bieżąco wy-

znacza prędkość zadaną dla każdego pociągu. Do jej wyznaczenia potrzebne są parametry danego pociągu – między innymi zakres regulacji przyspieszenia i opóźnienia rozruchu oraz czasy reakcji urządzeń napędowo-hamulcowych na sygnały sterujące [1].

2.2. Hamowanie docelowe

Hamowanie docelowe polega na stopniowym zmniejszaniu prędkości rzeczywistej pociągu V_{rz} do wartości prędkości dopuszczalnej $V_d=0$, którą należy uzyskać w punkcie ograniczenia prędkości x_d , przy jednoczesnym nie przekroczeniu dopuszczalnego opóźnienia hamowania a_h . Samoczynne hamowanie docelowe pociągu występuje w czasie zatrzymywania pociągu, tzn.:

- Przy peronie, gdzie zatrzymanie pociągu powinno być bardzo dokładne, a rzeczywiste miejsce zatrzymania pociągu x_{rz} musi spełniać następujący warunek

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

- Przy semaforze, gdzie rzeczywiste miejsce zatrzymania powinno wynosić

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

przy czym: 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 zatrzymanie 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 w wymaganym punkcie linii. Spełnienie tych wymagań oraz znajomość

wpływu stosowanego układu napędowego na dokładność hamowania pozwala na precyzyjne zatrzymanie pociągu z bardzo dużą dokładnością, rzędu kilku centymetrów [1].

3. Hamowanie docelowe pociągów metra w metrze warszawskim

3.1. System automatycznego ograniczania prędkości SOP-2

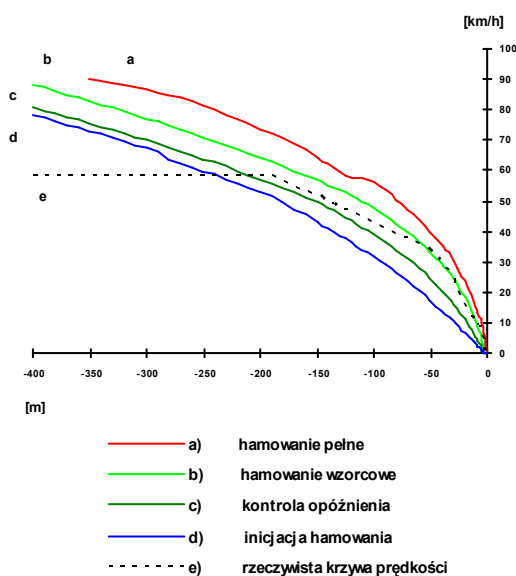
Pierwszą linię metra w Warszawie wyposażono w system automatycznego ograniczania prędkości (*ATP*) o nazwie SOP-2. Ponadto, działanie tego systemu rozszerzono o funkcję systemu automatycznej jazdy pociągu (*ATO*), zapewniającą hamowanie docelowe pociągu w peronie. Działanie systemu SOP polega na przypisaniu odstępom blokowym pewnych dozwolonych prędkości, których pociąg nie może przekroczyć. Tak powstały schodkowy przebieg prędkości, zapewnia zatrzymanie pociągu przed zajęciem przez inny pociąg odstępem blokowym. Odstępem blokowym przypisuje się następujące prędkości: 85, 76 58, 30, 0 km/h.

Transmisja danych potrzebnych do działania systemu odbywa się za pośrednictwem pętli przewodowych, których długość odpowiada długościom odstępów blokowych. Pętli przewodowe są przewodami ułożonymi równolegle w osi toru, a transmisja z ich wykorzystaniem odbywa się jednokierunkowo (tzn. do pociągu). Zastosowanie pętli przewodowych zapewnia ciągłą transmisję danych do systemów *ATP* i *ATO*. Na wszystkich stacjach rozmieszczenie pętli przewodowych jest bardzo podobne, co znacznie upraszcza wdrożenie hamowania docelowego dla koncepcji napędów opisanych poniżej [5].

3.2. Pociągi serii 81 z szeregowym silnikiem prądu stałego

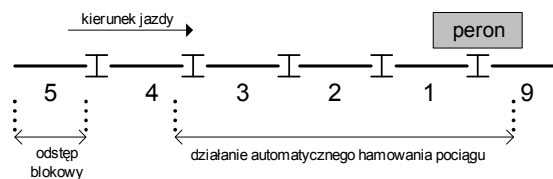
Automatyczne zatrzymanie pociągu na stacji realizowane jest na podstawie krzywych prędkości wpisanych w pamięć mikrokomputera systemu SOP-2. Są to cztery krzywe określające odległość pociągu od punktu zatrzymania, (Rys.1). Inicjacja hamowania następuje po przekroczeniu krzywej inicjacji hamowania d . Następnie hamowanie pociągu odbywa się zgodnie z przebiegiem krzywej hamowania wzorcowego b , która została wyznaczona doświadczalnie podczas hamowania przez maszynistę. Krzywa hamowania pełnego a oraz krzywa kontroli opóźnienia c zapobiegają zbyt szybkim

zmianom opóźnienia hamowania w czasie i zapewniają zatrzymanie pociągu w ściśle określonym punkcie linii (tj. w peronie).



Rys. 1. Krzywe prędkości wykorzystywane do zatrzymania pociągu serii 81, [2]

Podstawą do wypracowania rozkazów sterujących procesem hamowania jest różnica między współrzędnymi drogi wpisanymi w krzywe, a współrzędną drogi mierzoną od punktu zatrzymania. Odległość od punktu zatrzymania w sposób dokładny, określana jest na podstawie numeru odstepu blokowego na którym znajduje się pociąg (Rys.2). Pojazd dodatkowo wyposażony jest w licznik mierzący bieżącą odległość do punktu zatrzymania. Odstepy blokowe w obrębie każdej stacji mają jednakową długość ok. 96 m, dlatego w chwili najechania pociągu na odpowiedni odstep blokowy do licznika drogi wpisywana jest przybliżona odległość od punktu zatrzymania. W kolejnym kroku od wpisanej wartości drogi do punktu zatrzymania, odejmowana jest wartość drogi przebytej przez pociąg. Nad kolejnym odstepem blokowym wpisywana jest do licznika drogi nowa wartość i tak proces pomiaru drogi przebiega do punktu zatrzymania. Skorygowanie mierzonej odległości polega na ustawieniu stałego punktu w odległości 50 m przed każdym miejscem zatrzymania. Jego wykrycie traktowane jest jako ostatnie ustawienie licznika drogi.

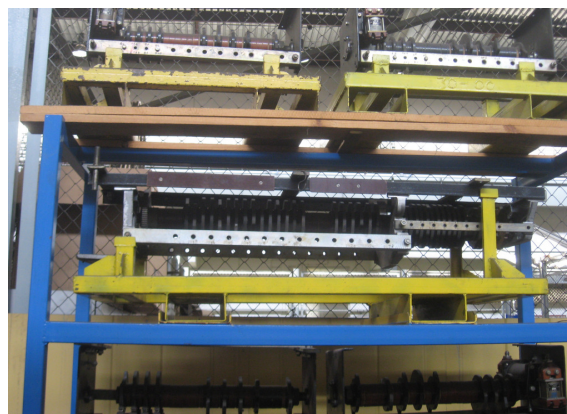


Rys. 2. Lokalizacja pociągu na podstawie numeru odstepu blokowego, [2]

Hamowanie pociągu serii 81 można podzielić na trzy fazy:

- 1) Hamowanie elektrodynamiczne z ustaloną maksymalną wartością rezystora hamowania oraz regulacją wzbudzenia od 48% do 100%.
- 2) Stopniowe zmniejszanie rezystancji w obwodzie hamowania pod kontrolą przekaznika samoczynnego rozruchu i hamowania.
- 3) Zastąpienie hamowania elektrodynamicznego poprzez hamowanie pneumatyczne, działające ze stałą wartością opóźnienia.

Regulacja wzbudzenia odbywa się za pomocą kluczy tyrystorowych, które bocznikują uzwojenia magnesujące silników trakcyjnych pracujących jako prądnice. Takie rozwiązanie zapewnia stałą wartość prądu twornika (240A dla wagonu pustego i 360A dla wagonu pełnego), który jest kontrolowany przez elektroniczny blok nastaw prądowych sterujący pracą kluczy tyrystorowych. Po osiągnięciu 100% wartości wzbudzenia zostaje odblokowany układ sterowania wałem kulakowym i rozpoczyna się druga faza hamowania (Rys.3). Silniki trakcyjne pracujące jako prądnice, poniżej prędkości 10 km/h tracą zdolność hamowania i w trzeciej fazie rozpoczyna się hamowanie mechaniczne.

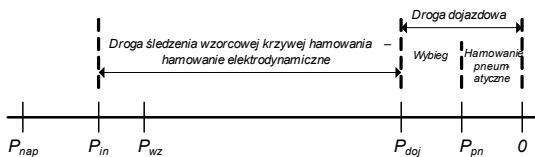


Rys. 3. Wały kulakowe z wagonu serii 81 – STP Kabaty

Regulacja siły hamowania poprzez zmianę prądu może być stosowana zarówno w pierwszej i drugiej fazie hamowania, przy założeniu wartości zmiany $\Delta I < 60A$. Przyjęcie takiej wartości pozwoli uniknąć zadziałania zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych i przy tym uruchomienia hamowania pneumatycznego pełnego. Sterowanie hamowaniem przy współpracy z systemem SOP głównie opiera się na sterowaniu wałem kułakowym. Obwód wału sprzężony jest z blokiem nastaw prądowych, a przy braku zasilania w tym obwodzie, prąd hamowania w pierwszej fazie maleje do 150A (z 240A dla pustego pociągu). W drugiej fazie hamowania odcięcie zasilania obwodu wału kułakowego powoduje jego zatrzymanie, a prąd hamowania łagodnie maleje do małych wartości. Ponowny ruch wału kułakowego z interwałem czasu równym 0,16 s możliwy jest po pojawieniu się napięcia sterującego, co pozwala na stopniowy wzrost prądu hamowania. Realizację kształtu wzorcowej krzywej hamowania uzyskuje się odpowiednio dobierając odstępy w czasie zasilania obwodów sterujących wałami kułakowymi [2, 5].

3.3. Pociągi Alstom Metropolis z silnikiem indukcyjnym prądu przemiennego

Hamowanie docelowe pociągu Alstom Metropolis składa się z kilku następujących po sobie etapów. Kolejność oraz funkcje realizowane w poszczególnych etapach przedstawia rysunek 4. Podobnie jak w poprzednim przypadku, podstawowym rodzajem hamowania jest tu hamowanie elektrodynamiczne.



Rys. 4. Punkty charakterystyczne procesu hamowania docelowego pociągu Metropolis, [2]

Poszczególne punkty na rysunku 4 oznaczają:

P_{nap} – wyłączenie napędu,

P_{in} – inicjacja regulatora siły hamowania,

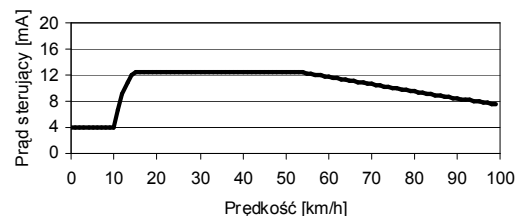
P_{wz} – rozpoczęcie śledzenia wzorcowej krzywej hamowania,

P_{doj} – zakończenie śledzenia wzorcowej krzywej hamowania (wyłączenie regulatora),

P_{pn} – włączenie hamulców pneumatycznych.

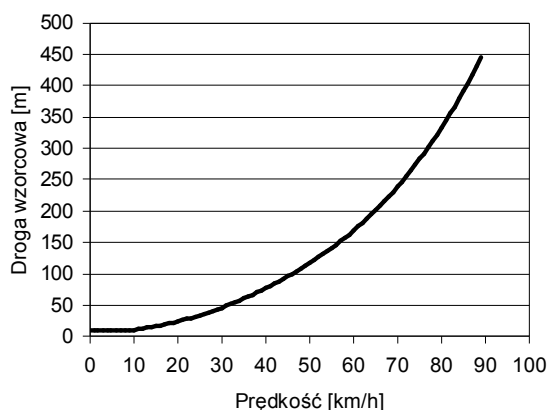
Po przejechaniu nad pętlą inicjującą proces hamowania, rozpoczyna się odmierzenie odległości do punktu zatrzymania oraz pomiar prędko-

ści rzeczywistej z jaką porusza się aktualnie pociąg. Komputer porównuje drogę rzeczywistą z drogą zapisaną w krzywej wyłączenia napędu i na tej podstawie, w punkcie P_{nap} następuje wyłączenie napędu. Na podstawie porównania drogi rzeczywistej z drogą odczytywaną z krzywej rozpoczęcia hamowania, w punkcie P_{in} rozpoczyna się praca regulatora hamowania. Droga jaką przejeżdża pociąg do punktu P_{wz} wynika z czasu jaki regulator potrzebuje na rozpoczęcie śledzenia zadanej trajektorii (Rys.6). Realizacja wzorcowej krzywej hamowania polega na wpisywaniu się w nią przez pociąg, przy wykorzystaniu hamowania elektrodynamicznego. Prąd sterujący przyjmuje wówczas wartość zgodną z wzorcową charakterystyką siły hamowania (Rys.5).



Rys. 5. Wzorcowa charakterystyka siły hamowania, [2]

W punkcie P_{doj} regulator siły hamowania kończy pracę i rozpoczyna się jazda wybiegiem. W trakcie jazdy z rozpędu, komputer śledzi doświadczalnie wyznaczoną charakterystykę załączania hamowania pneumatycznego. Po zrównaniu się aktualnej odległości od punktu zatrzymania z drogą hamowania w punkcie P_{pn} rozpoczyna się hamowanie pneumatyczne, które realizowane jest ze stałą wartością opóźnienia i nie podlega regulacji. Podstawą działania regulatora siły hamowania jest występujący błąd pomiędzy drogą rzeczywistą, a drogą odczytywaną ze wzorcowej krzywej hamowania (przy określonej prędkości pociągu). Zadaniem regulatora jest ciągłe dokonywanie korekty prądu sterującego zgodnie z wzorcową krzywą hamowania (Rys.6). Regulator przeprowadza odpowiednie sterowanie siłą hamowania bez względu przy jakiej prędkości oraz w jakiej odległości od punktu zatrzymania rozpocznie się proces hamowania docelowego.



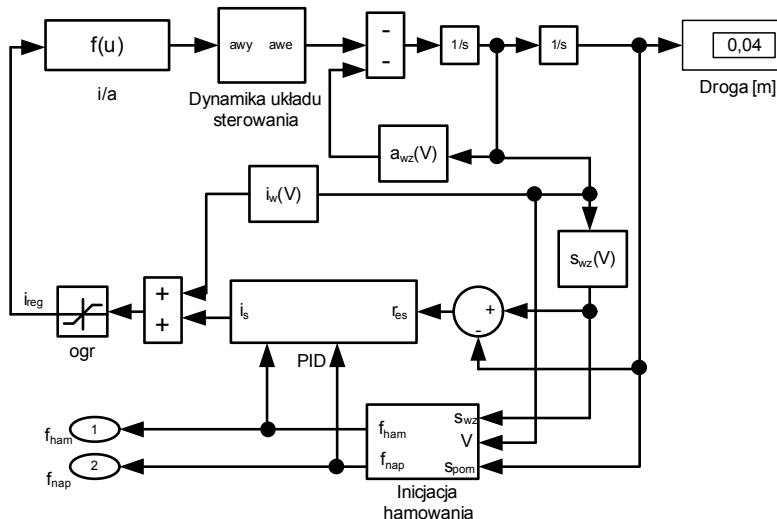
Rys. 6. Wzorcowa krzywa hamowania, [2]

Napęd pociągu jest kontrolowany za pośrednictwem prądu sterującego, który podczas hamowania zmienia się od 4 mA do 20 mA co odpowiada opóźnieniu hamowania od 0 m/s^2 do $1,3 \text{ m/s}^2$. Płynne regulowanie opóźnienia hamowania odbywa się za pomocą sterowania pętlą prądową poprowadzoną od urządzeń SOP do encodera umieszczonego w obwodach sterowania pociągiem. W przypadku gdy pociąg prowadzi maszynista źródłem sygnału sterującego wartością opóźnienia hamowania jest nastawnik jazdy. Przy hamowaniu docelowym realizowanym przez SOP, opóźnienie hamowania ustala system. Urządzenia systemu SOP są wyposażone w układ wyjściowy pętli prądowej, którym przesyłana jest zadana wartość prądu sterującego oraz dwa wejścia prądowe, które realizują zmianę wartości z linii prądowej na napięcie. Jedno wejście używane jest do określania wartości prądu sterującego zadawanym za pomocą nastawnika jazdy, a drugie wejście odbiera sygnał wypracowany przez system SOP. W przypadku wystąpienia dwóch sygnałów zawsze jest wybierana większa wartość opóźnienia hamowania. Gwarantuje to bezpieczeństwo realizowanego automatycznego procesu hamowania, które w przypadku jakichkolwiek niezgodności może przejąć maszynista. Podczas hamowania elektrodynamicznego wykorzystywane jest 75% maksymalnego momentu hamującego silników. Umożliwia to regulatorowi sterowanie hamowaniem elektrodynamicznym „w górę” lub „w dół”. Podstawą działania automatycznego procesu hamowania docelowego jest wzorcowa charakterystyka siły hamowania – Rys.5, która zapewnia odpowiednie wykorzystanie silników trakcyjnych do hamowania elektrodynamicznego. Na jej podstawie w spo-

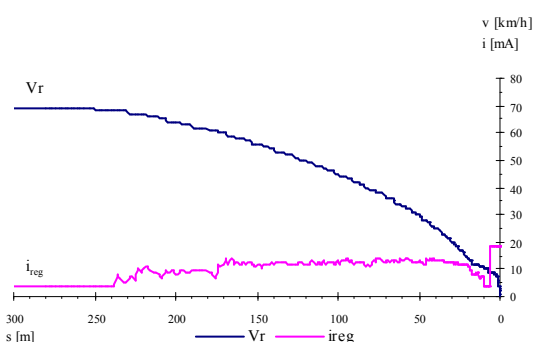
sób symulacyjny wyznaczono wzorcową krzywą hamowania – Rys.6, która określa zależność pomiędzy drogą pokonywaną przez pociąg, a jego prędkością podczas śledzenia wzorcowej charakterystyki hamowania przy hamowaniu elektrodynamicznym na dojeździe do stacji. Po przekroczeniu krzywej wyłączenia napędu, napęd zostaje wyłączony. Krzywa ta jest na bieżąco wyliczana w regulatorze na podstawie wzorcowej krzywej hamowania, zgodnie z zasadą, że pomiędzy chwilą wyłączenia napędu, a odczytem krzywej wzorcowej upływa określony czas t_0 wynikający z prędkości pociągu. O włączeniu hamowania decyduje krzywa inicjacji hamowania, która wyprzedza wzorcową krzywą hamowania o 0,3 s [2, 3].

4. Obliczenia hamowania docelowego dla pociągu Alstom Metropolis

Wykonane obliczenia symulacyjne hamowania docelowego wykonano w Simulinku. Model symulacyjny, (Rys.7) opisuje dynamikę sterowania i jazdy pociągu. Sygnałem sterującym jest prąd sterowania (i_{reg}), natomiast sygnałami wyjściowymi – prędkość oraz droga przebyta przez pociąg. Regulator siły hamowania jest regulatorem równoległym PID, pełniącym rolę regulatora prądu. Działanie regulatora polega na wypracowaniu korekty prądu sterującego (i_w) na podstawie różnicy pomiędzy wzorcową charakterystyką hamowania (s_{wz}), a drogą rzeczywistą jaką pociąg przejechał. Pozostałe elementy modelu symulacyjnego są odpowiedzialne za prawidłowe sterowanie przebiegiem hamowania docelowego. Symulację przeprowadzono na modelu dyskretnym w czasie oraz pod względem wartości sygnałów. Wzorcowa krzywa hamowania, (Rys.6) została obliczona przy wykorzystaniu modelu symulacyjnego, w którym pominięty został regulator PID. Podczas obliczeń wzorcowej krzywej hamowania uwzględniono średnią masę pociągu i zmieniające się opory ruchu. Obliczenia wykonano dla rejonu stacji o zerowym profilu pionowym i poziomym toru. Wyniki obliczeń symulacyjnych obrazuje rysunek 8. Wykres przedstawia przebieg wzorcowej trajektorii hamowania dla przykładowo wybranej stacji. Zarówno prędkość V_r oraz prąd sterujący i_{reg} są w funkcji drogi [3].



Rys. 7. Model symulacyjny hamowania docelowego dla pociągu Metropolis, [3]



Rys. 8. Przykładowa trajektoria hamowania docelowego uzyskana z obliczeń symulacji komputerowej, [3]

5. Podsumowanie

Hamowanie docelowe pociągów serii 81 z napędem prądu stałego zapewnia zatrzymanie pociągu z dokładnością $\pm 0,5$ m względem punktu zatrzymania. W niektórych przypadkach odchylenia od punktu zatrzymania wynoszą $\pm 1,5$ m.

Odchylenia od punktu zatrzymania dla pociągów Alstom Metropolis wynoszą średnio $\pm 0,3$ m, w sporadycznych przypadkach $\pm 0,5$ m. Podane odchylenia nazywane umownie dokładnością hamowania są zbyt duże z punktu widzenia obecnych wymagań. Dlatego podjęte zostały prace naukowe, których celem jest znaczący wzrost dokładności hamowania (nawet do poziomu $\pm 0,05$ m).

6. Literatura

[1]. Anuszczyk J., Gocek A.: *Hamowanie pociągów metra z napędem prądu stałego i przemiennego przy wykorzystaniu systemu ATO*. Zeszyty Problemowe

Komel – Maszyny Elektryczne Nr 86/2010, Rytró 2010, ss. 23-28.

[2]. Barański S., Bergiel K., Dębowski A., Kubik S.: *Hamowanie docelowe pociągów w metrze warszawskim*. Materiały VI Konferencji Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI Wieku MET 2003, Warszawa 2003.

[3]. Barański S., Dębowski A., Kolasa T.: *Algorytm hamowania docelowego pociągów Metropolis w metrze warszawskim*. Materiały VI Konferencji Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI Wieku MET 2003, Warszawa 2003.

[4]. Barański S., Gocek A.: *Analiza przepustowości linii metra dla różnych długości obwodów torowych*. Materiały konferencyjne XIV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej Semtrak 2010, Zakopane 2010, ss. 323-328.

[5]. Barański S., Kubik S.: *Automatyczne zatrzymywanie pociągów na przystankach w metrze warszawskim*. Materiały konferencyjne VII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej Semtrak 1996, Zakopane 1996, ss. 123-130.

Autorzy

dr hab. inż. Jan Anuszczyk, prof. PŁ

jan.anuszczyk@p.lodz.pl

mgr inż. Andrzej Gocek, doktorant PŁ

andrzej.gocek@p.lodz.pl

Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.