

Piotr Błaszczyk, Sławomir Barański  
Politechnika Łódzka, Łódź

## HAMOWANIE DOCELOWE POCIĄGU METRA

### TARGET BRAKING OF THE SUBWAY TRAIN

**Streszczenie:** Na I linii metra w Warszawie, działającej od 1995 r. jest eksploatowany system automatycznego ograniczania prędkości typu SOP-2. Po kilku latach funkcjonalność systemu została rozszerzona o automatyczne zatrzymywanie pociągu metra na przystanku. Realizując funkcje hamowania docelowego urządzenia wyliczają odległość do punktu zatrzymania i samoczynnie regulują siłę hamowania tak, aby zatrzymać się w wyznaczonym punkcie peronu z odpowiednią precyzją. Hamowanie docelowe jest uruchomione na dwóch typach pociągów eksploatowanych w Warszawie - rosyjskich pociągach typu 81 wyposażonych w silniki szeregowe prądu stałego i pociągach typu Metropolis z napędem asynchronicznym.

**Abstract:** The underground line in Warsaw from the beginning was equipped with automatic train protection system type SOP-2. After several years of operation system SOP-2 was modernized and expanded by automatic braking at the platform, called target braking. This function is realized by automatic starting of braking in calculated point and proper regulation of its run to obtain the established precision of train stopping. The target braking function was developed and applied in Russian trains 81 type with DC traction motors and ALSTOM Metropolis trains with inverter fed AC motor drive.

**Słowa kluczowe:** hamowanie docelowe, pociąg metra  
**Keywords:** target braking, subway train

#### 1. Wstęp

Hamowaniem docelowym nazywa się proces automatycznego zatrzymywania pociągu na stacji. Jest to hamowanie do celu, którym jest wyznaczony punkt zatrzymania. Hamowanie takie stosuje się głównie na liniach metra i stanowi ono jedno z zadań systemu automatycznej jazdy pociągów.

Pierwsza linia metra w Warszawie wraz z eksploatowanym tam taborem wyposażona jest od chwili uruchomienia w system SOP-2 spełniający funkcje systemu bezpiecznej jazdy pociągu (ATP). System SOP-2 opracowany został w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Łódzkiej (obecnie Zakład Transportu i Przetwarzania Energii). Po kilku latach eksploatacji zadania systemu poszerzono o funkcję automatycznego zatrzymywania pociągu na przystanku.

Podstawowym kryterium jakości hamowania pociągu na przystanku jest dokładność zatrzymania w wyznaczonym punkcie. Przyjęto, że w metrze warszawskim tolerancja zatrzymania nie powinna przekraczać  $\pm 1,5$  m. Drugim nie mniej istotnym kryterium jest komfort jazdy pasażerów wymagający takiego prowadzenia procesu hamowania, aby nie wystąpiły gwałtowne zmiany opóźnienia ruchu pociągu objawiające się nieprzyjemnymi szarpnięciami.

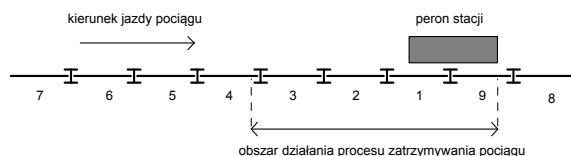
Obecnie w metrze warszawskim eksploatowane są dwa typy pociągów. Pociągi rosyjskie typu 81 z silnikami prądu stałego z tradycyjnym rozruchem i hamowaniem elektrodynamicznym oporowym oraz pociągi Metropolis produkcji firmy Alstom, wyposażone w silniki asynchroniczne zasilane przez układ falownikowy z płynnym sterowaniem rozruchem i hamowaniem. Hamowanie docelowe tych pociągów w tych dwóch typach pociągów ze względu na zupełnie odmienny sposób sterowania wymagało opracowania dwóch różnych algorytmów sterowania.

#### 2. Wyznaczanie odległości do punktu zatrzymania

Automatyczne zatrzymywanie pociągu na przystanku wymaga rozwiązania dwóch problemów technicznych: zainicjowania hamowania we właściwej odległości od punktu zatrzymania, uzależnionej od prędkości zbliżania się do przystanku oraz odpowiedniej regulacji siły hamowania, zapewniającej wymaganą celność trafienia w ten punkt.

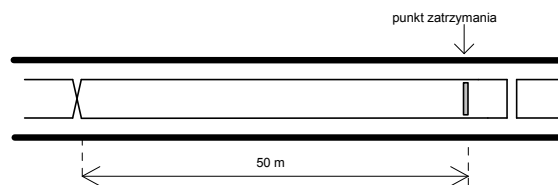
Do poprawnej realizacji obydwu tych zadań niezbędna jest znajomość dokładnej odległości pociągu do punktu zatrzymania podczas procesu hamowania. Niestety w danych przekazy-

wanych w systemie SOP-2 z toru do pociągu nie ma takiej informacji, Problem ten rozwiązano korzystając z faktu, że rozmieszczenie odstępów blokowych, a więc również pętli transmisyjnych, jest na wszystkich stacjach pierwszej linii metra bardzo podobne. Wynika to z jednakowego usytuowania semaforów wyjazdowych i zbliżonych długości odstępów blokowych w rejonie stacji. Odległość do punktu zatrzymania można więc z pewnym przybliżeniem ocenić na podstawie numeru odstepu blokowego, na którym znajduje się pociąg. Numer ten jest przekazywany urządzeniom pojazdowym przez poszczególne pętle transmisyjne dla potrzeb tzw. kabinowego wyświetlacza sytuacji ruchowej. Przyporządkowanie numerów odstepom blokowym przedstawione na rys. 1, jest jednakowe na wszystkich odcinkach pomiędzy stacjami.



Rys. 1. Numeracja odstępów blokowych

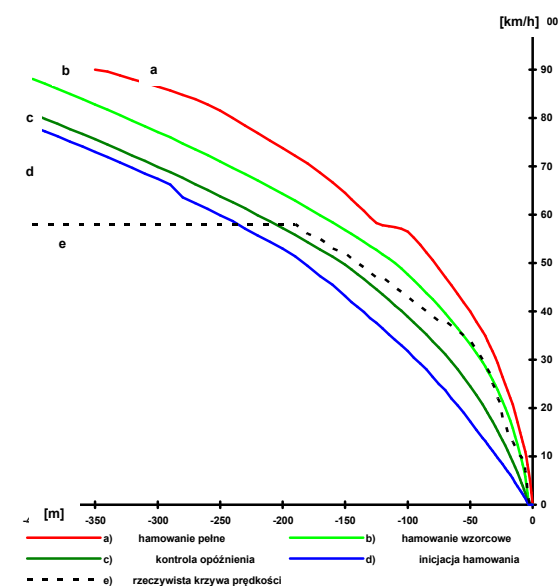
W momencie wjazdu pociągu w obręb oddziaływania pętli, przyporządkowanej odstepowi blokowemu nr 3, następuje synchronizacja układu odmierzenia odległości do punktu zatrzymania. W trakcie jazdy pociągu po odstepie blokowym odległość ta jest uaktualniana na podstawie pomiaru obrotów kół pociągu. Po wjeździe nad pętlę odstepu blokowego nr 2 bieżący stan licznika drogi zostaje zastąpiony nową wartością przybliżonej odległości do punktu zatrzymania. Kolejne korekty, wpisujące odległości coraz bardziej zbliżone do rzeczywistych następują na początku pętli transmisyjnych kolejnych odstępów blokowych znajdujących się przy peronie. Aby złagodzić wpływ istniejących rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi długościami odstępów blokowych na różnych stacjach, przed każdym punktem zatrzymania, w dokładnie odmierzonej odległości 50 m usytuowane jest skrzyżowanie pętli (rys.2). Wykrycie tego skrzyżowania przez urządzenia pojazdowe traktowane jest jako ostateczna synchronizacja odległości do punktu zatrzymania.



Rys. 2. Skrzyżowanie pętli nadawczej do końcówki korekty licznika drogi

### 3. Hamowanie docelowe w pociągach rosyjskich typu 81

W pamięci komputera pojazdowego systemu SOP-2 zapisane są cztery znormalizowane krzywe prędkości (rys.1) w funkcji drogi - odległości do punktu zatrzymania.



Rys. 3. Krzywe prędkości kontrolowane przy hamowaniu docelowym pociągu typu 81

Najniżej położoną jest krzywa d, po przekroczeniu której system powinien wyłączyć napęd i zainicjować hamowanie. Krzywa odpowiadająca zadanemu przebiegowi hamowania przed przystankiem oznaczona została na rysunku literą b. Została ona tak zaprojektowana, że mieści się w całości pod progami stałych ograniczeń prędkości systemu ATP przed przystankami. Jej kształt odpowiada przebiegowi hamowania sterowanego ręcznie przez doświadczonych maszynistów. Dwie pozostałe krzywe a i c, obustronnie okalające zadaną krzywą hamowania, wykorzystane są do odpowiedniego sterowania procesem hamowania, mającego na celu uniknięcie zbyt szybkich zmian opóźnienia ruchu pociągu, a jednocześnie zapewniają wystarczającą dokładność zatrzymania.

Proces hamowania od prędkości przejazdowej do zatrzymania w pociągu typu 81 przebiega w trzech fazach. Pierwszą fazą jest hamowanie elektrodynamiczne z maksymalną wartością rezystora hamowania (wał kułakowy na pierwszej pozycji) i z płynną regulacją wzbudzenia od 48% do 100% za pomocą kluczy tyrystorowych, bocznikujących uzwojenia magnesujące pracujących prądnicowo silników trakcyjnych. Dzięki tej regulacji utrzymywana jest stała wartość prądu płynącego przez tworniki maszyn, uzależniona od stopnia obciążenia wagonów (od 240 A w wagonach próżnych do 360 A w wagonach całkowicie wypełnionych). Prąd ten jest ustawiany i kontrolowany przez elektroniczny blok nastaw prądowych, sterujący pracą kluczy tyrystorowych. Ta faza hamowania obejmuje zakres prędkości od 85 km/h do około 65 km/h w wagonach wypełnionych, i około 50 km/h w wagonach próżnych. Po osiągnięciu stopnia wzbudzenia 100% zostaje odblokowany układ sterowania wałem kułakowym i rozpoczyna się druga faza hamowania, polegająca na stopniowym zmniejszaniu rezystancji w obwodzie hamowania pod kontrolą przekaźnika samoczynnego rozruchu i hamowania. Hamowanie elektrodynamiczne traci skuteczność przy prędkości  $8 \div 10$  km/h i w trzeciej fazie zostaje zastąpione hamowaniem elektro-pneumatycznym, które na niespełna trzech ostatnich metrach zatrzymuje pociąg.

System SOP-2 w pociągach typu 81 reguluje siłę hamowania poprzez bezpośrednie oddziaływanie na obwody sterowania wałem kułakowym w każdym wagonie pociągu (w pociągu typu 81 każdy z wagonów posiada napęd). Obwód sterowania wałem kułakowym w każdym wagonie jest sprzężony z blokiem nastaw prądowych w taki sposób, że przy braku zasilania tego obwodu prąd w pierwszej fazie hamowania, podczas tyrystorowej regulacji pola, znacznie maleje (np. w pociągu próżnym z 240 A do około 150 A). W drugiej fazie hamowania przerwanie zasilania tego obwodu powoduje zatrzymanie się wału kułakowego, wskutek czego prąd hamowania łagodnie maleje do bardzo małych wartości. Podanie napięcia sterującego wymusza ponowny ruch wału kułakowego, który osiąga kolejne pozycje co 0,16 s, a prąd hamowania stopniowo narasta. W ten sposób, odpowiednio dozując czasy zasilania i przerw w obwodach sterowania wałami kułakowymi, uzyskuje się żądany przebieg krzywej hamowa-

nia przy jednoczesnym uniknięciu zbyt gwałtownych zmian opóźnienia ruchu pociągu.

Hamowanie docelowe pociągów typu 81 realizowane według przyjętej zasady charakteryzuje dość duża celność zatrzymania. Odchylenia od punktu zatrzymania nie przekraczają zwykle  $\pm 1,5$  m.

#### 4. Hamowanie docelowe w pociągach typu Metropolis

Sterowanie siłą napędu i hamowania w pociągach Metropolis odbywa się za pomocą pętli prądowej. W fazie hamowania zmiana wartości tego prądu od 4 mA do 20 mA daje zmianę wartości opóźnienia hamowania pociągu od  $0 \text{ m/s}^2$  do  $1,3 \text{ m/s}^2$ . Realizacja hamowania docelowego przez system SOP-2 przez płynną regulację opóźnienia hamowania wymaga, aby w odbiorniku pojazdowym SOP-2 prócz wyjść sterujących odłączaniem napędu i załączaniem hamowania służbowego była możliwość sterowania pętlą prądową poprowadzoną od systemu SOP-2 do układu kodującego (encodera) w obwodach sterowania pociągiem.

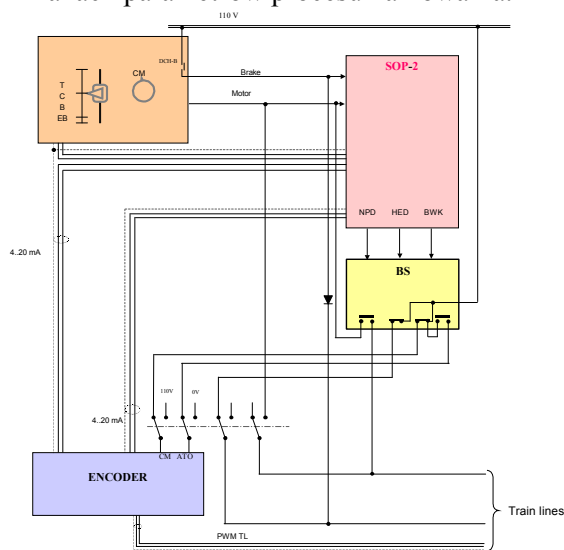
W przypadku, gdy pociąg jest prowadzony przez maszynistę źródłem sygnału w pętli prądowej od którego zależy wartość opóźnienia hamowania jest nastawnik jazdy. System SOP-2 określa zadaną przez maszynistę wartość opóźnienia hamowania. Jeżeli w trakcie hamowania docelowego maszynista przestawi nastawnik jazdy na pozycję hamowanie, system SOP-2 przekazuje do encodera większą wartość opóźnienia hamowania, wybraną z dwóch: narzuconej przez maszynistę i wypracowanej według własnego algorytmu.

Układ współpracy systemu SOP-2 z pociągiem Metropolis, w którym realizowana jest płynna regulacja opóźnienia hamowania w czasie hamowania docelowego przy peronie przedstawia rys.4.

Urządzenia pojazdowe SOP-2 wyposażone są w układ wyjściowy zasilający pętlę prądową, za pomocą której przesyłana jest zadana ośmiobitowa wartość prądu sterującego oraz dwa identyczne układy wejściowe pętli prądowej, które pozwalają na pomiar prądu sterującego. Jeden układ wykorzystywany jest do określenia wartości prądu sterującego przesyłanego z nastawnika jazdy do encodera, co pozwala na ocenę opóźnienia hamowania zadawanego przez maszynistę. Drugi układ służy do określenia wartości prądu sterującego zadawanego przez układ wyjściowy SOP do encodera. Dzięki

temu można wcześniej wdrożyć hamowanie awaryjne w przypadku uszkodzenia układu sterującego pętlą prądową.

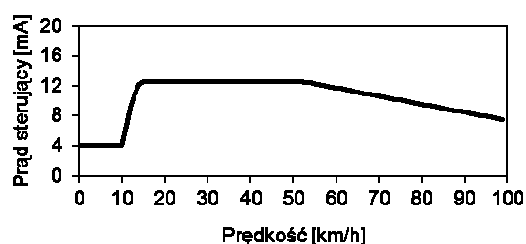
Podstawowym sposobem hamowania docelowego jest hamowanie elektrodynamiczne. Przy małych prędkościach, kiedy nieskuteczne jest hamowanie elektrodynamiczne, uruchamiane jest hamowanie pneumatyczne. Założono, że w trakcie hamowania elektrodynamicznego wykorzystywane będzie 75% maksymalnego momentu hamującego. Umożliwia to wystarczającą regulację siły hamowania w górę przy zmianach parametrów procesu hamowania.



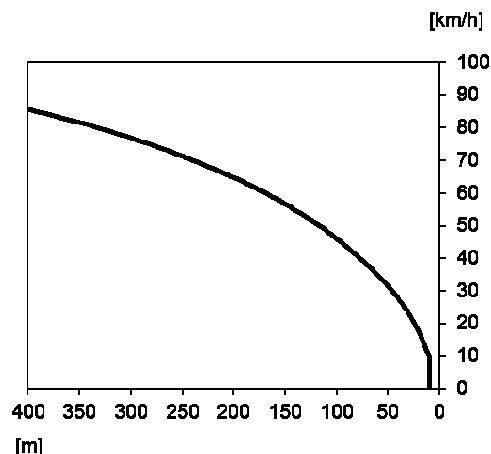
Rys. 4. Układ współpracy SOP-2 z pociągiem Metropolis

Podstawą działania przyjętego układu automatycznego hamowania jest przyjęta wzorcowa charakterystyka siły hamowania (rys.5), określająca w funkcji prędkości wymaganą wartość prądu sterującego zapewniającego właściwe wykorzystanie silników elektrycznych do hamowania pociągu oraz wyznaczona na jej podstawie wzorcowa krzywa hamowania (rys.6).

Wzorcową krzywą hamowania wyznaczono w oparciu o symulację komputerową, uwzględniającą masę pociągu i opory ruchu zmieniające się w funkcji prędkości. Określa ona zależność pomiędzy drogą przebywaną przez pociąg, a jego prędkością, w przypadku, gdy hamowanie odbywa się przy zastosowaniu wzorcowej charakterystyki hamowania, związanej wyłącznie z hamowaniem elektrodynamicznym, dla określonej masy pociągu i profilu toru na odcinku dojazdu do stacji. Do obliczeń przyjęto masę odpowiadającą średniemu obciążeniu pociągu i zerowy profil pionowy toru.



Rys. 5. Wzorcowa charakterystyka siły hamowania

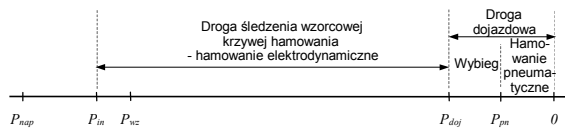


Rys. 6. Wzorcowa krzywa hamowania

Przed rozpoczęciem hamowania automatyczny układ samoczynnie podejmuje decyzję o wyłączeniu napędu. Podstawą tej decyzji jest stwierdzenie, że nastąpiło przekroczenie krzywej wyłączania napędu. Krzywa ta jest na bieżąco wyliczana w regulatorze siły hamowania na podstawie wzorcowej krzywej hamowania według zasady, że pomiędzy momentem wyłączenia napędu, a znalezieniem się na krzywej wzorcowej upływa określony czas zależny od prędkości pociągu. Czas ten dobrano na podstawie badań symulacyjnych skorygowanych wynikami badań w czasie jazdy pociągu. Zmienia się on od 2,1s dla małych prędkości do 0,6s dla prędkości 80 km/h. O włączeniu hamowania decyduje krzywa inicjacji hamowania, która wyprzedza wzorcową krzywą hamowania o 0,3s i podobnie jak krzywa wyłączania napędu jest na bieżąco wyliczana na podstawie wzorcowej krzywej hamowania.

Łączna droga hamowania została podzielona na drogę, w trakcie której odbywa się śledzenie wzorcowej krzywej hamowania z wykorzystaniem regulatora siły hamowania oraz drogę dojazdową (rys.7). W czasie śledzenia krzywej wzorcowej stosowane jest wyłącznie hamowanie elektrodynamiczne, zaś na drodze

dojazdowej ma miejsce najpierw swobodny wybieg, zaś potem uruchamiane są pneumatyczne hamulce postojowe.



Rys. 7. Rozmieszczenie punktów charakteryzujących przebieg hamowania docelowego

Na rysunku 7 oznaczono:

- $P_{nap}$  - punkt wyłączenia napędu,
- $P_{in}$  - punkt inicjacji regulatora siły,
- $P_{wz}$  - punkt rozpoczęcia śledzenia wzorcowej krzywej hamowania,
- $P_{doj}$  - punkt zakończenia śledzenia wzorcowej krzywej hamowania (wyłączenie regulatora siły hamowania),
- $P_{pn}$  - punkt włączenia pneumatycznych hamulców postojowych.

W pociągu jadącym z określoną prędkością, w momencie najeżdżania nad pętlę inicjującą proces hamowania docelowego (pętla nr 3 na rys.1), rozpoczyna się pomiar drogi (odległości do celu) i prędkości. Porównywana jest obliczona odległość do punktu zatrzymania z drogą odczytaną z krzywej wyłączania napędu dla prędkości rzeczywistej pociągu. W chwili zrównania się tych wartości, w punkcie  $P_{nap}$  podejmowana jest decyzja o wyłączeniu napędu. Podobnie na podstawie porównania rzeczywistej drogi z drogą odczytaną z krzywej inicjacji hamowania dla rzeczywistej prędkości pociągu, w punkcie  $P_{in}$  podejmowana jest decyzja o uruchomieniu procedury regulacji siły hamowania. Prąd sterujący przyjmuje natychmiast wartość odpowiadającą aktualnej prędkości zgodnie z wzorcową charakterystyką siły hamowania. Jednocześnie uruchamiany jest regulator siły hamowania. Podstawą działania tego regulatora jest różnica pomiędzy aktualną drogą, a drogą odczytaną ze wzorcowej krzywej hamowania dla danej prędkości pociągu. Rzeczywista odległość pociągu pozostająca do punktu  $P_{doj}$  zrównuje się wartością drogi wzorcowej odczytywaną ze wzorcowej krzywej hamowania dopiero w punkcie  $P_{wz}$ . Zadaniem regulatora jest ciągle dokonywanie takiej korekty prądu sterującego, by hamowanie odbywało się zgodnie ze wzorcową krzywą hamowania.

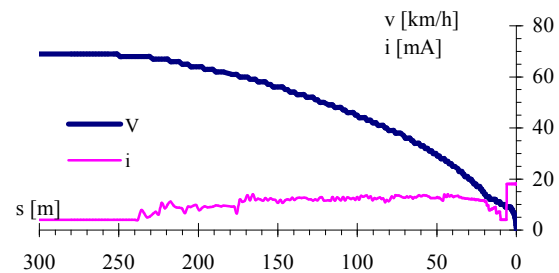
Opisywany układ automatycznego hamowania docelowego w tej fazie jest układem śledzenia zadanej trajektorii ruchu pociągu. Jego celem

jest zapewnienie, by pociąg osiągnął wartość prędkości zbliżoną do 10 km/h w ściśle określonej odległości od punktu docelowego – zwanej odległością dojazdową, niezależnie od tego z jaką początkową prędkością się poruszał i w jakiej odległości od celu rozpoczął hamowanie. Prędkość ta jest tzw. prędkością dojazdową i kończy fazę hamowania elektrodynamicznego, co następuje w punkcie  $P_{doj}$ .

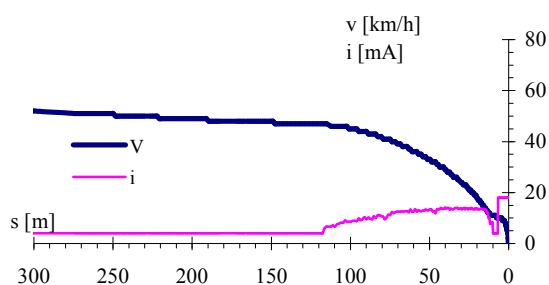
Prędkość dojazdowa pociągu w chwili osiągnięcia odległości dojazdowej może się zmieniać ze względu na zmiany parametrów wpływających na ruch rzeczywistego pociągu w trakcie hamowania (głównie masa ładunku i profil pionowy toru), pomimo stosowania zawsze tej samej wzorcowej krzywej hamowania. Po wyłączeniu regulatora siły hamowania następuje swobodny wybieg pociągu.

Precyzyjne zatrzymanie pociągu w punkcie docelowym jest następnie realizowane przez sterowanie według charakterystyki załączania hamowania pneumatycznego. Charakterystykę przyjęto na podstawie wyników badań symulacyjnych i terenowych. Miejsce, w którym włączane są hamulce pneumatyczne (punkt  $P_{pn}$ ) wynika ze zrównania się aktualnej odległości od punktu docelowego z drogą hamowania pneumatycznego odczytywaną z tej charakterystyki dla danej prędkości pociągu jadącego wybiegiem. Wartość prądu sterującego w ostatniej fazie hamowania, gdy uruchamiane są hamulce pneumatyczne, jest stała. Chwila jego włączenia następuje w punkcie  $P_{pn}$ . Odległość tego punktu od punktu zatrzymania docelowego jest zatem dobierana samoczynnie przez układ hamowania docelowego.

Hamowanie docelowe pociągów Metropolis z płynną regulacją opóźnienia hamowania przebiega poprawnie zarówno jeśli chodzi o precyzję zatrzymania pociągu, jak i jego przebieg. Przykładowe wykresy przebiegów prędkości pociągu i prądu sterującego w funkcji drogi w trakcie hamowania przedstawiają rys. 8 i 9.



Rys. 8. Przebieg hamowania docelowego pociągu na stacji A8, tor nr 1



Rys. 9. Przebieg hamowania docelowego pociągu na stacji A5, tor nr 2

## 5. Podsumowanie

Pociągi rosyjskie typu 81 oraz pociągi Metropolis firmy ALSTOM z wdrożonym hamowaniem docelowym są eksploatowane na I linii metra w Warszawie. Obecnie prowadzone są prace nad zainstalowaniem urządzeń systemu SOP w pociągu typu INSPIRO firmy SIEMENS. Pociągi te będą stopniowo zastępować pociągi rosyjskie typu 81 w obsłudze I linii metra warszawskiego.

## 6. Literatura

- [1]. Barański S.: System SOP-2 dla metra warszawskiego, Materiały II Międzynarodowej Konferencji Naukowej. Współczesne systemy zasilania i napędu pojazdów trakcyjnych, Warszawa 1995.
- [2]. Barański S., Kubik S.: Automatyczne zatrzymywanie pociągów na przystankach w metrze warszawskim, Materiały VII Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'96.
- [3]. Barański S., Bergiel K., Dębowski A., Kubik S.: Hamowanie docelowe pociągów w metrze warszawskim, Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI wieku.
- [4]. Barański S., Dębowski A., Kolasa T.: Algorytm hamowania docelowego pociągów Metropolis w metrze warszawskim, Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI wieku.

## Autorzy

dr inż. Sławomir Barański  
Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki PŁ,  
dr inż. Piotr Błaszczak  
Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki PŁ