

Sławomir Barański, Piotr Błaszczyk
Politechnika Łódzka, Łódź

STEROWANIE POCIĄGIEM METRA PRZEZ SYSTEM AUTOMATYCZNEGO PROWADZENIA POCIĄGU

METRO TRAIN CONTROL WITH ATC SYSTEM

Abstract: SOP-2 and SOP-2P are an automatic train protection systems (ATP) designed to assist the driver in driving the train in the safest way. It provides relevant signal information in the cab, continuous monitoring of the actions of the driver and the motion of the train. SOP systems are designed to be transparent to the driver, as long as the traffic regulations are followed. If the traffic situation is regarded dangerous, SOP systems will intervene and brake the train down to a safe speed, or stop the vehicle before an obstacle. In this paper the interfaces between SOP electronic central unit and train were described. Logic of the presented solutions for this interface, due to safety functions they perform, is mainly based on relays, however an indisputable advantage of this system is its advanced concept, allowing in future using a higher level of automation and establishing the preconditions for a possible co-operation with other systems and also the next generation of technology.

1. Wstęp

Prowadzenie pociągu przez maszynistę polega na odpowiednim oddziaływaniu na układ napędowo-hamulcowy w kolejnych fazach jazdy: rozruch, jazda z prędkością ustaloną, jazda z rozpędu, hamowanie tak, aby przejechać odcinek między stacjami w przewidywanym rozkładem jazdy czasie i zatrzymać pociąg w określonym miejscu. Prowadzenie pociągu wymaga od maszynisty znajomości rozkładu jazdy, trasy, parametrów toru i pociągu, obserwacji semaforów i wskaźników wzdłuż szlaku i na stacjach. Poprawne wykonanie zadań przez maszynistę zależy od jego spostrzegawczości, szybkości reakcji i prawidłowości realizowanych działań. Maszynista prowadząc pociąg musi przede wszystkim przestrzegać określonych zasad warunkujących bezpieczną jazdę. Powinien więc zwracać uwagę, aby prędkość pociągu nie przekraczała ciągle zmieniającej się prędkości dopuszczalnej - zależnej od sytuacji ruchowej i zmieniających się wzdłuż drogi parametrów toru. Przy tym wszystkim musi jednocześnie uwzględniać możliwości hamulcowo - napędowe pociągu.

Wynika z tego, że maszynista prowadząc pociąg między stacjami, wykonuje jednocześnie czynności obserwacyjne, kontrolne oraz regulacyjne.

Wprowadzenie systemów automatycznego prowadzenia pociągu ma na celu ułatwienie pracy maszynisty. W zależności od zakresu automatyzacji realizowanej przez system, w skrajnym przypadku, może on całkowicie zastąpić maszynistę we wszystkich czynnościach.

System automatycznego prowadzenia pociągu służy zapewnieniu bezpiecznej, zgodnej z rozkładem oraz energooszczędnej jazdy pociągu. Zadania systemu i jego podział wynikają z czynności, jakie wykonuje maszynista przeprowadzając pociąg od stacji do stacji.

System automatycznego prowadzenia pociągu, w nazewnictwie anglojęzycznym Automatic Train Control (ATC), tworzą dwa podsystemy: system zapewniający bezpieczną jazdę (Automatic Train Protection - ATP), oraz system automatycznej jazdy pociągu (Automatic Train Operation - ATO).

Opracowane we współpracy Politechniki Łódzkiej z firmą Bombardier Transportation ZWUS, systemy ATP typu SOP stosowane są na liniach metra w Warszawie i Pradze.

2. System SOP-2

System SOP-2 zastosowany na I linii metra w Warszawie to system ATP realizujący niektóre funkcje systemu ATC, np. hamowanie docelowe pociągu przy peronie. Zadaniem systemu SOP-2, w przypadku niewłaściwych działań maszynisty, jest wyłączenie napędu, włączenie hamowania służbowego i po odpowiednim spadku prędkości pociągu ewentualne wyłączenie hamowania. W ten sposób realizowane jest samoczynne zatrzymanie pociągu przed odstępem blokowym zajęty przez pociąg poprzedzający, przed semaforem wskazującym sygnał „stój” lub inną sygnalizowaną przeszkodą ruchową. Podobnie jest realizowane przez system ograniczenie prędkości jazdy, np.

na lukach i rozjazdach oraz przy przejeździe przez stację bez zatrzymania.

Koncepcja działania systemu SOP-2 opiera się, w pewnym uproszczeniu, na zasadzie: każdy odstęp blokowy (odcinek toru) ma przypisany określony stopień prędkości równoznaczny z wartością prędkości dopuszczalnej dla pociągu na danym odstepie. Prędkość pociągu wjeżdżającego i jadącego po danym odstepie blokowym, nie może przekroczyć wartości stopnia prędkości.

Na pierwszej linii metra w Warszawie w chwili obecnej są eksploatowane dwa typy pociągów:

- rosyjskie pociągi typu 81-572, wyposażone w silniki prądu stałego z tradycyjnym rozruchem i hamowaniem elektrodynamicznym oporowym, sterowanym wałem kułakowym za pośrednictwem nastawnika jazdy i hamowania;
- pociągi typu METROPOLIS firmy ALSTOM, wyposażone w silniki asynchroniczne zasilane przez układ falownikowy z płynną regulacją rozruchu i hamowania.

Sterowanie pneumatycznym hamowaniem awaryjnym pomimo różnic w budowie pociągów jest rozwiązane w ten sam sposób. Elektrozawór będący w czasie normalnej pracy cały czas pod napięciem, po utracie zasilania otwiera główny przewód hamulcowy, powodując pewne włączenie hamowania awaryjnego.

Do sterowania hamowaniem służbowym (podstawowy rodzaj hamowania), ze względu na różne rozwiązania układowe pociągów, zastosowano tzw. blok sprzęgający odmienny w każdym typie pociągu.

3. Pociąg typu 81-572

Hamowanie w wagonach typu 81-572 przebiega w trzech fazach. Pierwszą fazą jest hamowanie elektrodynamiczne oporowe z maksymalną wartością rezystora hamowania (wał kułakowy na pierwszej pozycji oraz płynną regulacją wzbudzenia od 48% do 100% przy pomocy kluczy tyrystorowych, które bocznikują uzwojenia magnesujące pracujących prądnicowo silników trakcyjnych. Dzięki tej regulacji utrzymywana jest stała wartość prądu płynącego przez tworniki maszyn. Przy czym wartość prądu jest uzależniona od stopnia obciążenia wagonów - od 240 A w wagonach próżnych do 360 A w wagonach całkowicie zapelnionych. Wartość tego prądu jest ustawiana i kontrolowana przez elektroniczny blok nastaw prądowych, sterujący pracą kluczy tyrystorowych.

Ta faza hamowania obejmuje zakres prędkości od 85 km/h do około 64 km/h w wagonach zapelnionych, a w wagonach próżnych do około 49 km/h. Po osiągnięciu pełnego wzbudzenia 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. Dlatego w trzeciej fazie hamowania zostaje zastąpione hamowaniem elektropneumatycznym, które na niespełna trzech ostatnich metrach zatrzymuje pociąg. Regulacja siły hamowania przez zmianę prądu może być zastosowana zarówno w pierwszej, jak i w drugiej fazie hamowania przy założonej wartości tej zmiany $\Delta I < 60$ A. Ograniczenie to jest spowodowane możliwością zadziałania ochrony nadmiarowoprądowej i zastąpienia hamowania elektrodynamicznego hamowaniem pneumatycznym pełnym, nie podlegającym regulacji.

Po badaniach stwierdzono, że najwłaściwszym sposobem regulacji siły hamowania jest bezpośrednie oddziaływanie przez system na obwody sterowania wałami kułakowymi (każdy wagon ma indywidualny system sterowania). 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, uzyskano założony przebieg hamowania przy jednoczesnym uniknięciu zbyt gwałtownych zmian opóźnienia ruchu pociągu.

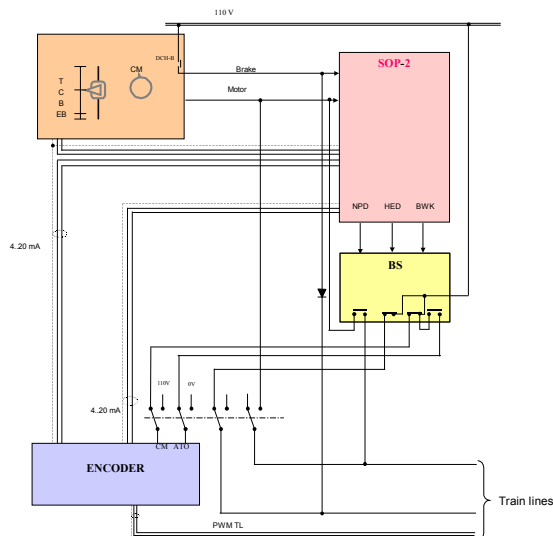
4. Pociąg METROPOLIS

Sterowanie napędem i hamowaniem pociągów 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 m/s^2 do

1,3 m/s². Realizacja przez płynną regulację opóźnienia hamowania wymaga, aby w odbiorniku pojazdowym SOP-2 prócz wyjść sterujących odłączaniem napędu i załączeniem hamowania służbowego była możliwość sterowania pętlą prądową poprowadzoną od układu SOP-2P do układu kodującego (encodera) w obwodach sterowania pociągiem.

W przypadku prowadzenia pociągu przez maszynistę źródłem sygnału, od którego zależy wartość opóźnienia hamowania jest nastawnik jazdy. W zastosowanym rozwiązaniu przyjęto, że system SOP-2 określa zadaną przez maszynistę wartość opóźnienia hamowania. Jeżeli w trakcie hamowania przez system maszynista również przestawi nastawnik jazdy na pozycję hamowania, to do encodera jest przekazywana większa z wartości zadanego opóźnienia hamowania.

Układ współpracy systemu SOP-2 z pociągiem Metropolis, w którym realizowana jest płynna regulacja opóźnienia hamowania w czasie hamowania docelowego przy peronie przedstawia rys.1.



Rys. 1. Układ współpracy SOP-2 z pociągiem Metropolis

System SOP-2 zawiera układ wyjściowy pętli prądowej, przy pomocy którego zadaje ośmio-bitową (praktycznie płynnie zmieniającą się) wartość prądu sterującego. Zawiera także dwa identyczne układy wejściowe, które pozwalają na pomiar prądu w pętli prądowej. Jeden układ jest wykorzystywany do określenia wartości prądu sterującego przesyłanego z nastawnika jazdy do encodera, co pozwala na ocenę opóźnienia hamowania zadanego przez maszyni-

stę. Drugi układ służy do określenia wartości prądu sterującego zadanego przez układ wyjściowy SOP-2 do encodera. Dzięki temu można wcześniej wdrożyć hamowanie awaryjne w przypadku uszkodzenia układu wyjściowego. W systemie założono, że w trakcie hamowania elektrodynamicznego średnia wartość momentu hamującego będzie na poziomie 75% wartości maksymalnej. Pozwala to na zwiększanie, jak i zmniejszanie opóźnienia hamowania.

Podstawą działania układu automatycznego hamowania jest przyjęta wzorcowa charakterystyka siły hamowania określająca w funkcji prędkości wymaganą wartość prądu sterującego. Wzorcową krzywą hamowania wyznaczono w oparciu o symulacje komputerowe. 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,

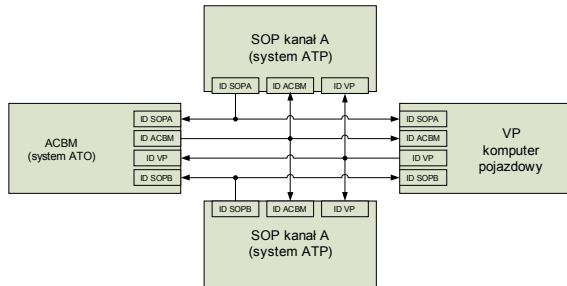
5. System SOP-2P

System SOP-2P, pracujący na linii A metra w Pradze, jest zmodernizowaną, rozwiniętą i dostosowaną do wymogów użytkownika wersją systemu SOP-2, Część ATO systemu opracowana i wykonana została przez czeską firmę AŽD. Rozwiązania techniczne urządzeń tego systemu są oparte na systemie AVVCD wyprodukowanym przez AŽD i wdrażanym na Kolejach Czeskich.

Na linii A metra w Pradze system został zainstalowany w pociągach 8171M. Pociąg ten jest zmodernizowaną wersją rosyjskiego pociągu typu 8171 (jedną z jego wersji są pociągi 81-572 eksploatowane w Warszawie). W przeciwieństwie do pociągu rosyjskiego, który miał sterowanie przekaźnikowe, w pociągu 8171M sterowanie jest w pełni elektroniczne. W technice przekaźnikowej zostały zrealizowane tylko elementy mające bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, czyli sterowanie włączaniem hamowania awaryjnego oraz kontrola otwarcia drzwi pociągu.

Podstawowe oddziaływanie systemu SOP-2P na pociąg odbywa się poprzez komunikację z komputerem pojazdowym pociągu. Do komunikacji systemów ATP, ATO i komputera pojazdowego (VP) wykorzystana jest magistrala CAN. Struktura połączeń pomiędzy poszczególnymi systemami przedstawiona jest na rys. 2. Tą właśnie drogą system SOP-2 steruje

wyłączaniem napędu, włączaniem hamowania służbowego i postojowego. Dopiero w przypadku, gdy zostanie stwierdzone nie wykonanie rozkazu, system wykorzystuje sterowanie awaryjne.



Rys. 2. Struktura połączeń logicznych na magistrali CAN

Zasady sterowania i wypracowywania informacji w systemie SOP-2P są podobne do opisanych już w systemie SOP-2. Inna jest natomiast zastosowana technologia oraz komunikacja pomiędzy systemem, a pojazdem.

System SOP-2P wysyła do ACBM3 i VP między innymi następujące informacje:

- stan HW/SW urządzeń SOP-2P
- reżim pracy urządzeń pojazdowych,
- zezwolenie na włączenie napędu,
- rozkaz włączenia hamowania służbowego,
- rozkaz włączenia hamowania parkującego,
- rozkaz włączenia hamowania awaryjnego (jest to tylko informacja o włączeniu hamowania awaryjnego, jest ono włączane poprzez przekaźniki bloku sprzęgającego),
- stan realizacji funkcji bezobsługowego obrotu.

Z systemu ACBM (ATO) pochodzą dane:

- stan HW/SW urządzeń ACBM
- reżim pracy systemu ACBM,
- rozkaz włączenia / wyłączenia napędu,
- wielkość siły hamowania / trakcji,
- kierunek jazdy.

Dane z komputera pojazdowego VP:

- stan HW/SW urządzeń VP
- stan (aktywacja) danego czoła pociągu
- stan przełącznika reżimów pracy,
- stan (położenie) nastawnika maszynisty,
- stan przełącznika kierunku jazdy,
- status układu napędowo-hamulcowego.

Na podstawie tych danych poszczególne systemy mają pełną informację o stanie pociągu i jego sterowaniu. Dane te są przekazywane pomiędzy systemami co 40 ms. Przy braku no-

wych informacji przez 200 ms, system SOP-2P stwierdza awarię danego systemu i wprowadza korekty algorytmu pracy odpowiednie do danej sytuacji.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono różne rozwiązania sterowaniem pociągu metra przez system ATP/ATC na przykładzie systemów typu SOP. Opisane zostały trzy rozwiązania:

- przekaźnikowe – stosowane w rosyjskich pociągach typu 81-572 w metrze warszawskim,
- sterowanie elektroniczne oparte o analogową linię prądową – pociągi typu METROPOLIS firmy ALSTOM eksploatowane w metrze warszawskim,
- sterowanie elektroniczne oparte o cyfrową transmisję informacji magistralą CAN – pociągi typu 8171M firmy SKODA eksploatowane na linii A metra w Pradze.

7. Literatura

- [1]. Barański S.: Współpraca systemu ATP z pociągiem na linii A metra w Pradze, Pojazdy Szynowe nr 2/2005.
- [2]. Barański S., Kubik S.: Systemy ATP typu SOP dla metra, Konferencja MET'2003, Warszawa 2003 r.
- [3]. Barański S., Bergiel K., Dębowski A., Kubik S.: Hamowanie docelowe pociągów w metrze warszawskim, Konferencja MET'2003, Warszawa 2003 r.

Autorzy

dr inż. Sławomir Barański,
 dr inż. Piotr Błaszczyk,
 Zakład Transportu i Przetwarzania Energii
 Instytut Elektroenergetyki PŁ
 email: slawomir.baranski@p.lodz.pl
 piotr.blaszczyk@p.lodz.pl