

Leszek Konopiński¹, Wiesław Zabłocki²
Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Wybrane zagadnienia sterowania ruchem pociągów metra (na przykładzie systemu SOP)

1. WPROWADZENIE

Technika sterowania ruchem kolejowym, jak i ruchem pociągów metra charakteryzuje się podobnymi wymaganiami z uwagi na bezpieczeństwo ruchu i poziom automatyzacji. Stosowane systemy sterowania ruchem kolejowym i systemy sterowania pociągami metra mają wspólną cechę inteligentnych systemów sterowania ruchem kolejowym. Jednakże ze względu na ograniczoną liczbę zadań ruchowych metra, pewną jednorodność tych zadań i infrastruktury oraz niekiedy na konieczność osiągnięcia podstawowego wymagania jakim jest maksymalizacja przepustowości, w odróżnieniu do zadań kolejowego procesu przewozowego, systemy automatyki sterowania i zabezpieczenia ruchu pociągów metra wykazują szereg istotnych różnic obejmujących np. system sygnalizacji, automatyzację rozruchu i hamowania i inne. Analizując aktualnie stosowane nowoczesne systemy sterowania należące do systemów automatycznej kontroli jazdy pociągów w transporcie kolejowym, a objętych skrótem BKJP³ (Bezpieczna Kontrola Jazdy Pociągu), także w odniesieniu do metra można wskazać bezpieczne systemy BKJP. Przyjmuje się, że do systemów tych należą: ATC – Automatic Train Control, ATP - Automatic Train Protection oraz ATO - Automatic Train Operation. Zastosowanie tych systemów w metrze⁴ umożliwia pełną funkcjonalność procesów ruchowych metra z zachowaniem bezpieczeństwa ruchu. Powyższe systemy różnią się zakresem funkcjonalności, a zatem i rozwiązaniami technicznymi. Docelowym założeniem systemów ATO jest m. in. automatyzacja sterowania pociągiem bez udziału maszynisty. Szczegóły rozwiązań technicznych zależą od przyjętych lub realizowanych założeń techniczno – ruchowych zarządów eksploatujących poszczególne linie metra. W publikacji zostaną przedstawione zagadnienia dotyczące koncepcji sterowania ruchem pociągów metra oraz certyfikacji systemu ATP w odniesieniu do systemu ograniczenia prędkości (SOP).

2. IDENTYFIKACJA I SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Podstawowym, ale i początkowym rozwiązaniem stosowanym w sterowaniu ruchem pociągów metra jest dwustawna⁵ samoczynna blokada liniowa wyposażona w dwukomorowe sygnalizatory świetlne umożliwiające wyświetlanie dwóch sygnałów zielonego lub czerwonego, które przekazują maszyniście odpowiednio informację - "wolna droga" lub "stój!". Zasada funkcjonowania dwustawnej blokady liniowej jest przedstawiona na rys. 1.

Zastosowanie dwustawnej samoczynnej blokady liniowej jest uzasadnione specyfiką metra charakteryzującą się m. in. wymaganiami dotyczącymi przepustowości, która ma decydujący wpływ⁶ na wartości przyjętych czasów następstw pociągów, ich prędkości, przyspieszeń (krzywe przyspieszania), opóźnień (krzywe hamowania) – istnieją maksymalne graniczne wartości przyspieszeń i opóźnień z uwagi

¹ zsrk@it.pw.edu.pl

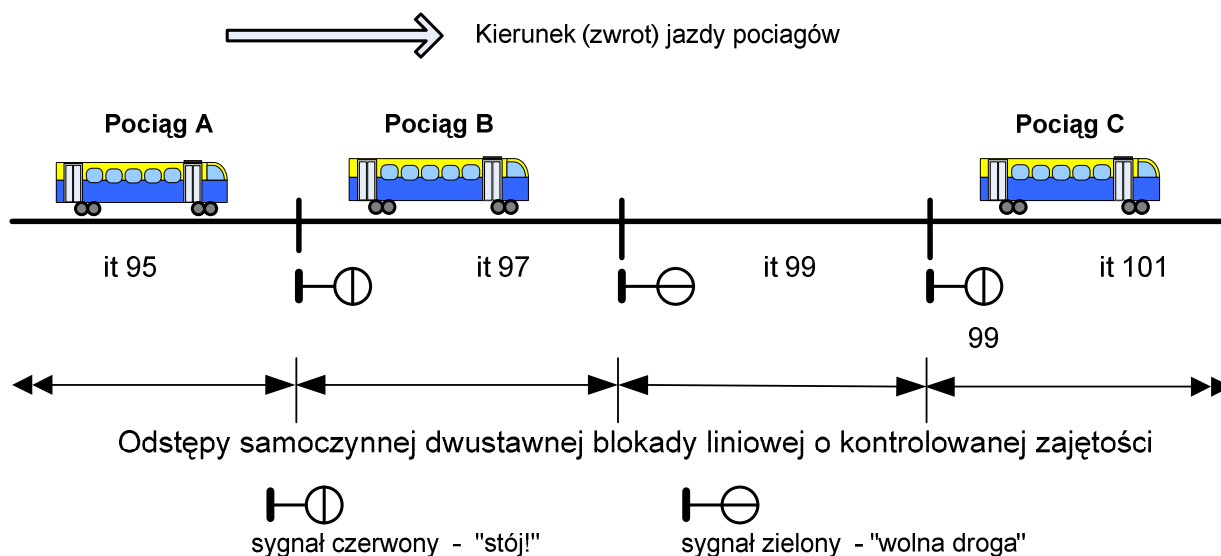
² zab@it.pw.edu.pl

³ Skrót występuje m. in. w tłumaczeniu Decyzji Komisji Europejskiej z dnia 22 lipca 2009 r. (2009/561/WE).

⁴ W transporcie kolejowym, zależnie od realizowanych funkcji i zadań sterowania, można wyróżnić jeszcze inne systemy lub podsystemy.

⁵ Jeśli stawność blokady jest określona liczbą $s=2$ lub większą, oznacza to, semafor(y) blokady umożliwiają przekazanie informacji o zajętości $s-1$ odcinków blokowych, w przypadku blokady dwustawnej dotyczy to 1 odcinka blokowego.

⁶ Istotne są także inne uwarunkowania takie jak np. długość peronów, długości składów, sposób zmiany kierunku ruchu na stacjach postojowych, czas i sposób wymiany podróżnych na peronie i szereg innych.

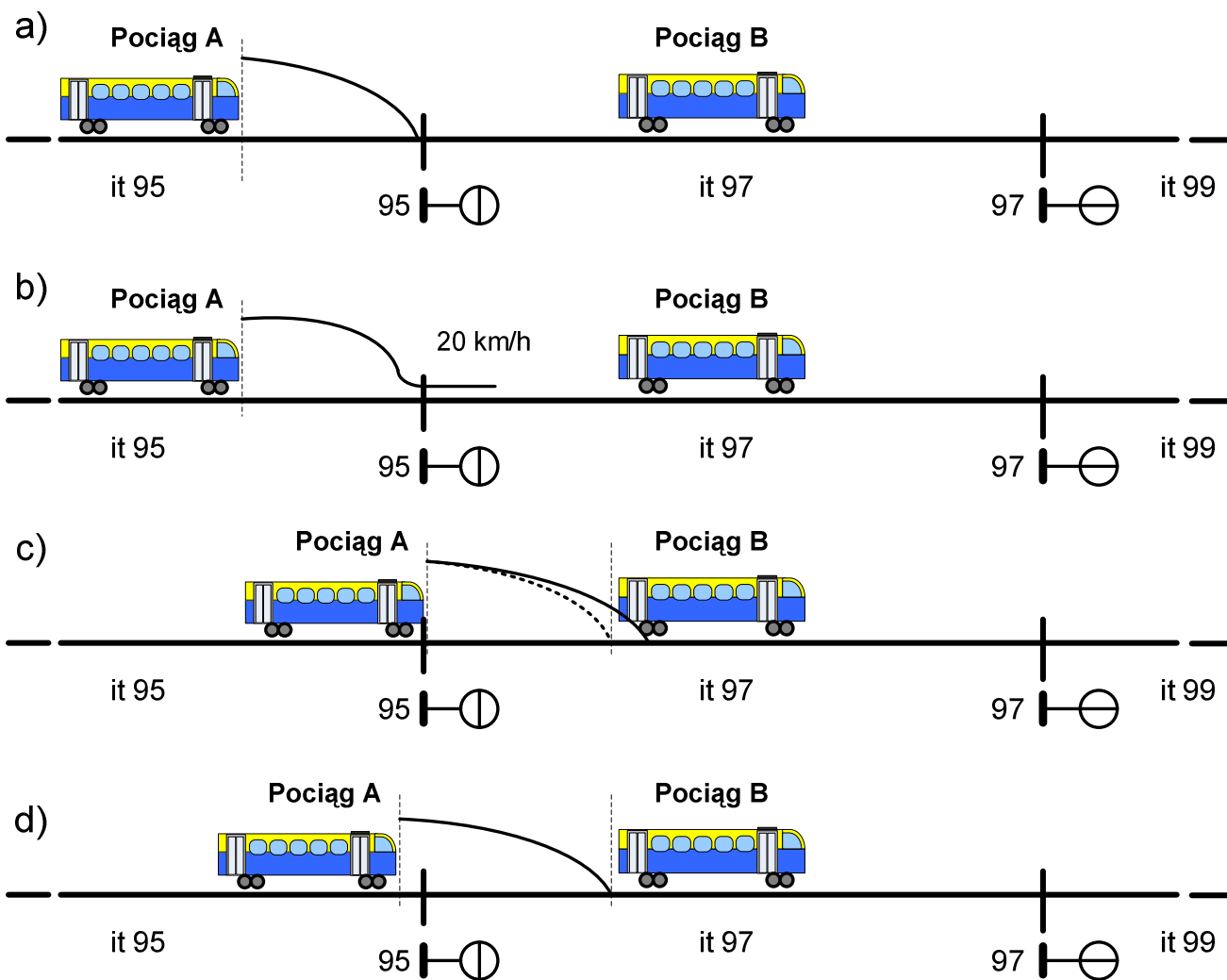


Rys. 1. Zasada funkcjonowania dwustawnej blokady liniowej

na bezpieczeństwo pasażerów. Na rys. 2. przedstawiono możliwe przypadki a), b), c) i d) sterowania ruchem pociągów metra z zastosowaniem blokady dwustawnej. W przypadku a) bezpieczeństwo ruchu zależy wyłącznie od maszynisty, który prowadzi pociąg A wyłącznie na podstawie wskazań sygnalizatorów i bez kontroli prędkości z bezwzględnym zatrzymaniem czoła pociągu przed sygnałem „stój!”, ponieważ odcinek blokowy it97 zajmuje przemieszczający się pociąg B. Przypadek a) należy traktować jako przypadek „zerowy” w celu wykazania, że dwustawna samoczynna blokada liniowa nie spełnia warunków bezpieczeństwa a ze względu na ograniczony zakres automatyzacji nie spełnia także wymagań techniczno – ruchowych metra. W przypadku b), podobnie jak w przypadku a) maszynista reaguje na sygnał „stój!”, ale może minąć semafor ze zmniejszoną prędkością i prowadzi pociąg na tzw. widoczność. W przypadku c) zastosowano funkcję automatyzacji hamowania, gdyby maszynista pociągu A nie reagował na sygnał „stój!” semafora 95. Przy tym poziomie automatyzacji krzywa hamowania może nie spełniać warunku bezpiecznej drogi hamowania. W przypadku d) system automatyzacji inicjuje hamowanie, które spełnia warunek bezpiecznej drogi hamowania, ponieważ krzywa hamowania pociągu A uwzględnia prędkość i zmienne trakcyjne oraz wyznaczoną na bieżąco odległość między pociągami A i B. Jest to najwyższy poziom automatyzacji umożliwiający prowadzenie pociągu na tzw. widoczność elektroniczną [5]. Ten system automatyzacji wyposażony w interfejs maszynisty wspomaga pracę maszynisty wskazując możliwą dopuszczalną, ale i bezpieczną prędkość z jaką maszynista może prowadzić pociąg metra na określonej części odstępu blokowego. W systemie tym możliwe jest także bezobsługowe sterowanie jazdą pociągu z uwzględnieniem rozruchu silników trakcyjnych oraz rezygnacja z semaforów odstępowych.

Przedstawiona powyżej analiza możliwych poziomów automatyzacji sterowania metrem pozwala stwierdzić, że najwyższy poziom automatyzacji i bezpieczeństwa można osiągnąć wprowadzając funkcje: kontroli prędkości pociągów metra, wyznaczania położenia (lokalizacji) pociągów i odległości między nimi. Dobór i zaprojektowanie systemu sterowania pociągami metra stanowi sformułowanie problemu: jak rozwiązać system sterowania pociągami metra zastępując lub uzupełniając nieefektywną samoczynną dwustawną blokadę liniową, systemem sterowania o wyższym, w porównaniu z właściwościami blokady, poziomie automatyzacji i bezpieczeństwa, a przy tym uzasadnionym ekonomicznie. Problem dotyczy nie tylko zaprojektowania i wdrożenia systemu, ale także jego certyfikacji, a w konsekwencji uzyskania tzw. bezterminowego świadectwa dopuszczenia do eksploatacji urządzenia przeznaczonego do prowadzenia ruchu. Ponadto projekt systemu powinien uwzględniać pewien zapas rozszerzający możliwości techniczno-ruchowe systemu w przyszłości. Istnieje także szereg rozwiązań pośrednich uwzględniających m. in. kontrolę czuwania maszynisty i jego reakcji na wskazania semaforów. Aktualne systemy automatyzacji ruchu pociągów metra realizowane są w oparciu o technologie informatyczne i bezpieczne struktury

komputerowe. Jednym z takich systemów spełniających zarysowane wcześniej wymagania jest system SOP⁷ spełniający funkcje systemu ATP [2, 3]. Podstawową funkcją systemu SOP jest automatyczne zmniejszenie prędkości do wartości zapewniającej bezpieczną jazdę, w przypadku gdyby maszynista nie reagował na ograniczenia prędkości. Bezpieczna krzywa hamowania w SOP powstaje jako rezultat schodkowego (stopniowego) zmniejszania prędkości pociągu w funkcji drogi, tzn. na kolejnych odstępach blokowych. Informacja o dopuszczalnej prędkości pociągu na odcinku blokowym jest wyświetlana w kabinie maszynisty na panelu SOP. W następnym rozdziale zostanie przedstawiona charakterystyka techniczna systemu SOP-2.



Rys. 2. Sposoby sterowania ruchem pociągów metra: a) zajęty odcinek blokowy it97 osłonięty sygnałem „stój!”, pociąg zatrzymuje się przed semaforem 95 według krzywej hamowania uzyskanej przez poprawnie reagującego maszynistę, b) sytuacja jak w a) – maszynista reaguje na sygnał „stój!”, ale pociąg wjeżdża na zajęty odcinek z prędkością ograniczoną, c) maszynista nie reaguje na sygnał „stój!”, zostaje automatycznie wdrożone nagłe hamowanie, d) system sterowania pociągu A, zależnie od lokalizacji pociągu B wyznacza (oblicza) bezpieczną odległość hamowania i inicjuje wdrożenie bezpiecznej krzywej hamowania.

3. SYSTEM SOP-2

System SOP-2 jest stosowany obecnie na I linii Metra Warszawskiego jako system pomocniczy w prowadzeniu pociągu przez maszynistę. Zasadniczym zadaniem systemu jest techniczne wspomaganie maszynisty przy ograniczaniu prędkości pociągu do wartości dopuszczalnej w danej sytuacji ruchowej.

⁷ System SOP w wersji SOP-2 został opracowany w Polsce przez Politechnikę Łódzką i firmę Bombardier Transportation ZWUS w Katowicach. Powstała także wersja systemu SOP-2P wdrożona na linii metra w Pradze (Czechy) [6].

Maszynista prowadzi pociąg na podstawie obserwacji sygnalizacji świetlnej w tunelu oraz informacji wyświetlanych na panelu systemu SOP-2. Prędkość pociągu jest regulowana przez maszynistę w taki sposób, aby nie została przekroczona aktualna dopuszczalna prędkość wskazywana na wyświetlaczu pulpitu. System SOP-2 nadzoruje chwilową dozwoloną prędkość pojazdu metra i w razie jej przekroczenia automatycznie oddziałuje na układ napędowo-hamujący pociągu, włączając automatyczne ograniczenie jego prędkości lub bezpieczne zatrzymanie przed poprzedzającym pociągiem lub inną przeszkodą. System SOP-2 realizuje następujące funkcje takie jak:

- A. kodowanie informacji o prędkości dozwolonej wyznaczonej na podstawie bieżącej sytuacji ruchowej stanu urządzeń oraz stałych ograniczeń prędkości (sygnały o zajętości odcinków, położeniu zwrotnic, stanie sygnalizatorów, ograniczenia na łukach itp.),
- B. przesyłanie w sposób ciągły zakodowanej informacji do pojazdów,
- C. odbiór informacji na pojeździe, ich poprawne zdekodowanie, zasygnalizowanie oraz interpretacja,
- D. prowadzenie ciągłego nadzoru prędkości dopuszczalnej i reakcja w przypadku jej przekroczenia - odłączenie napędu, wdrożenie hamowania,
- E. automatyczna jazda pociągu (funkcja ajp) – docelowo.

W systemie SOP-2 wyróżnia się dwie strukturalne części:

- urządzenia stacjonarne zawierające nadajnik zlokalizowany w nastawni na każdej stacji metra i odpowiedzialny za realizację funkcji kodowania (funkcja A) i przesyłania informacji do pociągów (funkcja B) przy pomocy pętli kablowych (obwodów przewodowych) ułożonych w torze pomiędzy tokami szyn,
- urządzenia pokładowe wyposażone w odbiornik zabudowany na każdym z wagonów czołowych taboru metra tj. każdy pociąg posiada dwa komplety urządzeń odbiorczych odpowiedzialnych za realizację funkcji odbioru, dekodowania oraz nadzoru prędkości pociągu (funkcje C, D i E).

Część stacjonarna komunikuje się z częścią pojazdową systemu za pomocą transmisji tor-pojazd, w której zastosowano pętle transmisyjne tworzące obwody przewodowe i stanowiące anteny nadawcze. Parametry transmisji są następujące:

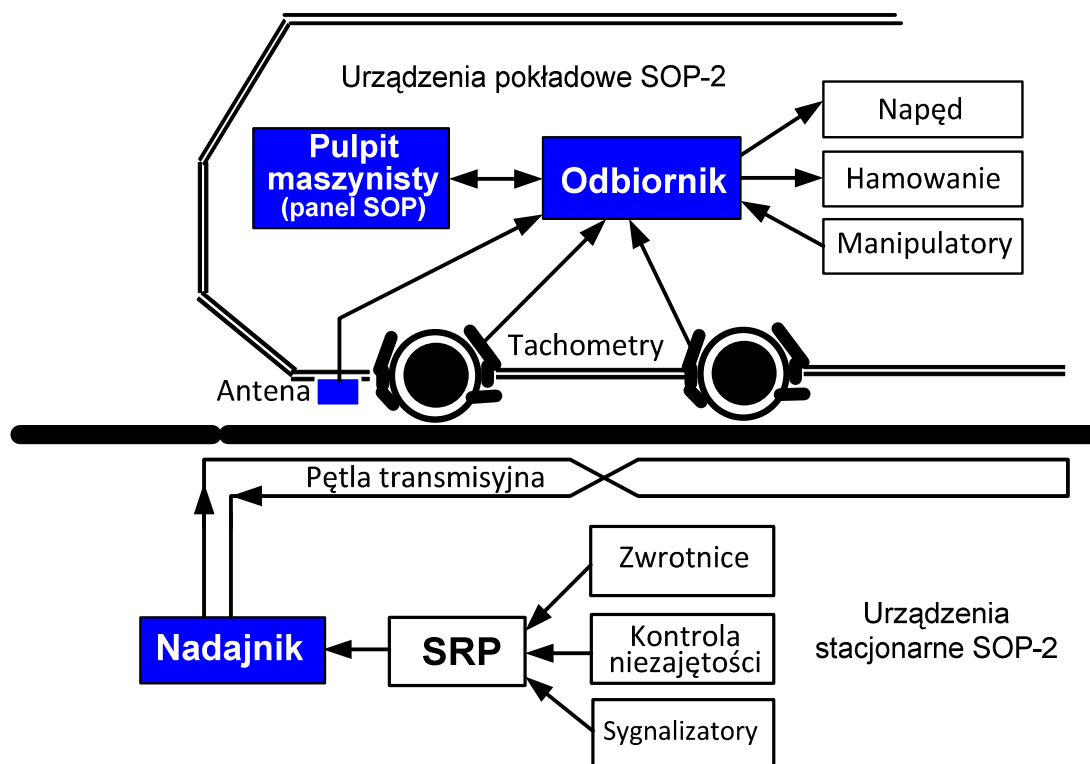
- częstotliwość nośna 36,6 kHz,
- sygnał FSK⁸ z dewiacją $\pm 0,6$ kHz,
- szybkość modulacji 1200 bodów.

Urządzenia stacjonarne systemu SOP powiązane są urządzeniami sterowania ruchem pociągów - srp (rys. 1.), które dla każdej pętli transmisyjnej w sposób bezpieczny realizują zależności tzn. wybierają odpowiedni stopień prędkości dozwolonej na podstawie przypisanej mu kombinacji sygnałów wejściowych takich jak zajętość odcinków torowych, stan sygnalizatorów i zwrotnic. W oparciu o stany tych sygnałów, nadajniki pętli systemu SOP-2 formują telegramy z m. in. zakodowaną informacją o dozwolonej prędkości i wysyłają je cyklicznie do przyporządkowanej nadajnikowi pętli. Stopień prędkości jest zależny od własności hamujących pociągów obsługujących linię, długości i pochylenia wolnej drogi przed końcem danej pętli oraz od stałych ograniczeń prędkości. Pętla przewodowa stanowiąca antenę nadawczą jest ułożona wzdłuż torów i symetrycznie względem osi toru, między tokami szyn na poziomie stopek szyn, długość pętli jest zwykle równa długości obwodu torowego.

Urządzenia pokładowe (rys. 3.) zabudowane w pociągu wyposażone są w odbiornik i interfejsy za pośrednictwem których realizowane są funkcje sterowania napędem i systemem hamowania oraz wprowadzania dodatkowych informacji do odbiornika. Telegramy generowane przez nadajnik urządzeń stacjonarnych i zasilające pętle transmisyjne odbierane są przez anteny zainstalowane na pociągu. Dekodowanie telegramów odbywa się w odbiorniku, dzięki czemu w pociągu odtworzone zostają wiadomości i rozkazy wysłane przez urządzenia stacjonarne systemu SOP-2. Dane o prędkości dozwolonej porównywane są w sposób ciągły z prędkością rzeczywistą pociągu wyznaczaną na podstawie impulsów z tachometrów. W wyniku porównania tych wielkości wytworzone zostają właściwe stany napięciowe na wyjściach sterujących, które przez dopasowany do danego typu pociągu interfejs, wywołują sterowania

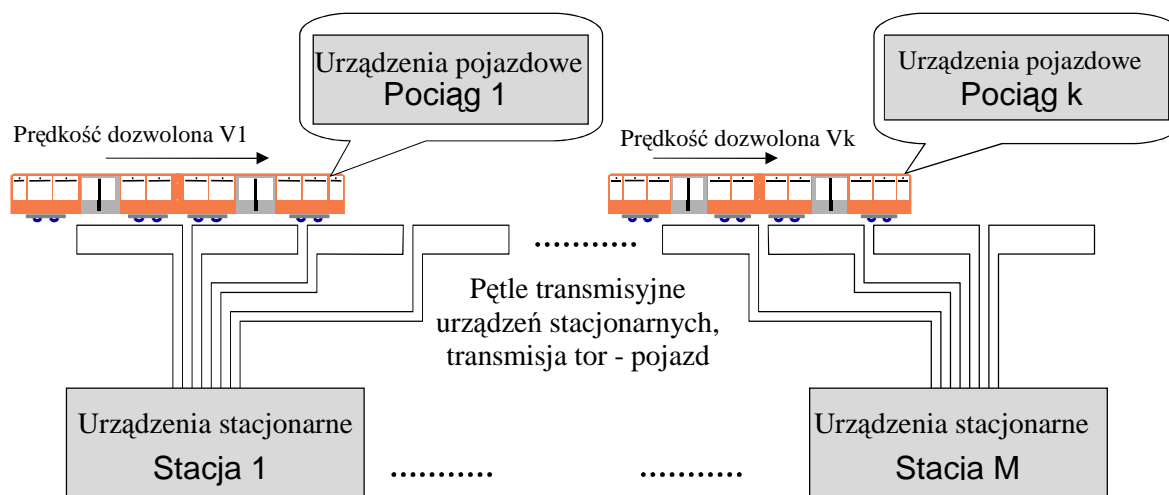
⁸ FSK - *Frequency Shift Keying*, sposób modulacji częstotliwości dla sygnałów cyfrowych.

w obwodach napędowo-hamujących pociągu, w celu obniżenia prędkości pociągu poniżej wartości prędkości dozwolonej.



Rys. 3. Urządzenia pokładowe i stacyjne systemu SOP-2.

Poglądowe rozmieszczenie urządzeń stacyjnych systemu SOP-2 na linii metra, począwszy od stacji 1 aż do stacji M, wraz z urządzeniami pokładowymi zainstalowanymi w pociągach metra ilustruje rys. 4.



Rys. 4. System SOP-2 na linii metra.

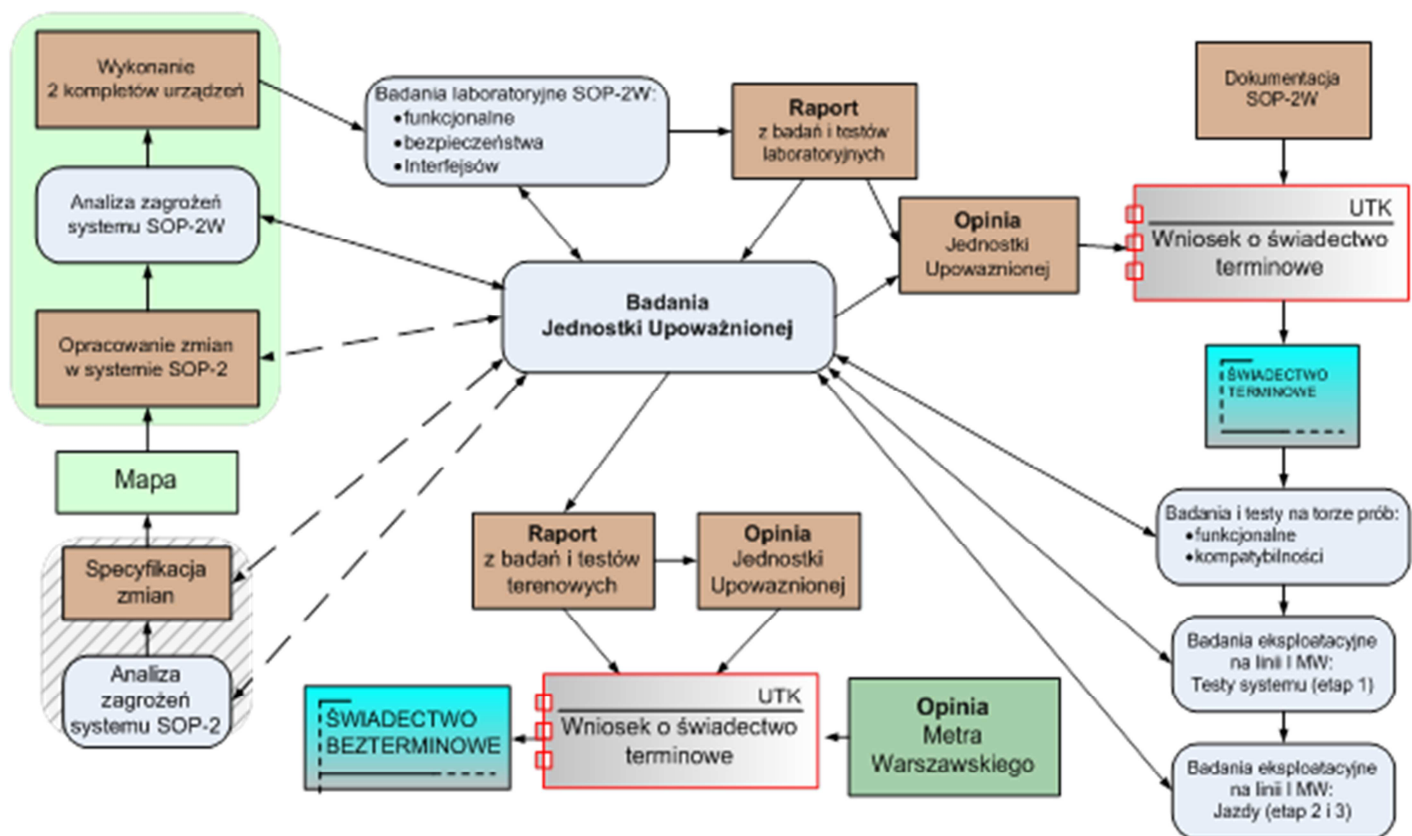
4. MODERNIZACJA I CERTYFIKACJA SYSTEMU SOP NA I LINII METRA

Eksploatacja systemu SOP-2 na I linii metra warszawskiego rozpoczęła się w 1995 roku. System zainstalowano w torach i na taborze rosyjskim typu 81. W 2000 r. zostały wprowadzone do eksploatacji pociągi METROPOLIS produkowane przez firmę Alstom. W trakcie eksploatacji w niektórych

komponentach systemu wprowadzono zmiany wynikające z doświadczeń eksploatacyjnych i rozwoju funkcjonalnego systemu. Zmiany te dotyczyły głównie sprzętu i oprogramowania urządzeń pojazdowych.

W roku 2004 system SOP-2 uzyskał świadectwa dopuszczenia do eksploatacji jako pomocniczy system prowadzenia ruchu. Uzyskane świadectwo dotyczy obu wersji taboru i urządzeń stacjonarnych. Ograniczenie funkcji systemu do urządzeń wspomagających prowadzenie pociągu powoduje, że ruch pociągów w metrze prowadzony jest przy włączonych sygnalizatorach torowych, a ich wskazania są obowiązujące dla maszynisty. Przyczyną ograniczonego zastosowania systemu SOP-2 jest fakt, że część pojazdowa systemu nie spełnia obowiązujących obecnie wymagań w zakresie bezpieczeństwa. Pomimo badań analitycznych i eksploatacyjnych prowadzonych w kolejnych latach, system SOP-2 nie uzyskał świadectwa dopuszczenia do eksploatacji jako podstawowy system prowadzenia ruchu, a ruch pociągów prowadzony jest obecnie nadal na podstawie wskazań semaforów dwustawnej blokady liniowej co znacznie ogranicza przepustowość I linii metra. W roku 2009 Wydział Transportu na zlecenie Metra Warszawskiego podjął prace mające na celu modyfikację systemu SOP-2 i jego certyfikację na I linii metra jako podstawowego systemu prowadzenia ruchu umożliwiającego jazdę pociągu na tzw. widoczność elektroniczną.

Proces wprowadzania zmian w systemie SOP-2, w celu uzyskania jego certyfikacji i związanych z certyfikacją badań zaprogramowano w postaci tzw. mapy drogowej przedstawionej na rys. 5. Prace analityczne, a w szczególności analiza zagrożeń, prowadzone z udziałem producenta systemu, pozwoliły określić zakres niezbędnych zmian eliminujących istniejące w systemie zagrożenia bezpieczeństwa. Zadania przedstawione na schemacie – rys. 5. obrazują złożoność certyfikacji oraz konieczność spójności specyfikacji poszczególnych zadań. W tym celu prace analityczne uwzględniają analizę systemową i strukturalną systemu SOP-2.



Rys. 5. Schemat procesu certyfikacji systemu SOP-2.

Opracowana specyfikacja zmian dotyczy wyłącznie części pojazdowej systemu, gdyż jak wykazano, część stacjonarna spełnia obowiązujące obecnie wymagania bezpieczeństwa zawarte w europejskich normach i standardach technicznych. Zmodyfikowana wersja systemu o nazwie SOP-2W bazuje na

platformie sprzętowo-programowej kompatybilnej z systemem SOP-3 który będzie eksploatowany na II linii metra. System SOP-2W przejdzie pełny cykl badań koniecznych [8] prowadzonych w warunkach laboratoryjnych oraz na torze prób stacji postojowej Kabaty i w tunelu metra. Badania prowadzone będą przez Jednostki Upoważnione z udziałem producenta – Bombardier Transportation (ZWUS) i użytkownika systemu Metro Warszawskie. Uzyskanie przez system SOP-2W świadectwa dopuszczenia do eksploatacji jako podstawowego systemu prowadzenia ruchu i jego instalacja na wszystkich pociągach pozwolą na zwiększenie przepustowości I linii metra i podniesienie poziomu bezpieczeństwa ruchu.

5. ZAKOŃCZENIE. WNIOSKI KOŃCOWE

W publikacji przedstawiono niektóre problemy dotyczące sterowania ruchem pociągów z zastosowaniem systemu SOP. Podstawowe wymagania odnoszące się do systemu sterowania ruchem pociągów metra to poziom automatyzacji umożliwiający uzyskanie wymaganej przepustowości, bezpieczeństwa i oszczędnego zużycia energii trakcyjnej. Systemami, które mogą spełnić te warunki są systemy klasy ATP, umożliwiające realizację bezpiecznej krzywej hamowania opartej o tzw. widoczność elektroniczną, w każdej chwili dla każdego pociągu metra znajdującego się na linii. Umożliwia to zatem skrócenie czasu następstwa pociągów w godzinie szczytu i sprostanie zadaniom przewozowym. Istotnym staje się więc wdrożenie i certyfikacja systemu SOP-2W jako podstawowego systemu prowadzenia ruchu pociągów na I linii metra. Rozwiązanie takie jest również uzasadnione ekonomicznie, ponieważ system SOP-2 wymaga modyfikacji jedynie części pojazdowej, a przyjęta koncepcja platformy sprzętowo – programowej zapewnia kompatybilność funkcjonalną taboru I i II linii metra.

Streszczenie

W publikacji przedstawiono wybrane problemy funkcji sterowania ruchem pociągów metra. W tym celu przeprowadzono uproszczony opis systemu sterowania ruchem pociągów metra ze uwagi na specyfikę i zadania techniczno - ruchowe. Jako przedmiot analizy wybrano system ograniczenia prędkości – SOP, który zostanie zmodernizowany jako system ATP w celu uzyskania pełnej funkcjonalności w zastosowaniu na liniach Metra Warszawskiego.

Słowa kluczowe: metro, pociąg, sterowanie, zadanie sterowania, system ATP.

Selected problems of metro train control (on the example of system SOP)

Abstract

The paper presents some problems relating to the specific motion control subway trains. For this purpose, is shortly described of the subway train control system from the specificity and technical - movement tasks. As the object of analysis was chosen speed limit system - SOP, which will be modernized as ATP system for full functionality in the application for Warsaw Metro lines.

Key words: metro (or subway), train of metro, control, the task of control, ATP - Automatic Train Protection.

LITERATURA

- [1] Barański S., Bergiel K., Karbowski H., Analiza porównawcza systemu SOP z innymi systemami automatycznego prowadzenia pociągu na liniach metra, Prace Naukowe PW TRANSPORT, Zeszyt 62, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2007, 15 – 24.
- [2] Bergiel K., Karbowski H., Automatyzacja prowadzenia pociągu, Wydawnictwo EMI-PRESS, Łódź 2005.
- [3] Bergiel K., Podstawy sterowania ruchem, www.i15.p.lodz.pl/wyklady/trakcja/pt_dm/rozd6.ppt, data dostępu 10.05.2012.
- [4] Bugaj A., Kochan A., Kierowanie i sterowanie pociągami bez maszynisty na przykładzie systemu SELTRAC, Zeszyty Naukowo - Techniczne SITKom RP, Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym, Nr 96 (Zeszyt 158), Kraków 2011, 55 – 66.
- [5] Chudzikiewicz A., Modyfikacja systemu SOP i jego certyfikacja na I linii metra jako podstawowego systemu prowadzenia ruchu, prezentacja na seminarium, Mądralin, 19 stycznia 2012.
- [6] Karbowski H., Podstawy infrastruktury transportu, Wydawnictwo WSHE w Łodzi, Łódź 2009.
- [7] Metro Signalling, Railway Technical Web Pages, www.railway-technical.com/sigtxt2.shtml,
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 roku w sprawie zakresu badań koniecznych do uzyskania świadectw dopuszczenia do eksploatacji typów budowli i urządzeń przeznaczonych do prowadzenia ruchu kolejowego oraz typów pojazdów kolejowych (Dz. U. Nr 212 poz. 1771 z późn. zm.)
- [9] Zabłocki W.: Interlocking Functions of ATC Station System, Archives of Transport Polish Academy of Sciences, ISSN 0866-9546, nr 4/2008, str. 89 – 108, 2008.
- [10] Żurkowski A., Pawlik M., Ruch i przewozy kolejowe, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.