

BARAŃSKI Sławomir¹
BŁASZCZYK Piotr²

BEZPIECZNY KOMPUTEROWY SYSTEM ATP

Współcześnie w systemach sterowania ruchem w transporcie w coraz szerszym stopniu znajdują zastosowanie komputery, przy pomocy których w łatwy sposób można zrealizować funkcję wynikającą z procedur sterowania ruchem w transporcie. Dla zapewnienia bezpieczeństwa działania systemu, poszczególne komputery realizujące funkcję ruchową łączy się w odpowiednie układy wielokanałowe – w literaturze można spotkać kilka zasadniczych typów stosowanych rozwiązań – sprzętowy układ dwukanałowy, jednokanałowy układ sprzętowy z dwoma programami, itd. System SOP-2P, którego struktura została przedstawiona w artykule, ma najwyższy poziom bezpieczeństwa – SIL 4.

FAIL-SAFE COMPUTER ATP SYSTEM

Nowadays computers became extensively applicable in traffic control systems as they enable easier implementation of functions that arise from traffic control procedures in transportation. For the safety of system action, each particular computers that realize movement functions are combined into multichannel circuits - literature presents several basic types of popularly applied solutions - two-channel hardware system, single channel hardware system with two programs, etc. SOP-2P System which has been presented in the article, has highest level of safety - SIL 4.

1. WSTĘP

W procesie rozwoju automatyzacji prowadzenia pojazdu, następuje eliminacja człowieka jako najbardziej zawodnego ogniwa w procesie oceny sytuacji ruchowej, podejmowania decyzji i ich realizacji. Jednocześnie automatyzacja ułatwia prowadzenie pojazdu, przez zastępowanie człowieka przy wykonywaniu czynności nie mających bezpośredniego wpływu na bezpieczeństwo ruchu

W ruchu kolejowym [3, 4], przy coraz większych prędkościach pociągów i rozwiniętych sposobach przekazywania informacji, automatyzacja prowadzenia pociągu jest przede wszystkim wprowadzana w zakresie bezpieczeństwa jazdy. Drugi z powodów

¹ Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22,
e-mail: slawomir.baranski@p.lodz.pl

² Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22,
e-mail: piotr.blaszczyk@p.lodz.pl

automatyzacji tj. zastępowanie maszynisty w zakresie wykonywania niektórych rutynowych czynności ma na kolei mniejsze szanse na wprowadzenie do eksploatacji. Jedynie w warunkach metra, przy gęstym ruchu, częstych przystankach są wprowadzane systemy zapewniające między innymi energooszczędne przejazdy, hamowanie docelowe przy peronie czy też automatyczne zawracanie pociągów na stacjach końcowych.

W artykule zostało przedstawione przykładowe rozwiązanie komputerowego systemu sterowania zapewniającego bezpieczną jazdę pociągu metra, eksploatowanego na linii A metra w Pradze, zaprojektowanego przy współpracy Zakładu Trakcji Elektrycznej Politechniki Łódzkiej i firmy Bombardier Transportation ZWUS z Katowic.

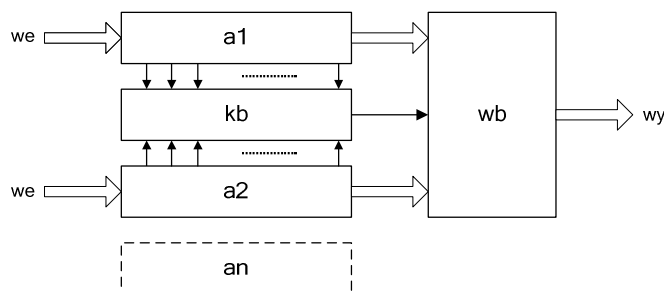
2. BEZPIECZNE SYSTEMY STEROWANIA W TRANSPORCIE

Systemy i urządzenia sterowania ruchem są narażone na szeroko rozumiane zakłócenia a elementy, z których są zbudowane ulegają uszkodzeniom. W czasie wystąpienia zakłócenia lub uszkodzenia urządzenia te nie mogą znaleźć się w stanie, mogącym stwarzać sytuację zagrażającą bezpieczeństwu ruchu. Urządzenia spełniające ten wymóg określa się jako fail-safe (bezpieczne mimo uszkodzenia), a w Polsce jako urządzenia bezpieczne [5]. Realizacja tych wymagań odbywa się przez stosowanie w urządzeniach elementów bezpiecznych (np. przekaźników I klasy w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym) lub układów przetwarzających wielokanałowo te same dane (redundancja sprzętowa i/lub programowa) oraz komparatorów bezpiecznych (fail-safe) porównujących wyniki pracy pochodzące z różnych kanałów.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa działania systemu, poszczególne komputery realizujące funkcję ruchowe łączy się w odpowiednie układy wielokanałowe. Przykłady podstawowych rozwiązań połączeń poszczególnych kanałów funkcjonalnych w układy bezpiecznie podane są poniżej.

Bezpieczny sprzętowy układ dwukanałowy (rys. 1) składa się z:

- dwóch jednakowych kanałów sprzętowych α_1 , α_2 ;
- komparatora bezpiecznego kb;
- wyjściowego układu bezpiecznego wb.



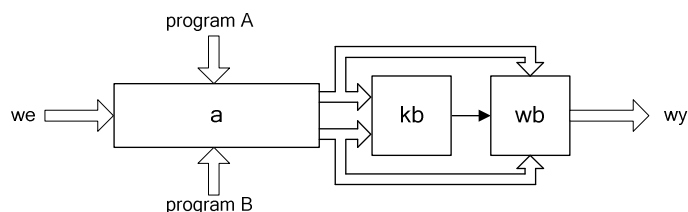
Rys. 1. Schemat blokowy dwukanałowego układu bezpiecznego

Sygnały wejściowe pochodzące np. z dwóch różnych zestyków tego samego przekaźnika, podawane są do dwóch takich samych kanałów funkcjonalnych α_1 , α_2 .

Komparator bezpieczny kb porównuje sygnały z obu kanałów i odpowiednio do wyniku tego porównania steruje wyjściowym układem bezpiecznym wb. Jeżeli występuje zgodność pracy obu kanałów, to na wyjściu układu wb pojawi się sygnał wyjściowy. Redundancja w tym rozwiązaniu jest realizowana sprzętowo, przez odpowiednie elementy i podzespoły elektroniczne, podwojenie kanałów funkcjonalnych i dodatkowe układy. Jest to najczęściej stosowany w praktyce układ bezpieczny. Większą dostępność działania można uzyskać stosując kolejny kanał przetwarzania informacji - oznaczony linią przerywaną na rys. 1. Wówczas, mimo że niezawodność układu jest mniejsza (zawiera więcej elementów), to cały układ będzie poprawnie działał nawet po uszkodzeniu jednego z kanałów. W przypadku systemu dwukanałowego uszkodzenie jednego kanału powoduje niesprawność całego systemu.

Bezpieczny układ z jednym kanałem sprzętowym oraz dwoma różnymi kanałami programowymi (rys. 2) tworzą:

- pojedynczy kanał sprzętowy α , z dwoma różnymi programami A i B realizującymi ten sam algorytm działania, lecz opracowanymi przez różne grupy programistów;
- komparator bezpieczny kb;
- wyjściowy układ bezpieczny wb.



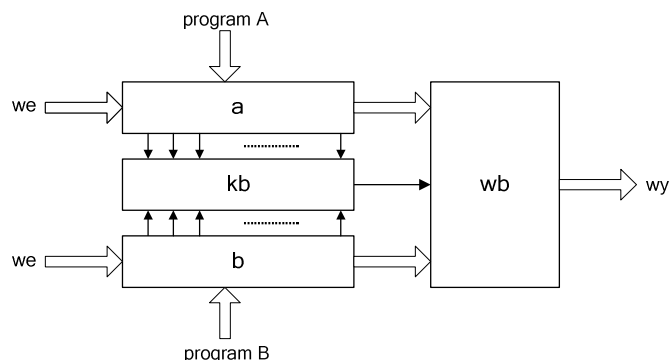
Rys.2. Bezpieczny jednokanałowy układ sprzętowy z dwoma kanałami programowymi

Sygnały wejściowe doprowadzane są do pojedynczego kanału funkcjonalnego α , który pracuje na przemian pod kontrolą programu A i programu B. Wyniki obliczeń w formie sygnałów wyjściowych z obu programów są porównywane w komparatorze bezpiecznym kb i po stwierdzeniu ich zgodności przekazywane do układów wykonawczych przez wyjściowy układ bezpieczny wb. Redundancja w tym rozwiązaniu jest realizowana programowo.

Bezpieczny układ dwukanałowy z różnymi kanałami sprzętowymi i różnymi programami w kanałach (rys. 3) tworzą:

- dwa różne kanały sprzętowe α i β z dwoma różnymi programami A i B realizującymi ten sam algorytm działania, lecz opracowanymi przez różne grupy programistów;
- komparator bezpieczny kb;
- wyjściowy układ bezpieczny wb.

Kanały funkcjonalne α i β różnią się co najmniej zastosowanymi procesorami. Układ jest tym bardziej bezpieczny, im bardziej oba kanały funkcjonalne są zróżnicowane. Wiąże się to oczywiście z większą złożonością, a tym samym mniejszą niezawodnością układu oraz większymi kosztami.



Rys. 3 Bezpieczny układ dwukanałowy z dwoma różnymi programami

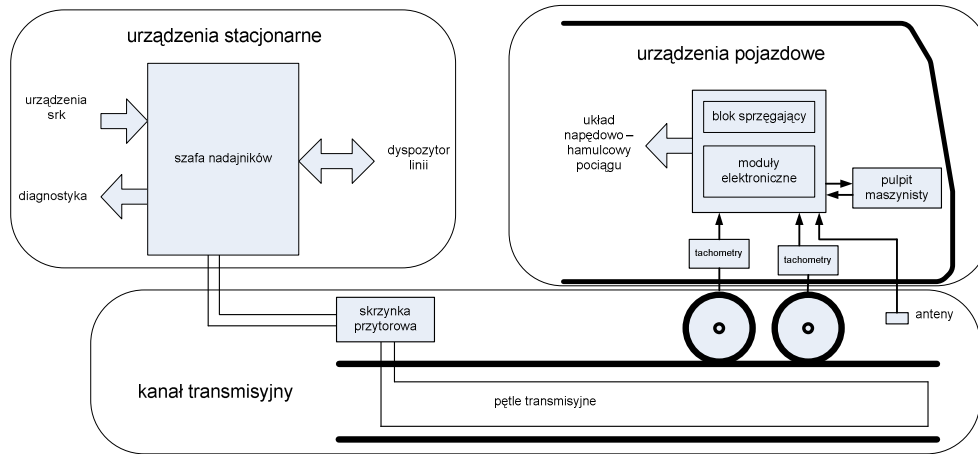
W kolejnych rozdziałach zostanie przedstawiony system SOP-2P zbudowany zgodnie z zasadą redundancji jednakowych kanałów sprzętowych z różnymi programami, których wyniki pracy porównywane są w komparatorze bezpiecznym.

3. SYSTEM SOP-2P

System SOP-2P zapewnia bezpieczeństwo ruchu pociągów metra [1, 2] poprzez automatyczne realizowanie wszystkich ograniczeń prędkości wynikających z położenia pociągów na linii, stanu semaforów, stałych ograniczeń prędkości na poszczególnych odcinkach torów, stanu peronowych przycisków bezpieczeństwa itp. Linia metra jest podzielona na tzw. odstępy blokowe, obowiązuje zasada, że na odstępie blokowym może znajdować się tylko jeden pociąg. Dlatego pociąg zbliżający się do odstępu blokowego zajętego musi zostać zatrzymany przed początkiem tego odstępu, traktowanym jako przeszkoda ruchowa. Ze względu na dużą gęstość ruchu pociągów na liniach metra, odstępy blokowe mają niewielkie długości, zawierające się w granicach od 30 m do 300 m. Przeszkodą ruchową może być również semafor wskazujący sygnał „stój”, koniec toru ślepego (tzw. tupiku), wrota hermetyczne nie ustawione w krańcowym położeniu otwarcia, a także początek obwodu torowego stacyjnego w przypadku wciśnięcia któregoś z peronowych przycisków bezpieczeństwa. System SOP-2P składa się z trzech podstawowych grup funkcjonalnych urządzeń:

- urządzeń stacjonarnych (nadawczych), zlokalizowanych w przekaźnikowniach stacji w bezpośrednim sąsiedztwie urządzeń srk (przełączników obwodów torowych oraz zwrotnicowych, kontroli położenia zwrotnic, kontroli świateł semaforów i utwierdzenia przebiegu, peronowych przycisków bezpieczeństwa itp.),
- urządzeń transmisyjnych w postaci pętli transmisyjnych, ułożonych wzdłuż toru między tokami szyn, które stanowią anteny nadawcze systemu, połączone ekranowanymi parami żył kablowych z nadajnikami poszczególnych pętli,
- urządzeń pojazdowych (odbiorczych), zainstalowanych w wagonach czołowych pociągów. Każdy pociąg jest wyposażony w dwa komplety urządzeń odbiorczych - z przodu i z tyłu składu.

Uproszczona struktura tych urządzeń została pokazana na rys. 4.



Rys.4 Struktura urządzeń systemu SOP-2P

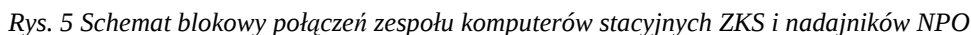
Koncepcja działania systemu SOP opiera się na zasadzie, że każdemu odstępowi blokowemu przypisuje się określony stopień prędkości, równoznaczny z wartością prędkości dopuszczalnej na danym odśpię. Stopień prędkości dla danego odstępu blokowego jest wybierany ze zbioru stopni prędkości przyjętych w systemie w taki sposób, aby maksymalna droga hamowania od tej prędkości była mniejsza od wolnej drogi między końcem tego odstępu blokowego a najbliższą przeszkodą ruchową. Gdy prędkość rzeczywista pociągu osiągnie transmitowaną do pociągu wartość obowiązującego stopnia prędkości następuje wyłączenie napędu. Jeżeli prędkość rzeczywista pociągu przekracza wartość stopnia prędkości o 2 km/h to automatycznie zostaje włączone hamowanie służbowe pełne. W miarę zbliżania się pociągu do przeszkody stopnie prędkości na poszczególnych odstępach blokowych maleją. Na ostatnim odśpię blokowym, bezpośrednio poprzedzającym przeszkodę ruchową, stopień prędkości wynosi 0 km/h, co powoduje automatyczne zatrzymanie pociągu przed przeszkodą.

4. URZĄDZENIA STACJONARNE

Urządzenia stacyjne systemu można podzielić na dwie podstawowe grupy:

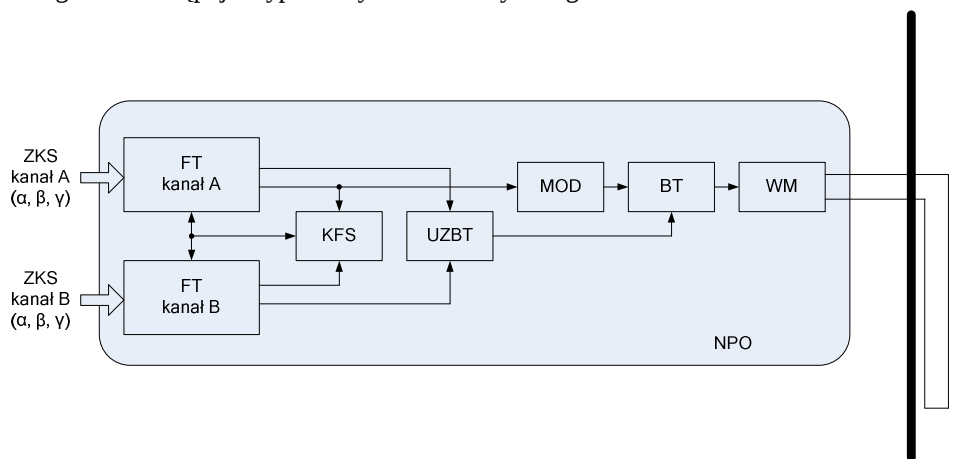
- zespół komputerów stacyjnych realizujący wszystkie podstawowe funkcje logiczne,
- nadajniki telegramów zasilające poszczególne pętle transmisyjne.

Zespół komputerów stacyjnych ZKS w oparciu o stan zestyków urządzeń srk, określających sytuację ruchową i torową, informacje z centrum dyspozytorskiego oraz stałe parametry trasy wypracowuje informacje dla nadajników obsługujących obszar danej stacji. Następnie cyklicznie wysyła telegramy z tymi informacjami, adresując je do poszczególnych nadajników tej stacji – rys. 5.



Każdy z trzech komputerów stacyjnych niezależnie wypracowuje telegramy dla poszczególnych nadajników pojedynczych obwodów przewodowych NPO i odpowiednio zaadresowane przesyła łączem szeregowym na wejście każdego nadajnika. Układ wejściowy bloku formowania telegramów FT danego nadajnika pojedynczego obwodu na podstawie adresu kompletuje trzy zestawy ciągów binarnych telegramu, pochodzące od trzech różnych komputerów $\alpha \beta \gamma$ w zespole stacyjnym ZKS. W wyniku porównania telegramów z trzech komputerów stacyjnych w bloku FT uzyskiwana jest właściwa postać binarna telegramu, stanowiąca podstawę do wypracowania wiarygodnego, odpowiednio zmodulowanego i wzmacnionego sygnału wysyłanego przez ten nadajnik do obwodu przewodowego (kabla zasilającego i pętli transmisyjnej). Niesprawność jednego z komputerów stacyjnych powoduje pojawienie się różnic w ciągach binarnych na trzech wejściach nadajnika i zasygnalizowanie tego błędu dyspozytorowi linii w centralnej dyspozytorni. Nie spowoduje to jednak przerwy w poprawnym działaniu urządzeń stacjonarnych systemu i umożliwia bezpieczne kontynuowanie ruchu.

Bezpieczeństwo pracy urządzeń stacjonarnych systemu jest osiągana przez dwukanałową strukturę tych urządzeń, które dokonują cyfrowego przetwarzania informacji wejściowych oraz przez kontrolę rezultatów pracy obu kanałów za pomocą bezpiecznego komparatora znajdującego się w każdym z nadajników. Poszczególne kanały A i B trzech komputerów głównych α , β i γ , uzyskując informacje wejściowe z przypisanych im źródeł, pracują w oparciu o różne programy A i B, sporządzone przez różnych programistów lecz według tych samych dla danej stacji zasad ogólnych. Dlatego wyniki w postaci telegramów dla poszczególnych nadajników powinny być jednakowe. Wypracowane przez kanał A komputera stacyjnego α telegramy są odpowiednio adresowane i cyklicznie wysyłane do wejść α kanału A grupy nadajników pojedynczego obwodu. Kanały A komputerów β i γ tak samo rozsyłają telegramy odpowiednio do wejść β i γ kanału A grupy nadajników. Analogicznie następuje wypracowywanie i rozsył telegramów w kanale B.



Rys. 6. Funkcjonalny schemat blokowy nadajnika pojedynczego obwodu

Blok formowania telegramów rozróżnia telegramy robocze, przeznaczone dla nadajnika obwodu przewodowego toru zajętego przez pociąg, od telegramów testowych, wysyłanych do pozostałych nadajników. Treść telegramu roboczego zostaje zachowana, natomiast telegram testowy jest zastąpiony własnym telegramem testowym, wypracowywanym w danym kanale nadajnika. Praca obu kanałów nadajnika jest synchroniczna, tak więc formowanie telegramów rozpoczyna się jednocześnie. Poszczególne bity wysyłane są na wyjścia kanałów A i B w tym samym rytmie, właściwym dla szybkości transmisji w pętli przewodowej, narzuconym przez układ taktujący komparatora fail-safe KFS.

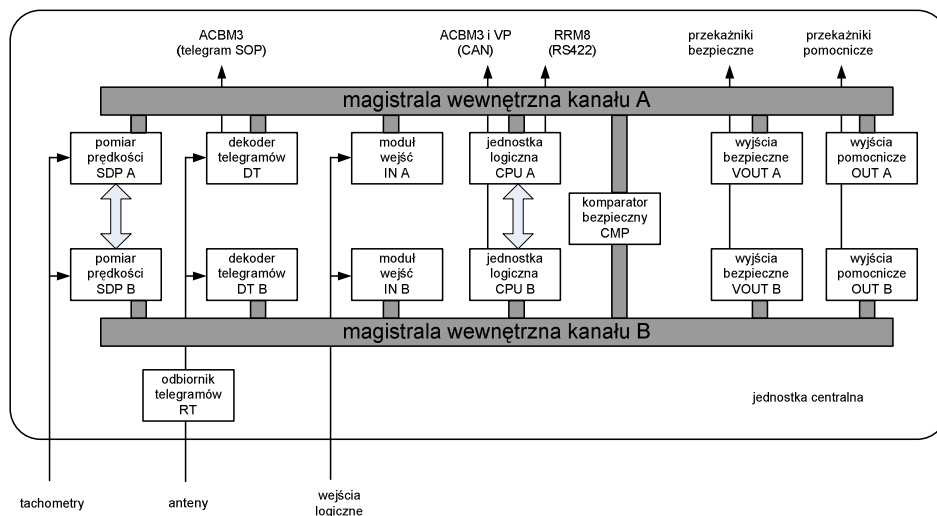
Ze względu na to, że komputery w zespole ZKS pracują asynchronicznie, mogą pojawić się chwilowe rozbieżności treści telegramów przegłosowanych przez kanały A i B układu wejściowego odbiornika. W prawidłowo działającym NPO spowoduje to zmodyfikowanie wysyłanego telegramu tak aby nie był on zaakceptowany na pociągu. W przypadku wystąpienia nieprawidłowości w działaniu NPO gdy nie nastąpi modyfikacja telegramu to zostaje to wykryte przez komparator fail-safe. Po wykryciu niezgodności poszczególnych bitów przez blok KFS przestaje on wysyłać sygnały taktujące, przez co praca mikrokomputerów obu kanałów zostaje zatrzymana. Po zablokowaniu sygnału zegarowego zostaje wysłany sygnał restartu, pobrane zostaną nowe dane z obu wejść i formowanie

telegramów rozpoczyna się na nowo. Jeśli telegramy na obu wyjściach są takie same, to ponownie układ zasilania bramki transmisyjnej UZBT otwiera bramkę transmisyjną BT, przez którą przechodzi zmodulowany sygnał nośny z bloku modulatora MOD do bloku wzmacniacza wyjściowego nadajnika WM (wzmacniacza mocy). Układ zasilania bramki transmisyjnej został zaprojektowany tak, że niezgodności trwające do 0.5s nie powoduje wyłączenia bramki transmisyjnej. Natomiast niezgodności trwające ponad 3s powoduje trwałe wyłączenie bramki transmisyjnej – ponowne jej załączenie jest możliwe dopiero po interwencji obsługi.

5. URZĄDZENIA POJAZDOWE

Zasadniczym zadaniem urządzeń pojazdowych systemu jest zapewnienie bezpieczeństwa pociągowi jadącemu z włączonymi urządzeniami. Realizacja tego zadania polega na określeniu wartości prędkości, z którą pociąg może się poruszać, pomiar prędkości rzeczywistej oraz automatycznym wypracowaniu odpowiednich sterowań do układów napędowych i hamulcowych pociągu w wyniku porównania tych prędkości.

Urządzenia pojazdowe SOP-2P mają strukturę dwukanałową – na rys. 7 przedstawiony jest schemat blokowy odbiornika systemu SOP-2P. Poszczególne moduły sprzętowo są identyczne w obu kanałach, lecz każdy kanał wykorzystuje odrębne oprogramowania, przygotowane przez różne zespoły programistów.



Rys. 7 Schemat blokowy odbiornika SOP-2P.

Moduł dekodera telegramów RT/DT odbiera sygnał z anten umieszczonych pod pociągami, jest on w nim wzmacniany i demodulowany. W wyniku demodulacji powstaje ciąg binarny, zawierający cyklicznie powtarzane telegramy, wypracowane przez urządzenia stacyjne systemu. Poszczególne telegramy poddaje się trójetapowemu procesowi dekodowania według określonych algorytmów. Moduł dekodera telegramów, jako jedyny spośród modułów urządzeń pojazdowych SOP-2P, ma szczególną cechę: może

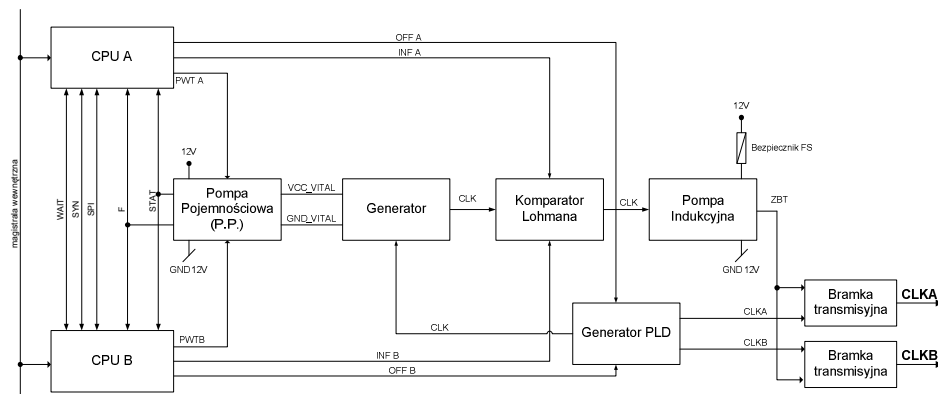
porozumiewać się z identycznym modułem DT umieszczonym w kasce SOP-2P w wagonie sterowniczym na drugim końcu pociągu, wykorzystując w tym celu linie łączności, przebiegające przez całą długość składu między kabinami. Przesyłanie informacji uzyskanych z anten odbiorczych na drugim końcu pociągu jest konieczne przy jeździe pociągu do tyłu podczas bezobsługowego obrotu.

Moduł pomiaru prędkości SDP współpracuje z trzema osiowymi czujnikami prędkości. Na ich podstawie każdy kanał niezależnie oblicza chwilową prędkość rzeczywistą i drogę przejeżdżaną przez pociąg. Odpowiednio przetworzone i uzgodnione między kanałami wartości przekazywane są do jednostki logicznej CPU.

Wszystkie informacje pobierane z manipulatorów pulpitu maszynisty oraz większość informacji pochodzących z czujników i układów pociągu dociera do urządzeń pojazdowych systemu za pośrednictwem modułu sygnałów wejściowych IN.

Moduł CPU na podstawie wszystkich informacji otrzymanych z modułów DT, SDP, IN oraz z komputera pojazdowego VP i urządzeń ACBM3 wypracowuje odpowiednie rozkazy i sygnały sterujące do wszystkich układów i obwodów pojazdowych współpracujących lub obsługiwanych przez podsystem SOP-2P.. Sygnały sterujące do bloku sprzęgającego i do lampek kontrolnych oraz sygnalizacyjnych na pulpicie jednostka logiczna wysyła za pośrednictwem dwóch modułów: wyjść bezpiecznych VOUT i wyjść pomocniczych OUT.

Moduł wyjść bezpiecznych na podstawie sygnałów z jednostki logicznej ustawia w jednym z dwu stanów: napięciowym lub beznapięciowym wyjścia bezpieczne, prowadzące do cewek przekaźników wykonawczych w bloku sprzęgającym. Odwzbudzenie wyjście „hamowanie awaryjne” powoduje włączenie hamowania pneumatycznego nagłego. Jednostka logiczna CPU uzyskuje dzięki temu możliwość zatrzymania pociągu, gdyby rozkaz włączenia hamowania służbowego wysłany do komputera pokładowego nie został wykonany we wszystkich wagonach, a nawet w przypadku, gdyby przerwana została komunikacja po łączu CAN z komputerem pokładowym.



Rys. 8 Schemat blokowy komparatora bezpiecznego odbiornika SOP-2P.

Pracę omówionych modułów kontroluje komparator bezpieczny CMP. Wykonuje on dwa zadania: sprawdza synchroniczność pracy obu kanałów A i B oraz porównuje określone informacje, wypracowywane w obu kanałach. Jeśli kanały pracują

synchronicznie, to generuje on sygnały zegarowe, doprowadzone do obu kanałów modułu wyjść bezpiecznych. Ich obecność powoduje właściwą obsługę tych wyjść. W przypadku rozsynchronizowania się kanałów zanikają sygnały zegarowe i wyjścia bezpieczne tracą napięcie. Wywołuje to włączenie hamowania nagłego. W ramach drugiego zadania komparator porównuje wypracowane w obu kanałach wartości prędkości rzeczywistej oraz prędkości kontrolowanej. Jeśli wykryje różnice, to również następuje zanik sygnału zegarowego dla wyjść bezpiecznych, jeżeli niezgodność w kanałach trwa dłużej niż 3 s, to jest ona trwale zapamiętywana (następuje przepalenie bezpiecznika w komparatorze bezpiecznym).

6. PODSUMOWANIE

System SOP-2P gwarantują bezpieczeństwo jazdy pociągów na linii dzięki zastosowaniu wielokierunkowych działań, oraz sprawdzonych w praktyce rozwiązań układowych i programowych. Działania zapewniające bezpieczeństwo obejmują:

- staranne zaprojektowanie systemu zgodnie z normami PN-EN 50126, PN-EN 50128, PN-EN 50129,
- kontrolę źródeł wiadomości, od których zależy bezpieczeństwo jazdy (ciągłość transmisji, sygnały z tachometrów, itp.),
- kontrolę wykonywania rozkazów, od których zależy bezpieczeństwo jazdy,
- testowanie urządzeń pojazdowych i układu transmisyjnego przed wyjazdem pociągu.

Podstawę bezpieczeństwa systemu stanowi automatyczne zatrzymywanie pociągów przed obwodami torowymi sygnalizowanymi jako zajęte przez urządzenia srk i przed semaforami wskazującymi sygnał „stój” oraz automatyczne ograniczanie prędkości do wartości zadanych przed odcinkami linii, na których obowiązują ograniczenia prędkości jazdy. Na obwodach torowych poprzedzających punkty chronione i odcinki ograniczeń wytwarzane są sekwencje malejących stopni prędkości, umożliwiające zrealizowanie tych ograniczeń przez każdy z pociągów.

System SOP-2P jest podstawą do opracowania nowego systemu SOP-3, który będzie zapewniał bezpieczną jazdę pociągów na II linii metra w Warszawie.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Barański S.: *System ATP typu SOP-2P dla linii A metra praskiego*. Materiały Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej Semtrak 2002. Zakopane 2002.
- [2] Barański S., Kubik.: *Systemy ATP typu SOP dla metra*. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku” MET’2003. Warszawa 2003.
- [3] Bergiel K., Karbowski H.: *Automatyzacja prowadzenia pociągu*. EMI-PRESS, Łódź 2005.
- [4] Dyduch J., Pawlik M.: *Systemy automatycznej jazdy pociągu*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [5] Wawrzyński W.: *Bezpieczeństwo systemów sterowania w transporcie*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa – Radom 2004.