

Jerzy MIKULSKI  
Dariusz BOGACKI  
Jerzy ŁUKASIK

## ZDECENTRALIZOWANY SYSTEM STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

**Streszczenie.** Sterowanie ruchem pojazdów kolejowych jest szczególnym przypadkiem sterowania i może być traktowany jako wyodrębniona dziedzina automatyki. Zdecentralizowany system sterowania ruchem kolejowym musi spełniać te same wymagania funkcjonalne, ruchowe i bezpieczeństwa co system scentralizowany. Sieć poszczególnych modułów tworzy lokalną sieć komputerową połączoną między sobą kablem transmisyjnym. Do komunikacji pomiędzy modułami wykorzystano zasadę działania opartą na protokole TCP/IP powszechnie stosowanym w internecie.

## DECENTRALIZED RAILWAY TRAFFIC CONTROL SYSTEM

**Summary.** Railway control system is a special case of control and may be treated as a separate domain of automation. A decentralized system has to fulfill the same functional, operational and safety requirements as the control room operating in a centralized system. The principle of operation based on TCP/IP protocol (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) was used for communication between modules

### 1. WSTĘP

Sterowanie ruchem pojazdów kolejowych jest szczególnym przypadkiem sterowania i może być traktowane jako wyodrębniona dziedzina automatyki. Wynika to z wymagań stawianych większości systemów sterowania ruchem w zakresie pewności działania. Pewność działania obiektu jest tu rozumiana jako prawdopodobieństwo niewystąpienia usterki lub uszkodzenia w działaniu tego obiektu w określonych warunkach pracy i w określonym czasie.

W systemach sterowania ruchem kolejowym usterki powodują lub mogą powodować niesprawność ruchu, na przykład w postaci opóźnienia pociągu. Należy jednak wydzielić usterki powodujące dodatkowo wystąpienie sytuacji niebezpiecznych. W projektowanych i budowanych systemach sterowania ruchem kolejowym nie powinno się dopuszczać do tego rodzaju usterek.

Dla oszacowania pewności działania systemu lub urządzenia sterowania ruchem kolejowym korzysta się z pojęć: bezpieczeństwa i niezawodności.

## 2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA

Obecnie do sterowania i zabezpieczania instalacji torowych stosuje się na kolei systemy o budowie :

- scentralizowanej,
- zdecentralizowanej.

System scentralizowany reprezentowany jest w większości przypadków przez nastawnie przekąźnikowe pracujące według tzw. zasady planu torowego (każdemu elementowi zewnętrznemu przyporządkowany jest odpowiedni zestaw przekąźnikowy). Nowszą formą nastawni są nastawnie kolejowe oparte na technice komputerowej. Technika ta wykorzystywana jest również do stworzenia nastawni kolejowej pracującej w systemie zdecentralizowanym.

System zdecentralizowany musi spełniać te same wymogi funkcjonalne, ruchowe i bezpieczeństwa co nastawnia działająca w systemie scentralizowanym. Cały obszar sterowania jest tam podzielony na części, a każdemu powstałemu w ten sposób zakresowi częściowemu sterowań przyporządkowany jest komputer zadań częściowych. Przez komputer centralny przekazywane są polecenia nastawcze do komputera zadań częściowych, a ten z kolei nadzoruje i zarządza elementami zewnętrznymi okręgu nastawczego poprzez przyłączone do nich komputery wykonawcze - sterowniki lokalne. Każdemu komputerowi wykonawczemu przyporządkowany jest jeden element okręgu nastawczego. Drugi komputer zadań częściowych stanowi „gorącą rezerwę”. Rysunek 1 przedstawia przykładowy zdecentralizowany system sterowania ruchem kolejowym.

Kombinację sterownika lokalnego (komputerowy system wykonawczy) i logiki realizowanej przez oprogramowanie tego sterownika nazwano w systemie „modułem”. Do realizacji tego typu zadania można wykorzystać programowalny sterownik logiczny PLC.

Elementy zewnętrzne podzielono na dziewięć różnych typów modułów:

- moduł rozjazdu zwyczajnego,
- moduł rozjazdu krzyżowego podwójnego,
- moduł rozjazdu krzyżowego pojedynczego,
- moduł bezzwrotnicowego skrzyżowania torów,
- moduł semafora,
- moduł sygnalizatora powtarzającego,
- moduł tarczy ostrzegawczej,
- moduł tarczy manewrowej,
- moduł nierozgałęzionego odcinka toru.

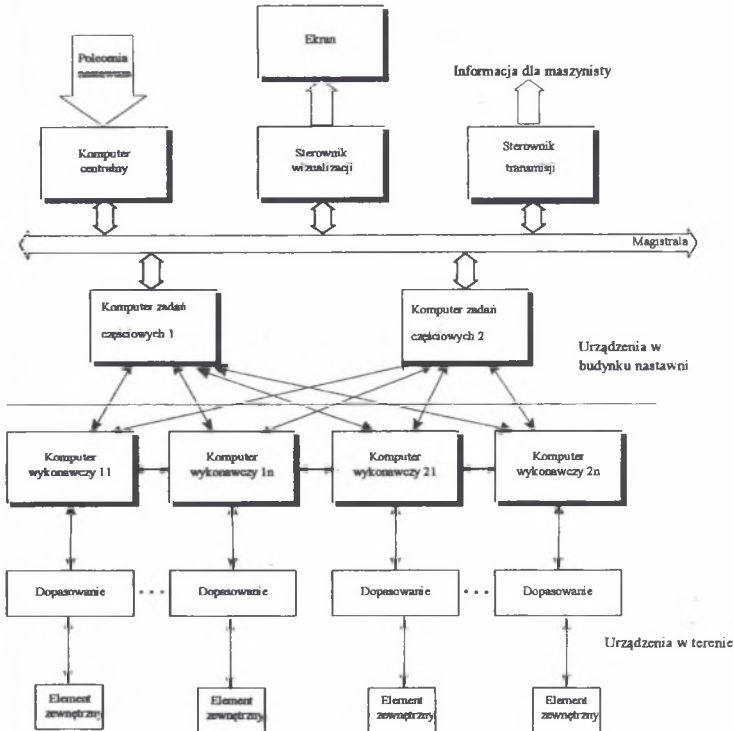
Funkcje modułów zależne są od typu sterowanego elementu zewnętrznego. Każdy moduł „analizuje” wyłącznie:

- informacje o sterowanym elemencie (niezbędne do tego funkcje i przebiegi),
- ograniczone informacje o bezpośrednio przylegających sąsiednich elementach lub o modułach im przyporządkowanych.

Do zasadniczych zadań modułów należy:

- sterowanie i nadzór nad procesami nastawczymi przyporządkowanego elementu,
- generowanie informacji o stanie modułu (moduł ma w każdym momencie określony stan),
- wymiana informacji oraz wykorzystanie przyjętych informacji w celu podejmowania w każdym module, zależnie od typu przyporządkowanego elementu, decyzji,

- samotestowanie - aby można było wcześniej rozpoznać występujące defekty urządzeń,
- rozpoznanie „krajowych” modułów systemu sterowania.



Rys.1. Schematyczne przedstawienie zdecentralizowanego systemu sterowania ruchem kolejowym

Fig.1. Schematic representation of a decentralized railway traffic control system

### 3. KOMUNIKACJA I TRANSMISJA

Połączone ze sobą moduły są odzwierciedleniem planu sytuacyjnego torów na stacji i w jej obrębie. Takie założenie pozwala przedstawić plan torowej w postaci sieciowej, wykorzystując jako punkty charakterystyczne tej sieci moduły poszczególnych elementów. Ułożenie modułów nie jest przypadkowe, gdyż w rzeczywistości ma ono prowadzić do możliwości tworzenia drogi przebiegu dla wszystkich sytuacji ruchowych zaistniałych dla danej stacji.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa należy zapewnić pewność działania tak skonstruowanej sieci. Ponieważ nie wszystkie moduły mogą łączyć się ze sobą w sposób jednoznaczny, musi istnieć sprawdzanie połączeń między modułami sąsiednimi, jak również sieć powstała w wyniku połączenia modułów musi być odpowiednio zorientowana do kierunku nastawianej drogi przebiegu. W tym celu każdemu modułowi należy nadać status,

który określa jednoznacznie jego nazwę i położenie w sieci oraz sposób komunikacji z modułami sąsiednimi. Komunikacja ta nosi nazwę komunikacji poziomej.

W celu uniknięcia skutków awarii systemu sterowania, wynikających z nieprawidłowego działania modułów, powinna istnieć możliwość wzajemnego sprawdzania się (kontrolowania). Sprawdzenie to może odbywać się poprzez wysyłanie przez moduł określonych danych do modułu sąsiedniego, który po wykorzystaniu i „opracowaniu” tych danych koduje je i wysyła z powrotem do modułu nadającego. Jeżeli dane po zdekodowaniu są prawidłowe, to moduł uważa moduł sąsiedni, jak również połączenie pomiędzy nimi, jako działające prawidłowo. W przypadku gdy przyjęte i zdekodowane dane nie są prawidłowe, moduł informuje komputer centralny, w meldunku o swoim stanie, o awarii modułu sąsiedniego.

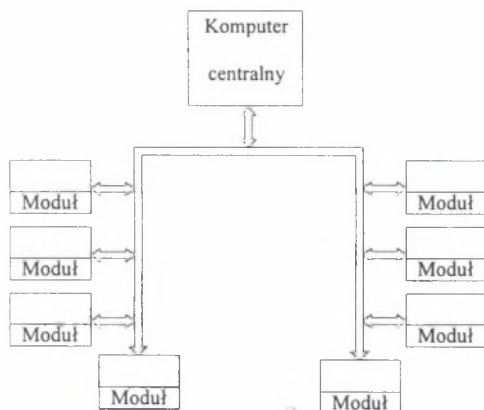
Dodatkowo zabezpieczenie modułów sterujących przed błędami może być zrealizowane na dwóch poziomach:

- na poziomie sprzętowym przez zastosowanie układu czasowego, pełniącego funkcję „Watch-doga”, adresowanego okresowo po zakończeniu każdego cyklu pracy modułu,
- na poziomie oprogramowania przez zastosowanie wszechstronnych testów programowych, których zadaniem jest kontrola prawidłowości działania mikroprocesora (test instrukcji na stałych danych i porównanie wyniku z wzorcem), pamięci RAM (test bitów) oraz pamięci EPROM (sprawdzenie prawidłowości sum kontrolnych).

Komunikacja pomiędzy modułami a komputerem centralnym (sieć pionowa) wymaga wprowadzenia usystematyzowanego wektorowego opisu sterowania na bazie modelu matematycznego. W sieci tej wyróżnia się następujące typy sygnałów:

- zgłoszenie rozkazu,
- wykonanie rozkazu,
- sterowanie danym urządzeniem,
- kontrola stanu urządzenia,
- zgłoszenie awarii.

Budowa sieci pionowej oparta jest na topologii magistralnej. Sieć ta została przedstawiona na rys. 2. Przy zastosowaniu takiej topologii wszystkie moduły oraz komputer zadań częściowych połączone są wzajemnie jednym wspólnym kanałem transmisyjnym.



Rys.2. Schematyczne przedstawienie sieci pionowej  
Fig.2. Schematic representation of a vertical network

Algorytm transmisyjny musi zapewnić taką pracę, aby zawsze „nadawał” tylko jeden uczestnik, wszyscy inni mogą jednak „nasłuchiwać”. Algorytmami dostępu, które sterują i kontrolują dostęp do łącza transmisyjnego, mogą być:

- algorytm CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collisions Detection – wielodostępność ze sprawdzaniem transmisji w sieci i wykrywaniem kolizji),
- algorytm z przekazywaniem znacznika (Token Passing). Podstawowym założeniem tej metody sterowania dostępem modułów do łącza transmisyjnego jest unikanie jakichkolwiek kolizji w sieci. Prawo nadawania ma w każdej chwili tylko jeden moduł, który posiada pewien umowny znacznik.

Automatyczna samokonfiguracja zdecentralizowanego systemu sterowania ruchem kolejowym możliwa jest dzięki szczególnym własnościom, które wynikają z jego budowy oraz budowy poszczególnych modułów. Jej wynikiem powinien być gotowy i prawidłowo pracujący system sterowania. Powinna ona odbywać się :

- w momencie uruchamiania nowego systemu,
- po każdej zmianie topologii torów, a więc w momencie przyłączania do systemu nowych modułów, względnie ich odłączania,
- po każdym wyłączeniu lub wystąpieniu defektów całego systemu lub jego składników, w następującym po jego naprawie lub naprawie jego składników ponownym starcie.

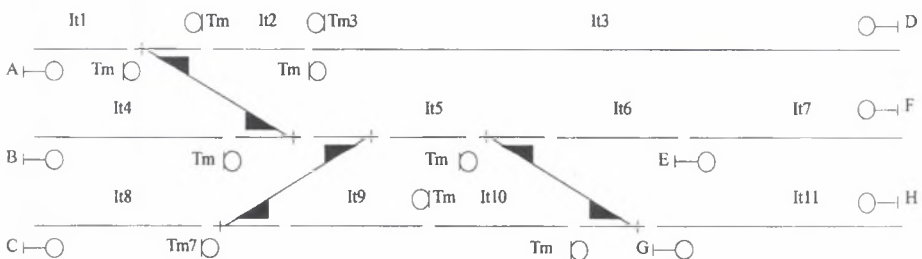
Przebieg samokonfiguracji systemu można podzielić na trzy fazy :

- faza wpisywania danych do komputerów zakresów częściowych,
- faza nadawania modułom atrybutów stałych,
- faza wpisywania danych do modułów.

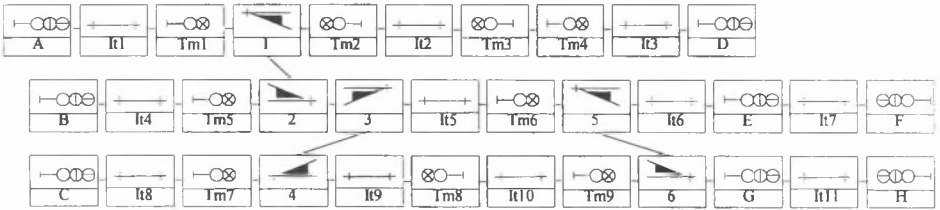
#### 4. OGÓLNE ZASADY DZIAŁANIA SIECI

W zdecentralizowanym systemie sterowania ruchem kolejowym poszczególne moduły będące odzwierciedleniem planu sytuacyjnego torów na stacji i w jej obrębie tworzą lokalną sieć, połączoną między sobą kablem transmisyjnym.

Przykładowy plan sytuacyjny oraz odpowiadające mu połączenia między modułami przedstawiają rys. 3 i 4.



Rys.3. Przykładowy fragment okręgu nastawczego  
Fig.3. An example of a control area fragment

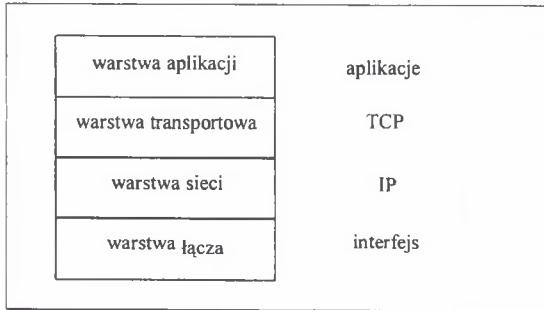


Rys.4. Połączenia pomiędzy modułami (sieć pozioma)  
Fig.4. Connection between modules (horizontal network)

Sieć poszczególnych modułów oraz komputer centralny tworzą lokalną sieć komputerową połączoną między sobą kablem transmisyjnym. Do komunikacji pomiędzy modułami wykorzystano zasadę działania opartą na protokołach TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) powszechnie stosowanym w Internecie.

Każda wiadomość przesyłana w sieci, wykorzystująca protokół TCP/IP, przechodzi przez cztery warstwy: aplikacji, transportową, sieciową i łącza.

Podział tych warstw został pokazany na rys. 5.



Rys.5. Cztery warstwy protokołów TCP/IP  
Fig.5. Four levels of TCP/IP protocols

Warstwa łącza, nazywana często warstwą łącza danych lub dostępu, zawiera programy obsługi urządzeń wchodzących w skład systemu operacyjnego i kart interfejsów.

Warstwa sieci obsługuje ruch pakietów w sieci. Warstwę tę tworzą protokół IP i inne protokoły wchodzące w skład protokołu TCP/IP.

Warstwa transportowa zapewnia przepływ danych pomiędzy dwoma hostami (modułami) obsługując znajdującą się nad nią warstwę aplikacji.

Warstwa aplikacji obsługuje funkcje związane z określoną aplikacją korzystającą z sieci.

Tak samo jak w sieci internet każdy moduł sieci zdecentralizowanego systemu sterowania ruchem kolejowym musi posiadać unikalny adres, identyfikujący go w sposób jednoznaczny w sieci. W tym celu konieczne jest istnienie jednego centrum zarządzającego przydziałem adresów. Taką rolę spełnia komputer centralny dla danego okręgu nastawczego.

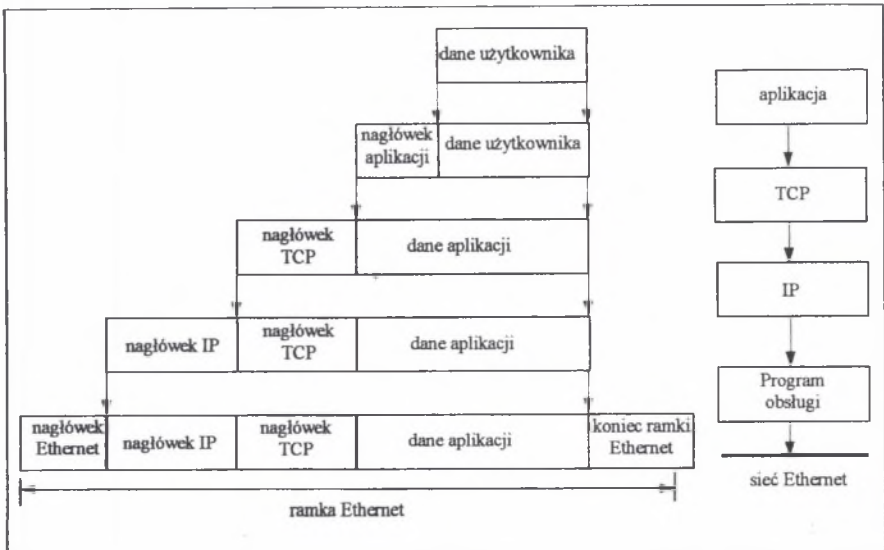
Założono, że, podobnie jak to ma miejsce w sieci internet, długość takiego adresu będzie wynosiła 32 bity. Te 32 bity adresu zapisane będą w postaci czterech liczb dziesiętnych, rozdzielonych kropkami.

W sieci internet występuje pięć klas adresów internetowych. Dla celów niniejszej pracy zostaną wybrane trzy klasy „A”, „B” i „C”, umożliwiające komunikację z pojedynczymi modułami. W późniejszym czasie, po przeprowadzeniu prób z określoną „rzeczywistą” liczbą elementów z przykładowego okręgu nastawczego, zostanie wybrana jedna, najbardziej odpowiadająca sposobowi zapisu klasa, według której oznaczone zostaną poszczególne moduły.

Wszystkie pakiety informacji w takiej sieci dostępne byłyby dla każdego elementu (modułu) sieci, gdyż poszczególne moduły połączone są jednym kablem. Natomiast to, do którego z poszczególnych modułów wysłana jest informacja, zostanie odczytane przez konkretny moduł na podstawie nadanego adresu docelowego. Każdy moduł posiada swój adres i przyjmuje tylko te pakiety, które są do niego adresowane.

Przesył danych w sieci lokalnej (np. Ethernet) następuje za pomocą ramek. Tworzenie ramki (enkapsulacja) przebiega następująco: kiedy aplikacja wysyła dane za pomocą TCP, to przechodzą one w dół zestawu protokołów przez każdą warstwę, dopóki nie zostaną przesłane przez sieć w postaci ciągu bitów. Każda warstwa uzupełnia otrzymane z warstwy wyższej dane o swoje własne, dołączając je w postaci nagłówka.

Proces ten ilustruje rys. 6.

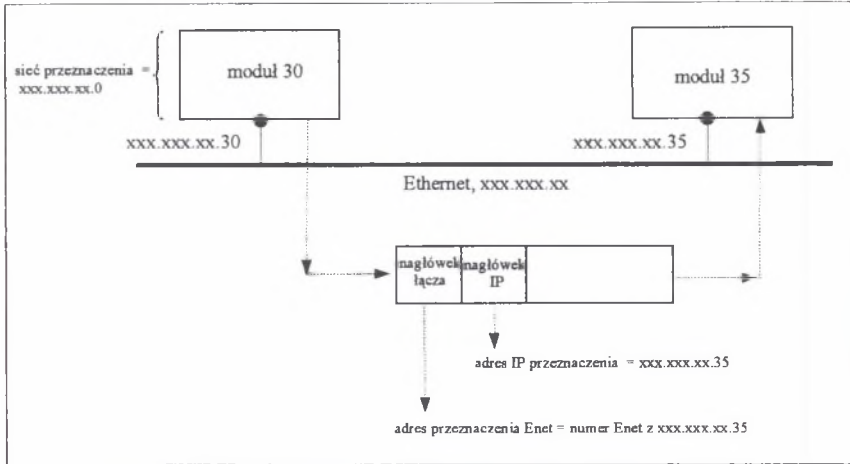


Rys. 6. Tworzenie ramki danych przekazywanych w dół stosu protokołów

Fig. 6. Creation of frame for data transferred down the protocol stack

Kiedy ramka trafi do miejsca przeznaczenia rozpoczyna się proces odwrotny. Wszystkie nagłówki są usuwane przez odpowiednie protokoły przekazujące sobie dane. Każdy protokół przegląda pole swojego nagłówka zawierające identyfikator, aby określić, do którego protokołu z warstwy wyższej należy skierować dane. Proces ten zwany jest demultipleksacją.

Sposób przekazywania danych pomiędzy modułami przedstawia rys. 7. W powyższym przypadku moduł, do którego zostały wysłane dane, jest przyłączony do tej samej sieci.



Rys. 7. Dostarczanie telegramu z modułu 30 do modułu 35  
Fig. 7. Delivery of a telegram from module 30 to module 35

W sieci rozległej, jaką jest sieć internet, schemat połączeń nieustannie się zmienia. Tak samo jest również w sieci lokalnej sterowania ruchem kolejowym: pociągi przyjeżdżają i odjeżdżają ze stacji, jedne stoją na stacji krócej inne dłużej itp.

W celu niedopuszczenia wystąpienia sytuacji niebezpiecznej muszą istnieć narzędzia pozwalające sprawdzać, czy istnieją połączenia między poszczególnymi modułami lub czy dany moduł jest dobry lub uszkodzony. Do tego celu można wykorzystać programy diagnostyczne pozwalające określić czy dany moduł działa, czy też nie, jak również określić, w jaki sposób (jaką trasą) pakiet informacji dociera do danego modułu. Sieć tego typu powinna również zapewnić możliwość zlecenia wykonywania odpowiednich programów umożliwiających sterowanie różnego rodzaju urządzeniami w terenie.

## Literatura

1. Stevens W. R.: TCP/IP Tom 1: Protokoły, Oficyna wydawnicza READ ME, Warszawa, 1998.
2. Stevens W. R., Wright G.: TCP/IP Tom 2: Implementacje, Oficyna wydawnicza READ ME, Warszawa, 1998.
3. Comer D.: Sieci komputerowe. TCP/IP Zasady, protokoły i architektura. Cz.1, WNT, Warszawa, 1998
4. Prker T.: TCP/IP, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 1997.
5. Mikulski J., Zych K.: Model sieciowy układu torowego, ZN Pol. Śl., Transport 1994.



**Abstract**

This article treats an idea of decentralized railway traffic control system featuring modular structure and using a new technology to control the execution wayside devices based on programmable logic controllers. There is also presented an innovatory approach to the communication between individual modules based on widespread in use TCP/IP protocol.