

*Doc. dr hab. inż. Jan Werewka*  
*Katedra Automatyki*  
*Akademia Górniczo-Hutnicza*  
*Mgr inż. Andrzej Drwal*  
*Politechnika Krakowska*  
*Mgr inż. Sławomir Żaba*  
*Politechnika Krakowska*

## **PROTOKOŁY DOSTĘPU DO MEDIUM FIZYCZNEGO DLA WYBRANYCH SIECI PRZEMYSŁOWYCH**

### **Streszczenie:**

*W systemach sterowania i akwizycji danych stosowane są magistrale miejscowe (fieldbus), które zaspokajają różnorodne potrzeby stawiane przez projektantów systemów sterowania i akwizycji danych. Jednym z ważnych wymagań dotyczących tych systemów jest efektywność transmisji danych, czasy reakcji przy różnym obciążeniu sieci i determinizm odpowiedzi. Podane wymagania zależą w dużym stopniu od drugiej warstwy modelu OSI, to znaczy warstwy dostępu do medium fizycznego. W opracowaniu dokonano przeglądu podstawowych zasad dostępu do warstwy fizycznej. Następnie dokonano przeglądu rozwiązań czterech popularnych magistral miejscowych: PROFIBUS, CAN, LONWORKS, INTERBUS-S.*

### **Abstract:**

*In the control and acquisition systems the fieldbus networks are used, which fulfil different demands defined by distributed systems designers. One important demand for these system is efficiency of data transmission, short reaction time under different network loads and determinism. These demands depends on the second level of the OSI model. In the paper the different types of medium access mechanism are discussed. The solutions of media access protocols for 4 popular fieldbuses PROFIBUS, CAN, LONWORKS, INTERBUS-S are presented.*

### **1. ZAGADNIENIE WYBORU SYSTEMÓW SIECIOWYCH W APLIKACJACH WBUDOWANYCH.**

Wbudowane sieci czasu rzeczywistego wymagają wysokiej wydajności, deterministycznych opóźnień, niezawodności, elastycznej konfiguracji i małych kosztów przypadający na węzeł. Większość systemów wbudowanych wysyła co pewien okres krótkie wiadomości. Dlatego oczywistym rozwiązaniem optymalizacyjnym jest zmniejszenia dodatkowych bitów używanych do pakowania wiadomości. Jest to tym bardziej ważne, gdyż długość wiadomości może kilkakrotnie przewyższać długość użytecznych danych. Prawdopodobna jest sytuacja, że 8 bitów danych jest pakowanych do wiadomości o długości 32 czy nawet 64 bitów. Po zredukowaniu liczby bitów, na ile to jest możliwe, dla przesłanych wiadomości należy polepszyć efektywność protokołu komunikacyjnego. W protokole tym istotną rolę spełnia protokół dostępu do medium fizycznego (MAC - Media Access Protocol) będący arbitrem rozstrzygającym, które z urządzeń transmitujących będzie miało dostęp do medium sieciowego.

W przypadku protokołu dostępu ważną rolę odgrywa minimalizacja pasma przenoszenia wykorzystywanego przez arbitraż (np. przekazywanie znacznika lub rozwiązanie konfliktu w wyniku kolizji dostępu). W systemach wbudowanych istotna jest sytuacja najgorszego przypadku, dlatego efektywność protokołu powinna być badana dla sytuacji słabego i silnego obciążenia. Dla przykładu, protokół CSMA/CD często używany przez stacje robocze LAN jest wysoce efektywny dla słabego obciążenia sieci, ale jest mało efektywny przy dużym obciążeniu. Protokół Token Bus ma odwrotne własności.

Dla wielu systemów wbudowanych ważnym zagadnieniem jest spełnienie ograniczeń czasu rzeczywistego, określanych jako determinizm czasu odpowiedzi. Determinizm taki mówi czy istnieje możliwość określenia czasu odpowiedzi dla najgorszego przypadku. Aby polepszyć warunki determinizmu stosowane są mechanizmy nadawania priorytetów dla zadań krytycznych czasowo, jak obsługa wyjątków lub sterowanie w pętli o dużej szybkości. Priorytety są nadawane dla węzła lub typu wiadomości. Dodatkowo protokoły mogą wspomagać lokalne lub globalne mechanizmy priorytetów. W mechanizmie lokalnego nadawania priorytetu, każdy z węzłów otrzymuje pewien przedział czasu, w którym może wysyłać wiadomości o wysokim priorytecie. W tym czasie wysokopriorytetowe wiadomości z innych węzłów mogą czekać na swoją kolejkę. Przy mechanizmie z globalnymi priorytetami, najpierw przesyłana jest wiadomość o największym priorytecie w całym systemie. Mechanizm taki jest szczególnie pożądany dla aplikacji krytycznych ze względu na bezpieczeństwo działania systemu.

Wiele aplikacji wymaga dużej niezawodności w trudnych warunkach. Protokół nazwiemy niezawodnym (robust), jeżeli może on szybko wykryć błędy i naprawić się w wyniku zaistnienia błędów (np. podwójny lub utracony znacznik), dodać węzły i likwidować węzły. W niektórych systemach bardzo ważnym jest szybkie przywrócenie zwykłego stanu pracy po zresetowaniu, wyłączeniu lub chwilowym braku zasilania.

W systemach sterowania i akwizycji danych może wystąpić potrzeba stosowania elastycznego protokołu dostępu, umożliwiającego operowanie na różnych typach medium fizycznego oraz na różnych topologiach sieciowych. Dla przykładu część systemu może wymagać kosztownej sieci światłowodowej ze względu na zakłócenia elektryczne, natomiast dla pozostałej części wystarczy zwykła skrętka. Topologia magistrali może być optymalna dla skrętki, natomiast dla światłowodów może być lepszym rozwiązaniem topologia gwiazdy lub pierścienia.

Następnym ważnym zagadnieniem do rozwiązania jest koszt w przeliczeniu na węzeł. Prostsze protokoły mają mniejsze wymagania sprzętowe i oprogramowania i są zwykle tańsze. Jest to szczególnie ważne dla aplikacji czułych na koszty i przy dużej liczbie węzłów. Dla aplikacji, dla których przewiduje się rozbudowa sieci, lepszymi rozwiązaniami mogą być bardziej zaawansowane protokoły, nie mające dużych ograniczeń dotyczących rozbudowy sieci.

## 2. PRZEGLĄD RODZAJÓW PROTOKOŁÓW KOMUNIKACYJNYCH.

W systemach sieciowych wbudowanych istnieje wiele rozwiązań sieciowych. W opracowaniu [2] podano klasyfikację, którą przyjęto za punkt wyjściowy do dyskusji nad protokołami dostępu do warstwy fizycznej.

### 2.1. Protokoły zorientowane na połączenia (connection oriented protocols).

Protokoły te wspomagają tylko dwa węzły dla ośrodka transmitującego. Zwykle połączone są one przez modem dla umożliwienia transmisji. Najczęstszym przykładem takiego rozwiązania jest transmisja po łączy szeregowym RS232. Protokoły te są deterministyczne dla bezpośrednio połączonych węzłów. Dla węzłów połączonych pośrednio, opóźnienie w transmisji danych może być wysokie, ze względu na konieczność retransmisji przez węzeł

pośredniczący. Dla systemów wbudowanych z niedużymi wymaganiami komunikacyjnymi oraz o stałej topologii połączeń, takie rozwiązanie należy do najtańszych. Rozwiązania takie jest także szeroko stosowane dla systemów o niewielkiej liczbie węzłów, ze względu na niskie koszty takiego rozwiązania. Zagadnienia transmisji szeregowej w systemach produkcyjnych przedstawiono przykładowo w [3].

## 2.2. Metoda odpytań (polling).

Metoda odpytań jest popularna w systemach wbudowanych, ze względu na determinizm i prostotę. W tej metodzie wydzielona jest stacja master periodycznie odpytująca stacje slave poprzez wysyłanie odpowiednich wiadomości, przekazując im w ten sposób zgodę na transmisję w sieci.

Większość oprogramowania protokołu jest przechowywana w stacji master, a praca związana z komunikacją ze stacją slave jest minimalna. Protokół ten jest idealny w przypadku centralnej akwizycji danych, dla których nie jest wymagana komunikacja typu peer-to-peer i nie są stosowane globalne priorytety. Wadą tego rozwiązania jest to, że wystąpienie błędu w węźle master powoduje przerwanie komunikacji, natomiast użycie drugiej stacji typu master jest często niedopuszczalne lub kosztowne. Metoda odpytań zajmuje sporą część pasma transmisyjnego i wykazuje się słabą efektywnością. Niektóre warianty rozwiązań tego protokołu umożliwiają transmisję danych pomiędzy stacjami slave poprzez stację master. Niezawodność systemu zwiększa się poprzez użycie większej liczby węzłów master. Odmiana tej metody jest stosowana przez sieć PROFIBUS.

## 2.3. Time Division Multiple Access (TDMA).

W tym protokole, stacja master przesyła w sieci sygnał synchronizacyjny ramki, dla synchronizacji zegarów w węzłach. Po tym sygnale, każdy z węzłów dokonuje transmisji przez jednoznacznie wyznaczony odcinek czasu. Wydajność metody jest zbliżona do metody odpytań, ale cechuje się lepszą efektywnością przy większych obciążeniach, wskutek braku wiadomości odpytujących. Koszty stacji slave w metodzie TDMA są większe niż w metodzie odpytań, ponieważ każdy z węzłów typu slave musi mieć stabilną podstawę czasu dla wyznaczania przedziału czasu, w którym może transmitować. Dodatkową słabością tej metody jest stała długość wiadomości.

## 2.4. Token Ring.

W sieci Token-Ring węzły są połączone w pierścieni stosując łącza punkt-do-punktu. Specjalny sygnał znacznika jest przekazywany od węzła do węzła (token passing) wzdłuż pierścienia. Jeżeli węzeł ma coś do wysłania, to zatrzymuje znacznik, przesyła wiadomość poprzez pierścieni, a następnie oddaje znacznik. Protokół ten jest deterministyczny, gdyż czas oczekiwania znacznika dla najgorszego przypadku może zostać łatwo wyliczony. Protokół jest efektywny przy dużym obciążeniu, gdyż wydatek czasu na przesłanie pustego znacznika jest zminimalizowany. Zwykle implementacja protokołu polega na opóźnieniu o 1 bit w każdym węźle tak, że znacznik może odwiedzić wszystkie węzły w  $N+T$  jednostkach czasu przeznaczonych na transmisję 1 bitu.  $N$  jest liczbą stacji w sieci, a  $T$  jest długością (liczbą bitów) wiadomości. Priorytet globalny jest ustalany poprzez zmianę pola priorytetu w znaczniku. Pole to oznacza, że tylko węzły o wyższym priorytecie niż to podano w polu priorytetu mogą przesyłać dane. Inicjalizacja wiadomości znacznika, wykrycie przypadkowo zduplikowanego lub utraconego znacznika wpływa na złożoność i koszt protokołu. Jednym z większych problemów w tej metodzie jest możliwość przerwy w okablowaniu lub awaria

jednego z węzłów, powodujące zanik komunikacji w sieci. Rozwiązaniem tego problemu jest sprzętowe omijanie węzłów lub dodatkowy pierścień, co jednak powoduje wzrost kosztów. Sieć pierścieniowa jest typu punkt-do-punktu, a zatem dobrze nadaje się do rozwiązań światłowodowych. Przykładami sieci pierścieniowych są INTERBUS-S, Sercos.

## 2.5. Token Bus.

Działanie Token Bus przypomina Token Ring, ale znacznik jest przekazywany z węzła do węzła poprzez pierścień wirtualny. Węzły posiadające znacznik mają dostęp do sieci. Token Bus wydajnie pracuje przy dużych obciążeniach sieci, z dużym stopniem determinizmu. Token Bus przesyła wiadomość do wszystkich węzłów, a nie bit po bicie, jak to było w Token Ring. Minimalny czas obiegu znacznika wynosi teraz  $N \cdot T$ , a nie  $N+T$  jak to było dla Token Ring (nie występuje równoległość w połączeniach). Zasada globalnego priorytetu dla wiadomości jest niepraktyczna. W odróżnieniu od Token Ring przerwa w okablowaniu lub awaria jednego z węzłów nie musi unieruchomić całej sieci. W przypadku dodawania lub usuwania węzła stosowana jest długa procedura rekonfiguracyjna, polegająca na identyfikacji przez każdy węzeł swoich sąsiadów. Ponieważ topologie magistralowe dobrze pasują dla zakładów produkcyjnych, dlatego metoda ta jest stosowana przez MAP (Manufacturing Automation Protocol), a także została zaadoptowana przez ARCnet (Attached Resource Computer Network).

## 2.6. Binarne Porównanie (Binary Countdown).

W metodzie binarnego porównania zwanego bitową dominacją (bit dominance), wszystkie stacje czekają na wolny kanał transmisyjny, zanim rozpoczną transmisję. Konkurujące węzły rozpoczynają transmisję równocześnie. Rozwiązanie konfliktu odbywa się w początkowej fazie wiadomości, poprzez transmisję sygnałów bazujących na jednoznacznej identyfikacji wartości węzłów. Medium transmisyjne musi mieć tą własność, że sygnał o wartości np. 1 może być zapisany na sygnale np. 0. Oznacza to, że jeżeli jeden węzeł zapisuje wartość 1, a drugi zapisuje wartość 0, to na magistrali pojawi się wartość 1. Powoduje to, że sygnał 1 jest dominujący nad sygnałem 0. Własność ta jest wykorzystana do rozwiązania konfliktu pomiędzy węzłami ubiegającymi się o transmisję. Jeżeli każdy z węzłów otrzyma jednoznaczny identyfikator w postaci numeru, to można to wykorzystać do rozwiązywania kolizji, przy czym węzeł o największym numerze (priorytecie) wygra w ubieganiu się o transmisję.

Globalny priorytet osiąga się raczej poprzez arbitraż identyfikatora wiadomości, niż arbitraż numerów węzłów. Ponieważ arbitraż jest częścią wiadomości, metoda ta posiada dobrą przepustowość i efektywność. Ze względu na to, że wszystkie wiadomości posiadają różny priorytet, nie istnieje łatwe rozwiązanie umożliwiające równouprawniony dostęp węzłów przy silnym obciążeniu. Również niektóre techniki transmisji w warstwie fizycznej nie są zgodne z wymaganiami dominacji bitowej. Na bazie tego protokołu opracowany został przez Bosch'a protokół CAN, który znalazł zastosowanie min. w pojazdach samochodowych.

## 2.7. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD).

Protokół ten jest najbardziej rozpowszechniony w sieciach lokalnych i posiada wiele odmian. W tej metodzie stacja, która chce transmitować czeka do momentu, gdy sieć jest wolna. W tym momencie rozpoczyna transmisję. Może się jednak zdarzyć, że więcej stacji rozpocznie transmisję. Powoduje to wystąpienie kolizji, którą muszą wykryć wszystkie nadające stacje. Każde ze stacji ponawia próbę transmisji po wyznaczanym losowo przedziale czasu. Metoda CSMA/CD umożliwia węzłom włączanie się do sieci i jej opuszczanie bez potrzeby inicjalizacji

i konfiguracji systemu. Przy słabym obciążeniu sieci, dodatkowy wydatek czasowy na protokół jest bardzo niski. Dla dużego obciążenia opóźnienie czasowe nie jest ograniczone, w wyniku dużego prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji. Z tego powodu protokół ten cechuje się słabym determinizmem i małą efektywnością. Popularny protokół Ethernet stosowany w sieciach LAN bazuje na tym protokole.

## 2.8. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA).

W wyniku połączenia protokołu CSMA/CD z protokołem bazującym na przesyłaniu znacznika otrzymano protokół CSMA/CA. Tak jak w metodzie CSMA/CD stacje nadają po wykryciu wolnego kanału. Jednakże w przypadku kolizji, wysyłany jest sygnał kolizji informujący wszystkie węzły o wystąpieniu rywalizacji (contention). Sygnał ten powoduje rozpoczęcie synchronizacji zegarów i wystąpienie odcinków czasu rywalizacji (contention time slots). Każdej stacji przydzielany jest taki odcinek. Długość tego odcinka równa jest czasowi propagacji sygnału przez sieć. Każda ze stacji może rozpocząć transmisję w przydzielonym jej odcinku czasu.

Dodatkowo w metodzie CSMA/CA mogą wystąpić priorytetowe odcinki czasu (priority slots), które będą poprzedzać odcinki rywalizacji. Odcinki czasowe zapewniają globalny priorytet dla wiadomości o wysokim priorytecie.

Istnieją dwa warianty rozwiązań protokołu CSMA/CA, zależne od liczby dostępnych odcinków czasowych:

- liczba odcinków czasowych rywalizacji równa jest liczbie stacji. Taki protokół nazywany jest protokołem RCSMA (Reservation CSMA) czyli protokołem CSMA z rezerwacją. Protokół RCSMA jest efektywny dla różnego obciążenia sieci. Protokół taki nie jest praktyczny dla sieci z dużą ilością węzłów.
- liczba odcinków czasowych rywalizacji jest mniejsza niż liczba stacji w sieci. Odcinki rywalizacji są przydzielane w sposób losowy dla zminimalizowania kolizji. Rozwiązanie to jest stosowane w LONWORKS, przy czym liczba odcinków rywalizacji jest zmienna i zależna od spodziewanego obciążenia sieci.

W odróżnieniu od protokołu CSMA/CD nie musi wystąpić sprzęg wykrywający kolizję. Może to być zrealizowane przez wysyłanie pustych wiadomości, w chwilach gdy sieć nie jest obciążona.

## 3. PROFIBUS - PROCESS FIELD BUS.

Protokół PROFIBUS (Process Field Bus) [5, 6, 7] został opracowany w Niemczech. W roku 1991 została dla niego opracowana norma międzynarodowa. PROFIBUS bazuje na magistrali, w której stacje master tworzą pierścień logiczny i zarządzają prawem wysłania za pomocą metody token-passing. Protokół PROFIBUS zezwala na rozmiar sieci do 4800 metrów, a maksymalna liczba stacji równa jest 126.

Występują trzy warianty sieci PROFIBUS stosowane dla różnych obszarów zastosowań [Tab. 1]:

- *PROFIBUS-FMS (Fieldbus Message Specification)*. Formalnie wariant ten służy do realizacji obszernych zadań komunikacji z synchronicznym i asynchronicznym transferem danych średniej szybkości. Poprzez swoje usługi PROFIBUS-FMS jest funkcjonalny i elastyczny. PROFIBUS-FMS jest dostępny od roku 1990 jako standard DIN 19 245 część 1.
- *PROFIBUS-DP (Decentralized Peripherals)*. Jest to wersja otrzymana poprzez zoptymalizowanie protokołu PROFIBUS-FMS i jest zdedykowana dla komunikacji

ograniczonej czasowo pomiędzy systemami automatyki. PROFIBUS-DP bazuje na normie DIN 19245 część 1 i 3.

- **PROFIBUS-PA (Process Automation).** PROFIBUS-PA jest wersją PROFIBUS do użytku w procesach automatyki, oferuje usługi transmisyjne wyspecyfikowane w IEC 1158-2 zapewniając bezpieczną transmisję danych i zasilanie urządzeń w środowiskach zagrożonych wybuchami. PROFIBUS-DP bazuje na normie DIN 19245 część 4.

Tab. 1. Warianty sieci PROFIBUS

Typ	Obszar zastosowań	Liczba urządzeń	Medium fizyczne	Prędkość
PROFIBUS - FMS	Automatyzacja ogólna	32/126	RS485, światłowodowy, podczerwień	0.5- 1.5Mbps
PROFIBUS - DP	Optymalna dla aplikacji krytycznych względem czasu	32/126	Tak jak FMS	1.5- 12Mbps
PROFIBUS - PA	Sterowanie procesem: iskrobezpieczna	10	Wewnętrznie bezpieczna	31Kbps

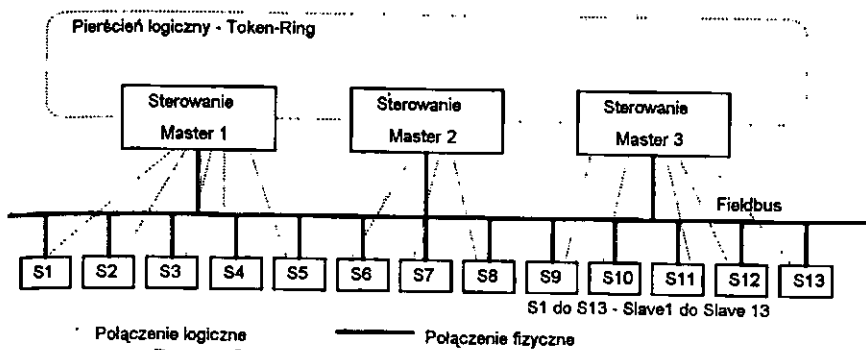
W protokole PROFIBUS do magistrali sieciowej mają dostęp stacje master i slave. Protokół dostępu do medium fizycznego stosuje metodę odpytań (master-slave) dla komunikacji między stacją master a stacjami slave oraz token bus dla komunikacji pomiędzy stacjami master. Możliwe są następujące implementacje:

- czysty system odpytań (master-slave)
- czysty system master-master (token passing)
- system będący kombinacją dwóch metod

PROFIBUS bazuje na rozproszonym dostępie do medium, który jest realizowany przez krążący w logicznym pierścieniu znacznik (token). Jeżeli stacja master posiada znacznik, to wylicza ona różnicę pomiędzy wymaganym czasem obiegu znacznika i rzeczywistym czasem ostatniego obiegu. W czasie zatrzymania znacznika stacja master może mieć dostęp do medium i może komunikować się z innymi stacjami master lub slave. Stacje slave mogą wysyłać dane tylko na żądanie stacji typu master. W obrębie czasu zatrzymania znacznika wyróżniamy 3 cykle:

- wysokopriorytetowy,
- odpytań,
- niskopriorytetowy.

Wiadomość o wysokim priorytecie może zostać wysłana zawsze, nawet, gdy znacznik ma być natychmiast zwrócony. Tak długo, jak tylko istnieją wysokopriorytetowe wiadomości i istnieje rezerwa czasu zatrzymania znacznika, będą wysyłane wiadomości. Dopiero, gdy wszystkie wiadomości wysokopriorytetowe zostały przetworzone i nadal istnieje rezerwa czasu zatrzymania znacznika, rozpoczyna się przetwarzanie tablicy odpytań (polling table). Jeżeli obróbka tej tabeli zostanie przerwana ze względu na upływanie czasu zatrzymania znacznika, to przetwarzanie będzie kontynuowane od miejsca przerwania obsługi przy następnym otrzymaniu znacznika. Oczywiście najpierw obsłużone zostaną wiadomości o wyższym priorytecie. Jeżeli po obsłużeniu wiadomości o danym priorytecie nadal przez pewien czas jest dostępny znacznik, to będą obsłużone wiadomości z niższym priorytetem. Po obsłużeniu tych wiadomości znacznik jest natychmiast zwracany przez stację.



Rys. 1. Struktura przykładowej konfiguracji PROFIBUS

Na rys. 1 przedstawiono topologię sieci o rozproszonym sterowaniu. Stacje master tej sieci tworzą logiczny pierścień. Elementy typu slave odpowiadają tylko na zapytania elementów typu master. Dla magistrali PROFIBUS powiązania pomiędzy stacjami muszą być ustalone już w fazie projektowania. Dla każdej stacji tworzona jest lista powiązań komunikacyjnych, która zawiera wszystkie możliwe połączenia z uczestnikami. Dynamiczne rozszerzenie tej listy w trakcie realizacji programu nie jest możliwe.

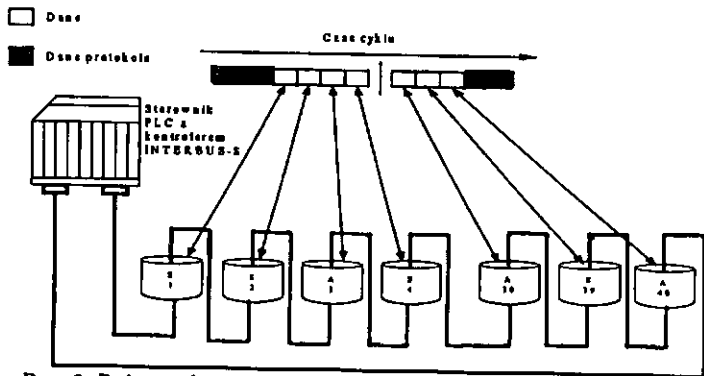
W PROFIBUS możliwe jest przesyłanie wiadomości bez ustalenia połączeń. W tym przypadku wiadomości przesyłane są do kilku lub wszystkich stacji (Multicast-Broadcast) lub też połączenia są ustalone pomiędzy dwoma stacjami. Usługi, które wymagają potwierdzenia, będą realizowane poprzez połączenia ustalone pomiędzy dwoma stacjami. Każde połączenie jest najpierw utworzone i dostępne będzie do momentu jego zlikwidowania.

Komunikacja pomiędzy stacjami typu master realizowana jest acyklicznie. Jeżeli jednak obsługa ma być realizowana cyklicznie, wtedy jedna ze stacji typu master musi emulować stacje typu slave. Połączenia typu master-slave mogą być cykliczne, jeżeli master kolejno odpytuje wartości pomiarowe, lub acykliczne, jeżeli wymiana informacji występuje rzadko. Cykliczne odpytywanie stacji typu slave jest inicjowane przez warstwę FMS wraz z procesem aplikacyjnym, a rozłączanie realizowane jest przez sprzęg z niskim poziomem LLI (Low Level Interface). W tym celu odwzorowany jest specjalny obszar pamięci, w którym LLI dla każdego okresu zapytań zapisuje odpowiednią wartość. Za utrzymanie zwartości tego obszaru odpowiedzialna jest warstwa FMS i użytkownik.

Wymagania czasu rzeczywistego są realizowane poprzez prawidłowy dobór czasu obiegu znacznika i przez sterowany zakres opóźnienia krytycznego (alarmu). Liczba stacji typu master jest krytycznym parametrem dla tego typu magistrali.

#### 4. INTERBUS-S

INTERBUS-S [8] jest magistralą sieciową opartą o topologię pierścieniową. Architektura INTERBUS-S obejmuje płytę kontrolera instalowanego w komputerze (typu PC, VME) lub w sterowniku PLC oraz urządzeń WE/WY dołączanych do magistrali poprzez odpowiednie moduły.



Rys. 2. Połączenie w sieci INTERBUS-S zadajników i czujników.

Na rys. 2 przedstawiono przykład sieci INTERBUS-S. Głównym elementem systemu jest kontroler umieszczony w komputerze głównym. Urządzenia peryferyjne dołączane są poprzez końcówki WE/WY.

Protokół INTERBUS-S ma strukturę zależną od sprzętu i bazuje na idei przesuwania danych. Moduły WE/WY są połączone razem w sposób podobny do łańcucha rejestrów przesuwanych. Najważniejszymi komponentami sieci są dwa układy tzw. protocol chips. Układ INTERBUS-S Protocol Master (IPMS) steruje siecią, a układ Serial Microprocessor Interface (SuPI) przyłącza urządzenia WE/WY do sieci.

Struktura pierścieniowa ma dwie niewątpliwe zalety. Po pierwsze, w przeciwieństwie do struktury magistralowej, topologia ta pozwala na jednoczesne przesyłanie i odbiór danych (full duplex). Po drugie, system zdalnej diagnostyki jest znacznie doskonalszy. W przypadku systemu magistralowego wszystkie przyłączone do linii urządzenia są quasi-pasywne. Zaletą tego jest to, że w przypadku awarii urządzenia pozostała część sieci działa normalnie. Wadą takiego rozwiązania jest fakt, że miejsca zwarcia, uszkodzeń linii są niemożliwe do zdalnego wykrycia. W przypadku topologii pierścienia wszystkie urządzenia muszą być aktywne, a cała sieć powinna być podzielona na elektrycznie niezależne segmenty.

INTERBUS-S używa procedur typu master/slave, w których układ master jest pomostem do układu nadrzędnego w systemie (sterownik PLC, komputer PC, itp.). INTERBUS-S pracuje w topologii pierścienia czyli wszystkie urządzenia tworzą zamkniętą pętlę sygnałową. Dołączanie podsystemów, za pomocą modułów zwanych BK module, dokonywane jest przez wpięcie w główną pętlę. Charakterystyczną cechą systemu INTERBUS-S w odróżnieniu od innych systemów opartych o topologię pierścienia jest fakt, że dane wejściowe i wyjściowe są prowadzone jednym kablem, który biegnie przez wszystkie urządzenia przyłączone do sieci. Podczas każdego cyklu roboczego (scan cycle) ciąg danych jest stale przesuwany w sieci. Dane zawierające informacje wyjściowe wchodzi do układu SuPI, gdzie są dostarczane do odpowiednich układów wykonawczych. Taki sam ciąg danych zawierający dane wejściowe opuszczając układ SuPI jest dostarczany do układu kontrolera INTERBUS-S (układ IPMS). Należy zauważyć, że ciąg danych zawiera zarówno dane wejściowe jak i wyjściowe. Dodatkowe właściwości protokołu umożliwiają aktualizację wejść i wyjść w tym samym czasie.

Płyta kontrolera ustala adresy komponentów poprzez wykonanie cyklu identyfikacyjnego (ID cycle) podczas inicjalizacji sieci. Cykl ID dostarcza kontrolerowi informacji o typie i pozycji modułów WE/WY na magistrali. Cykl ID jest inicjowany przez komputer sterujący (host controller) przed normalną pracą magistrali. Zarówno podczas inicjalizacji jak i podczas operacji sieciowych, układ IPMS wysyła jednocześnie telegramy z wiadomością (informacją)



sterująca) do wszystkich układów SuPI w sieci. Aby układy SuPI mogły odebrać tą wiadomość jednocześnie, musi ona być przesłana z pominięciem rejestrów przesuwanych. INTERBUS-S ma architekturę pełnej ramki (one-Total-Frame-Protocol) polegającą na przesyłaniu danych wejściowych i wyjściowych w jednej ramce. Wszystkie dane w sieci są przesyłane tylko w postaci sformalizowanych ramek informacyjnych. W sieci INTERBUS-S do transmisji używamy dwóch typów ramek: dla cyklu scan oraz cyklu ID. Transmisja ramek rozpoczyna się od kontrolnego słowa loop-back. To słowo jest używane zarazem jako identyfikator końca ramki. Wszystkie dane w sieci następują po słowie loop-back. Ostatnimi słowami w ramce są: słowo CRC oraz słowo kontrolne. Słowo kontrolne zawiera 16 bitów danych, w których poszczególne urządzenia przesyłają zwrótnie potwierdzenie do kontrolera sieci o bezbłędne transmisji. Słowa: loop-back, CRC, i kontrolne są transmitowane przez specjalną asynchroniczną procedurę i posiadają dodatkowo bity startu i stopu.

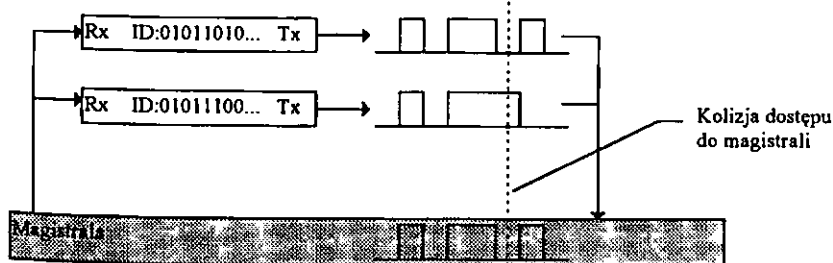
## 5. CAN - CONTROLLER AREA NETWORK.

Sieć CAN [10] (Controller Area Network) jest szeregową magistralą komunikacyjną, która została zaprojektowana w 1981 przez firmy: Bosch, Intel. Sieć CAN znalazła szerokie zastosowanie w samochodach (Mercedes, BMW) i w różnego typu urządzeniach gospodarstwa domowego (Bosch).

Metoda dostępu dla sieci CAN polega na dominacji bitowej, zbliżonej do CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance). W metodzie CSMA/CA w przypadku wystąpienia kolizji, jeden z ubiegających się o dostęp użytkowników uzyskuje dostęp do sieci. W sieci CAN użytkownik mający najwyższy priorytet, spośród ubiegających się, może realizować transmisję. Przyjęto, że najniższy numer wiadomości jest najwyższym priorytetem. Zatem identyfikator składający się całkowicie z zer ma najwyższy priorytet.

Aby zrealizować tą metodę dostępu, muszą być spełnione następujące warunki:

- Wszyscy użytkownicy pracują według zasady 'nadsłuchuj podczas mówienia' (listen while talk). To znaczy, użytkownicy ciągle nadsłuchują co znajduje się na linii transmisyjnej, nawet wtedy, gdy sami nic nie wysyłają.
- Jeżeli więcej użytkowników równocześnie nadaje do linii transmisyjnej, to na tej linii będzie logiczne 0, gdy przynajmniej jeden z użytkowników zapisuje 0.
- Każdy z uczestników musi mieć własny numer identyfikacyjny ID. Numer ten jest równocześnie priorytetem. Im mniejsza wartość ID tym większy priorytet.



Rys. 3. Zasada dostępu do magistrali

Zasadę dostępu do magistrali ilustruje rys. 3. Jeżeli magistrala jest wolna, to każda ze stacji może żądać dostępu do magistrali poprzez wysłanie bitu startu. Po tym bicie stacja rozpoczyna zapisywać na magistrali swój identyfikator (a tym samym priorytet). Pozostałe stacje synchronizują się do bitu startu. Jeżeli inna stacja chce uzyskać dostęp do magistrali, to rozpoczyna wysyłać swój identyfikator synchronicznie do pierwszego uczestnika na magistrali. Jeżeli przy wysyłaniu bitu 0

wartości 1, stacja odczyta wartość równą 0, to oznacza, że stacja przegrała w ubieganiu się o dostęp do magistrali. W tym przypadku, stacja przegrała konkurencję i wycofuje się z dostępu do magistrali. Stacja ta czeka na zakończenie transmisji sygnalizowane przez bajt EOF (End Of Frame). Po tym może ponownie ponowić żądanie dostępu do magistrali. Mamy tutaj do czynienia z arbitrazem, który nie jest destrukcyjny.

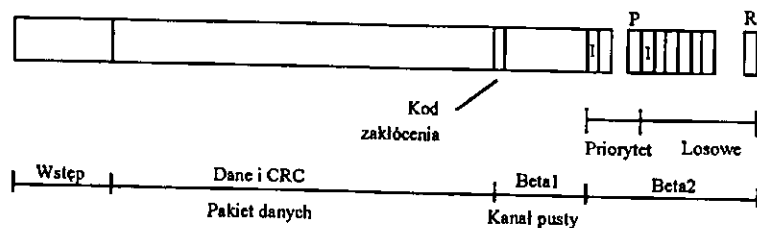
## 6. LONWORKS - LOCAL OPERATING NETWORK

W założonej w roku 1986 firma Echelon opracowano koncepcję sieci miejscowej o nazwie LON (Local Operating Network). W roku 1990 Motorola i Toshiba postanowiły licencjować tą technologię, i zdecydowały się na wyprodukowanie układu mikroprocesorowego wspomagającego tą technologię, układ ten nosi nazwę Neuron Chip. Technika sieciowa LON jest nazywana przez firmę Echelon jako LONWORKS [9]. Aktualnie jest to jedyna koncepcja magistrali miejscowej która oferuje wszystkie 7 warstw modelu odniesienia OSI. Technologia LONWORKS jest platformą dla implementacji sieci sterujących. Zawiera ona elementy wymagane do projektowania, używania i utrzymywania sieci:

- Neuron Chip MC143150 lub MC143120,
- protokół LonTalk. Dostęp do medium transmisyjnego realizowany jest metodą CSMA z opcjonalnym CD. Węzły mogą być tak skonfigurowane, by była możliwość transmisji wiadomości z priorytetem: poprzez rezerwację pasma tylko dla tych wiadomości. Zapewnia to, że wiadomość o najwyższym priorytecie ma przewidywalny czas odpowiedzi i nie występują kolizje podczas cyklu priorytetowego pakietu.
- nadajniki i odbiorniki,
- oprogramowanie narzędziowe LonBuilder i NodeBuilder.

Przed rozpoczęciem transmisji następuje inicjalizacja danych. Nadajnik wysyła bity synchronizacji (wstęp) pozwalając innym węzłom zsynchronizować zegary. Liczba bitów synchronizacji wynosi minimum 6 (czas trwania minimum 125[ $\mu$ s]). Po wysłaniu ostatniego bitu CRC wyjście stacji utrzymywane jest w stanie gotowości transmisji jeszcze przez czas odpowiadający 2 do 1/2 okresu bitu. Przejście w stan niski wyjścia stacji oznacza koniec transmisji. Czas potrzebny na sformatowanie (przygotowanie) i rozpoczęcie transmisji dla układu NEURON-CHIP zawiera się w granicach 2.8 - 44.8 [ms]. Zależy on od częstotliwości zegara (10 [MHz] - 625[kHz]).

Gdy wejście stacji do wykrywania kolizji jest aktywne i przyjmie poziom „0” na czas równy przynajmniej jednemu okresowi zegara (200[ns] - odpowiada częstotliwości zegara 10[MHz]) podczas transmisji, wtedy NEURON CHIP sygnalizuje kolizję i wiadomość musi być ponownie przesłana. Strukturę pakietu przesyłanego w sieci przedstawia rys. 4. Pakiet Beta 1 jest przebiegiem pustym i trwa typowo 370[ $\mu$ s] dla prędkości przesyłu 1.25[Mbps] i 12 bajtowych pakietów danych.



Rys. 4. Pakiet czasowy magistrali LONWORKS.

Pakiet Beta 2 jest wykorzystywany do ustalania priorytetu wiadomości. Jeśli zdarzy się, że jakies dwa węzły próbują jednocześnie rozpocząć transmisję to wystąpi kolizja. Obydwa węzły

przerywają więc transmisję i w sposób losowy ustalają czas trwania odcinka Beta2. W ten sposób prawdopodobieństwo ponownego jednoczesnego rozpoczęcia transmisji maleje. Protokół LonTalk oferuje opcjonalnie mechanizm priorytetu służący do polepszenia czasu odpowiedzi dla szczególnie ważnych pakietów danych. Protokół pozwala użytkownikowi rozmieścić w kanale transmisyjnym szczeliny czasu, dedykowane wyróżnionym węzłom.

## 7. WNIOSKI

W wyniku dokonanego przeglądu można stwierdzić, że protokoły dostępu do medium fizycznego popularnych magistral miejscowych stosują różne rozwiązania. Wewnątrz jednego typu sieci mogą być stosowane różne metody dostępu. W sieci PROFIBUS podstawową techniką dostępu jest technika odpytywań - wyróżnia się stacje master i slave. Możliwe jest stosowanie kilku stacji master, wówczas pomiędzy tymi stacjami stosowane jest rozwiązanie typu token bus. Sieć ta dopuszcza również rozwiązanie łączące obydwie metody. INTERBUS-S bazuje na magistrali pierścieniowej. W magistrali tej wyróżniona jest stacja master, która steruje przepływem danych. Ponieważ w sieci INTERBUS-S stosowana jest metoda pełnej ramki, to rozwiązanie to jest zbliżone do metody TDMA. W sieci CAN stosowana jest metoda dominacji bitowej w rozstrzygnięciu kolizji. Protokół ten ma właściwości protokołu CSMA/CA. W technice LONWORKS stosowana jest metoda CSMA/CA.

Jednym z kryteriów wyboru systemów sieciowych jest szybkość transmisji, zachowanie się sieci przy różnym obciążeniu oraz determinizm odpowiedzi. Przy takim kryterium nasuwają się następujące uwagi [2].

- Metody odpytań, TDMA, zorientowane na połączenia są proste, ale mogą być zbyt mało elastyczne dla zaawansowanych systemów.
- Protokoły bazujące na przekazywaniu znacznika są przewidywalne, lecz mogą mieć wysoki wydatek i wymagać złożonego oprogramowania dla zapewnienia niezawodności.
- Protokoły dominacji bitowej, zakładają charakterystykę dominacji bitowej warstwy fizycznej.
- CSMA/CD są niedobrym wyborem dla systemów czasu rzeczywistego o ostrych ograniczeniach z dużym obciążeniem sieci.
- Dla systemów wbudowanych dobrym rozwiązaniem może być protokół CSMA/CA, a w szczególności Reservation CSMA.

Istnienie wielu rozwiązań sieciowych nie jest wygodne dla użytkowników. Czynione są próby standaryzacji rozwiązań sieciowych w systemach wbudowanych. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) ratyfikował europejski standard magistral miejscowych (EN 50170), w którym uznano jako standardy europejskie magistrale miejscowe: WorldFIP, PROFIBUS i P-Net. PROFIBUS FMS i DP zostały dołączone do standardu bez zmian, natomiast PROFIBUS-PA nie został uznany jako standard, ale może jeszcze nim zostać w późniejszym okresie po spełnieniu określonych warunków. Aby sieć miejscowa była standardem, musi być uznany standardem narodowym oraz posiadać kompletną specyfikację poziomów 1, 2 i 7. Dodatkowo wymagane jest zdefiniowanie usług sieciowych.

Dokonywane są próby standaryzacji magistral miejscowych:

- IEC/ISA SP50 rozwijany przez ISA (Instrument Society of America) i IEC (International Electrotechnical Foundation).
- Standardy WorldFIP (Factory Instrumentation Protocol) promowane przez firmy Honeywell, Bailey oraz ISP (Interoperable System Project) promowane przez Fisher-Rosemount, Siemens i Yokogawa.

Obydwa standardy połączono w 1994 w Fieldbus Foundation. Komitet SP50 skoncentrował się na czterech poziomach OSI magistral miejscowych [1]:

- Poziom fizyczny, definiuje media po których realizowana jest transmisja.
- Poziom łącza danych: nadzoruje komunikację pomiędzy różnymi urządzeniami i wykrywa błędy.
- Poziom aplikacji: Przetwarza dane do formatu wiadomości rozpoznawanego przez inne urządzenia i dostarcza usług do kontroli procesu.
- Poziom użytkownika: Łączy poszczególne obszary systemu produkcyjnego i dostarcza otoczenia dla aplikacji.

Przy doborze sieci do transmisji danych w systemach sterowania i akwizycji danych należy brać pod uwagę wiele czynników. Jednym z takich czynników są metody dostępu do warstwy fizycznej sieci. Dokładniejszy opis różnych rozwiązań sieciowych oraz przegląd literaturowy zawarto w opracowaniu [4].

## LITERATURA

- [1]Caro R. H.: S50 fieldbus standard advancing
- [2]Upender B. P., Koopman P. J. Jr.: *Communication Protocols for Embedded Systems. Embedded Systems Programming.*
- [3]Werewka J. *Programowanie sprzętu komputerowego dla automatyków.* Skrypt AGH, Kraków 1997.
- [4]Werewka J. (red.): *Sieci przemysłowe w rozproszonych komputerowych systemach sterowania i akwizycji danych.* Katedra Automatyki AGH, Kraków 1997. (opracowanie przeznaczone do opublikowania)
- [5]Klehmert U., Ettl M., Goetz P.: *Leistungsbewertung der Feldbus-Protokolle PROFIBUS und FIP (Teil 1).* atp-Automatisierungstechnische Praxis, 1993, nr 6, pp. 355-360
- [6]Klehmert U., Ettl M., Goetz P.: *Leistungsbewertung der Feldbus-Protokolle PROFIBUS und FIP (Teil 2).* atp-Automatisierungstechnische Praxis, 1993, nr 7, pp. 402-407
- [7]Volz M: PROFIBUS. *Technische Druckschrift. PROFIBUS Nutzerorganisation.* Oktober 1995.
- [8]*INTERBUS - The Sensor/Actuator Bus.* InterBus-S Club. 1996.
- [9] *LONWORKS Engineering Bulletins.* Echelon 1995.
- [10]*Controller Area Network.* Hitex (UK) Ltd. 1996.