

## SIECI PRZEMYSŁOWE W STANDARDZIE ETHERNET

*Streszczenie.* W artykule przedstawiono aktualne tendencje w zakresie rozwiązań komunikacyjnych stosowanych w sieciowych przemysłowych systemach pomiarowo – sterujących. Zaprezentowano możliwości i korzyści jakie daje wykorzystanie standardu Ethernet przemysłowy w tworzeniu struktury informacyjnej przedsiębiorstwa.

### INDUSTRIAL NETWORKS BASED ON ETHERNET

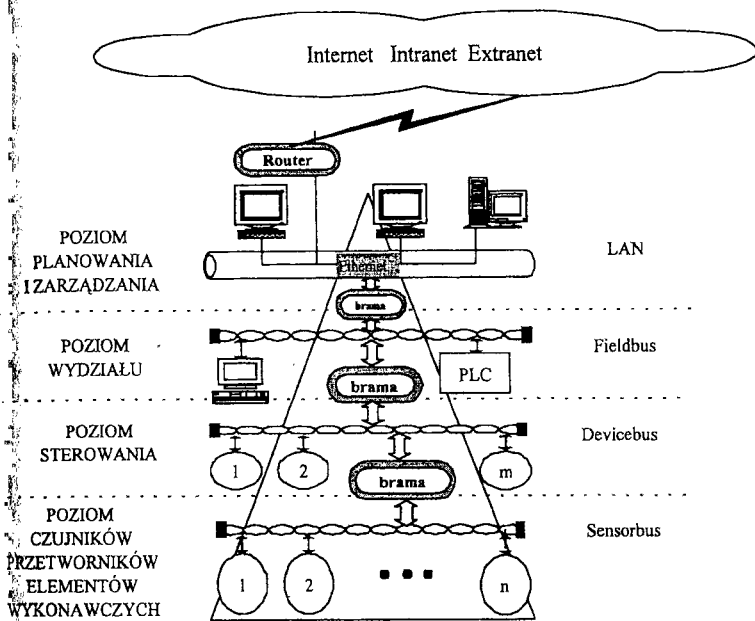
*Abstract.* In the paper, current trends in architecture of industrial computer networks, which cover measurement - control communication level and factory communication, are outlined. Discussion of Ethernet basic communication features and influence of Industrial Ethernet on creating factory information structure are presented.

#### 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój sieci komputerowych i technologii internetowych doprowadził do stanu, w którym występowanie infrastruktury komunikacyjnej oraz narzędzi do tworzenia aplikacji informatycznych jest powszechne. Sytuacja ta ma znaczący wpływ na obserwowane tendencje wprowadzania tych technologii do inteligentnych urządzeń pomiarowych, sterujących i rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących stanowiących jeden z elementów struktury informacyjnej przedsiębiorstwa. Rosnące możliwości obliczeniowe mikrokomputerów jedno-układowych oraz dostępność i niskie ceny układów scalonych realizujących standard Ethernet stwarzają możliwość budowy dedykowanych urządzeń sieciowych *bram* lub budowy urządzeń pomiarowo – sterujących z wyjściem do sieci Ethernet znajdującym się na pokładzie urządzenia.

#### 2. STRUKTURA MODELU INFORMACYJNEGO PRZEDSIĘBIORSTWA

Masowa produkcja i powszechne stosowanie inteligentnej aparatury pomiarowo - sterującej przyczyniło się do zmiany architektury systemów pomiarowo – sterujących (rys. 1) [1,7,8,15]. W systemach nowej generacji o strukturze sieciowej możliwe stało się przesyłanie, pamiętanie i przetwarzanie informacji cyfrowej na poziomie węzłów tworzących system. System nowej generacji jest systemem zbudowanym z rozproszonych, inteligentnych węzłów udostępniających i przyjmujących informację. Ograniczenia czasowe, natężenie i ilość przesyłanej informacji pomiędzy poszczególnymi węzłami nakładają pewne wymagania na parametry komunikacyjne systemu. Wynikają one z wymagań stawianych przez obiekty, procesy produkcyjne lub aplikacje informatyczne pracujące na wyższych poziomach struktury informacyjnej przedsiębiorstwa. Wybór na etapie projektowania systemu, odpowiedniej jego struktury nie jest w wielu przypadkach zadaniem prostym do wykonania i wymaga przeprowadzenia analiz potwierdzających dotrzymanie stawianych przez użytkownika wymagań ilościowych i jakościowych. Uwarunkowania zewnętrzne i liczba stawianych wymagań, które powinien spełnić projektowany system może być bardzo różna.



Rys. 1. Struktura komunikacyjna modelu informacyjnego przedsiębiorstwa.

Poza zdolnością do przetwarzania informacji, istotną cechą nowej generacji urządzeń pomiarowo - sterujących jest zdolność do cyfrowego, szeregowego, dwukierunkowego przesyłania informacji. W systemach pomiarowo - sterujących o architekturze sieciowej dominowały rozwiązania wykorzystujące firmowe protokoły, które zastępowane są przez protokoły uznane za standardy komunikacyjne. W obszarze zdominowanym dotychczas przez sieci przemysłowe coraz częściej pojawiają się rozwiązania wykorzystujące standard komunikacyjny Ethernet stosowany dotychczas w środowisku lokalnych sieci komputerowych. Należy oczekiwać, że ze względu na rozwój technologii internetowych a przede wszystkim ze względu na niską cenę sterowników i możliwość realizacji usług QoS, sieć Ethernet stanie się standardem wykorzystywanym w sieciach przemysłowych.

### 3. SIECI PRZEMYSŁOWE

Sieci przemysłowe stanowią cyfrowy, szeregowy system komunikacyjny najczęściej o topologii magistrali, który zastępuje analogowy system komunikacyjny 4-20 mA o topologii gwiazdy. Wprowadzenie sieci przemysłowych jest naturalną konsekwencją wprowadzania mikroprocesorów do przetworników, czujników i elementów wykonawczych, które posiadają wyjście do sieci przemysłowej zapewniające dwukierunkową transmisję informacji poprzez dwuprzewodową sieć. Takie rozwiązanie posiada wiele zalet, do których należy zaliczyć niskie koszty instalacyjne, zdalne konfigurowanie i diagnostykę, zdalny dostęp do informacji, pracę w trybie peer-to-peer itp.

Ze względu na złożoność, koszty i funkcjonalność sieci przemysłowe dzielone są na: *sensorbus*, *devicebus* i *fieldbus* (rys. 1). Sieci z grupy *sensorbus* są sieciami prostymi, z krótkim polem danych, krótkim czasem odpowiedzi i o prostym sterowniku sieciowym. Sieci *devicebus* są sieciami o średniej złożoności, z polem danych od kilku do kilkudziesięciu bajtów, z bar-

dziej rozbudowanym sterownikiem sieciowym i dużym zakresem zmian prędkości transmisji, gwarantują wysoki poziom determinizmu czasowego. Sieci *fieldbus* są sieciami złożonymi do przesyłania dużej ilości danych, posiadają rozbudowane sterowniki sieciowe i stanowią ogniwo łączące poziomy sieci przemysłowych z sieciami komputerowymi. Ze względu na złożoność i duże koszty sieci *fieldbus* wypierane są przez sieć Ethernet.

Ilość danych przenoszonych w sieciach przemysłowych zwiększa się wraz z wprowadzaniem coraz bardziej złożonych urządzeń. Stosowane od kilku lat rozwiązania sieci przemysłowych w wielu przypadkach nie są przystosowane do rosnących wymagań stawianych systemom komunikacyjnym. W tej sytuacji istnieją poszukiwania takich rozwiązań systemów komunikacyjnych, które byłyby w stanie sprostać rosnącemu wymogom. Jednym z coraz częściej stosowanych rozwiązań jest wykorzystanie sprawdzonego i dominującego obecnie w obszarze lokalnych sieci komputerowych standardu Ethernet. Czy w obszarze sieci przemysłowych zdominowanym przez protokoły Profibus, Interbus-S, CAN, LonWorks, FIP, P-Net itd. Ethernet ma szansę je zastąpić? Do głównych czynników rozstrzygających będą należały koszty i łatwość wdrożenia i charakterystyki wydajnościowe. Ze względu na minimalny rozmiar ramki (64 bajty), sposób realizacji okablowania (okablowanie strukturalne – topologia gwiazdy), długość segmentu (max. 100m) oraz wymagania na procesor oraz obszar pamięci stosowanie sieci Ethernet nie wydaje się uzasadnione na poziomie prostych i tanich magistralowych sieci przemysłowych do transmisji bitowych lub pojedynczych bajtów. Rozwiązania klasycznych sieci przemysłowych są dobrze dostosowane do komunikacji lokalnej. W przypadku konieczności przesyłania danych na większych obszarach bardziej atrakcyjnym rozwiązaniem jest wykorzystanie sieci Ethernet z protokołem TCP/IP, co praktycznie obszar komunikacyjny czyni nieograniczonym.

#### 4. ETHERNET PRZEMYSŁOWY

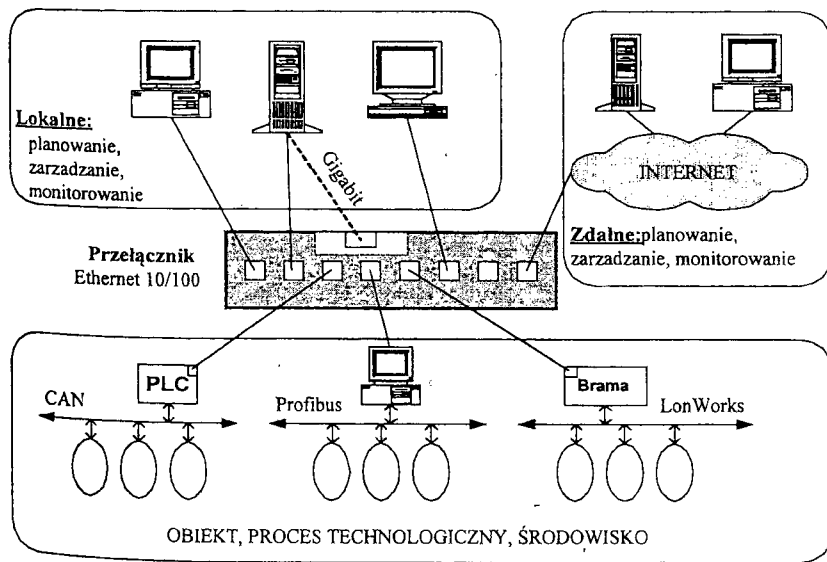
Sieć Ethernet zdominowała środowisko lokalnych sieci komputerowych i jest powszechnie akceptowanym rozwiązaniem do szybkiego transferu dużych ilości danych. Dominującymi obecnie odmianami sieci Ethernet są Ethernet skrętkowy i Ethernet szybki w odmianach z kolizjami (koncentratory) i bez kolizji (przełączniki). Wprowadzenie w 1995 r. Ethernetu przełączającego, wyeliminowało kolizje, co przy jednocześnie znacznej obniżce kosztów sterowników sieciowych znacznie uatrakcyjniło to rozwiązanie czyniąc je bardziej uniwersalnym i deterministycznym, co z punktu widzenia wymagań stawianych sieciom przemysłowym otworzyło nowe możliwości zastosowań. Po wprowadzeniu w 1998 r. unormowań gwarantujących dotrzymanie wymagań jakościowych QoS (IEEE 802.1Q/p) i przy obserwowanej dużej dynamice rozwoju technologii internetowych standard Ethernet w postaci Ethernetu przemysłowego zaczyna być stosowany w obszarze zarezerwowanym dotychczas dla sieci przemysłowych.

Ethernet przemysłowy od strony logicznej jest w pełni zgodny z Ethernetem klasycznym. Różnica polega jedynie na sposobie wykonywania urządzeń sieciowych, które są znacznie prostsze niż przełączniki grupowe stosowane w lokalnych sieciach komputerowych. Wprowadzenie Ethernetu przemysłowego na poziom sieci przemysłowych prowadzi do obniżenia kosztów budowy systemu komunikacyjnego i do uproszczenia struktury komunikacyjnej oraz ułatwia integrację systemów komunikacyjnych firmy. Ethernet jest rozwiązaniem obejmującym poziom warstwy fizycznej i warstwy łączenia danych. Istotnym zagadnieniem jest sposób rozwiązania warstw wyższych. Stosowanie sieci Ethernet w sposób naturalny prowadzi do używania stosu TCP/IP. Dzięki zastosowaniu stosu protokołowego TCP/IP możliwe jest wprowadzenie na poziom sieci przemysłowych technologii internetowych. Stosowanie technologii internetowych pozwala na znaczne uproszczenie interfejsu użytkownika przy dostępie do informacji pomiarowo – sterującej (przeglądarka, e-mail, FTP) oraz wpływa na obniżenie

kosztów przygotowania oprogramowania (JVM, Java) i zwalnia z konieczności stosowania drogiej i specjalizowanych systemów projektowo - uruchomieniowych. Skróceniu ulega czas opracowywania i uruchamiania oprogramowania, które stanowi obecnie największy czynnik kosztów opracowywania nowego urządzenia.

Rosnące możliwości obliczeniowe mikrokomputerów jednokładowych oraz dostępność i niskie ceny układów scalonych realizujących standard Ethernet stwarzają możliwość budowy urządzeń pomiarowo – sterujących z wyjściem do sieci Ethernet znajdującym się na pokładzie urządzenia. Tak skonstruowane urządzenie można podłączyć bezpośrednio do urządzenia sieciowego (koncentrator lub koncentrator przełączający) z pominięciem komputera PC lub bramy, co upraszcza strukturę systemu komunikacyjnego.

W roku 1999 udział sieci Ethernet w rynku sieci przemysłowych nie był zbyt duży i wynosił 0,2%. Dominowały sieci *Fieldbus*, *Devicebus* i *Sensorbus*. Obecnie około 5% urządzeń produkowanych na potrzeby przemysłowych systemów pomiarowo – sterujących posiada wyjście do sieci Ethernet lub Fast Ethernet [7,19,20]. Niskie ceny sterowników do sieci Ethernet, potrzeba integracji sieci przemysłowych z sieciami komputerowymi oraz rozwój technologii internetowych są czynnikami, które będą stymulowały dalszy rozwój Ethernetu przemysłowego. Oferowanie układów scalonych integrujących w sobie funkcje sterownika do sieci Ethernet, stosu protokołowego TCP/IP, protokołu HTTP oraz nano-serwera www standaryzuje dostęp do danych pomiarowo – sterujących z poziomu przeglądarki internetowej. Zastosowanie takiego układu scalonego w urządzeniu oznacza przeniesienie pewnych funkcji realizowanych dotychczas w komputerach osobistych, bramach lub w serwerach na poziom urządzenia pomiarowo – sterującego. Uprości to infrastrukturę komunikacyjną przedsiębiorstwa i otworzy nowe możliwości w sposobie dostępu do danych z poziomu aplikacji informatycznych takich jak systemy MMI, SCADA lub ERP (rys. 2).



Rys.2. Infrastruktura komunikacyjna z Ethernetem przemysłowym.

Dostęp do danych pomiarowo – sterujących gromadzonych w urządzeniu z poziomu przeglądarki internetowej nie wymaga instalowania na stacjach użytkowników dodatkowego, specjalizowanego oprogramowania wraz z protokołami komunikacyjnymi. Zastosowanie technolo-

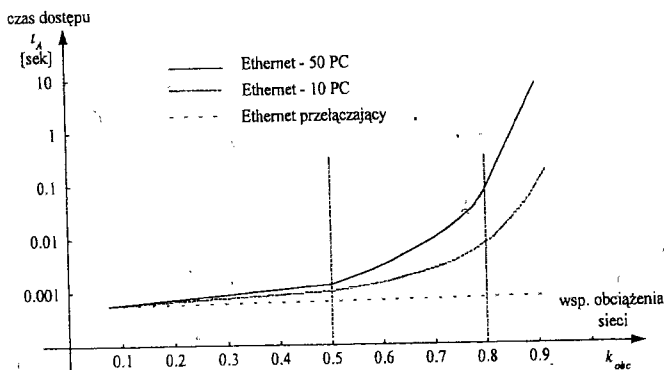
gii internetowych do budowy urządzeń może być najprostszą metodą standaryzacji środowiska komunikacyjnego w sieciach przemysłowych na poziomie sieci typu *fieldbus* i *devicebus*. Rozwiązanie takie umożliwiłoby budowanie systemów otwartych, w których projektanci lub użytkownicy mogliby zestawiać urządzenia pochodzące od różnych producentów i tworzyć oprogramowanie aplikacyjne metodą komponentową z wykorzystaniem przeglądarki internetowej.

## 5. WYDAJNOŚĆ SIECI ETHERNET

W zastosowaniach przemysłowych sieciowych systemów pomiarowo – sterujących, jednym z ważniejszych elementów decydujących o wyborze danego protokołu jest spełnienie przez niego wymaganej przepustowości komunikacyjnej i dotrzymanie stawianych ograniczeń czasowych. Na potrzeby wyznaczenia rzeczywistej wydajności sieci Ethernet opracowano wiele modeli analitycznych [2,3,17]. W zastosowaniach przemysłowych jednym z podstawowym kryterium oceny przydatności systemu komunikacyjnego jest spełnienie warunków determinizmu czasowego. W sieci Ethernet występują kolizje zatem dotrzymanie ograniczeń czasowych w znacznym stopniu zależy od obciążenia sieci. W tabeli 1, dla wybranych rozmiarów ramek komunikacyjnych przedstawiono maksymalne wartości przepustowości i efektywności komunikacyjnej. Na rys. 3 przedstawiono zależność czasu dostępu do sieci Ethernet i Ethernet przełączający w zależności od obciążenia sieci opracowaną na podstawie modelu Molle'a [17]. Czas dostępu określa czas jaki potrzebny jest na nadanie ramki do sieci z uwzględnieniem opóźnień spowodowanych kolizjami i przeciążeniem sieci.

Tabela 1. Maksymalna przepustowość i efektywność komunikacyjna sieci Ethernet.

Rozmiar pola danych/ramki [bajty]	Przepustowość komunikacyjna [ramki / sek.]	Efektywność komunikacyjna $k_{ef}$ [dane/ramka]
46 / 68	14 204	54%
64 / 86	11 792	62%
128 / 150	7 352	77%
256 / 278	4 139	86%
512 / 534	2 256	92%
1024 / 1046	1 172	95%
1500 / 1522	810	96%



Rys. 3. Czasy dostępu do sieci Ethernet w zależności od jej obciążenia.

Na rys. 3 zaznaczono trzy obszary obciążenia sieci. W obszarze małego obciążenia sieci ( $k_{obc} < 0.5$ ) czas dostępu jest krótki i w małym stopniu zależy od liczby stacji roboczych i jest zbliżony dla obu rozpatrywanych rodzajów sieci. W obszarze średniego obciążenia ( $0.5 < k_{obc} < 0.8$ ) wraz z jego wzrostem uwidaczniają się różnice pomiędzy Ethernetem a Ethernetem przełączającym. W obszarze dużego obciążenia sieci wartości czasu dostępu są dość znaczne (1-10 sek.), zatem jej wykorzystanie, zwłaszcza w rozwiązaniach wymagających dotrzymania ograniczeń czasowych jest wykluczone. W takiej sytuacji właściwym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie Ethernetu przełączającego, w którym czas dostępu w niewielkim stopniu zależy od obciążenia i od liczby pracujących stacji roboczych.

Jednym z parametrów systemów komunikacyjnych jest czas wykonania  $C$  zadania polegającego na przesłaniu ramki komunikacyjnej z danymi pomiarowo - sterującymi. Na poziomie systemu komunikacyjnego czas wykonania zadania zależy od prędkości transmisji, długości pola danych i metody kodowania. Dla danego urządzenia i dla danego systemu komunikacyjnego czasy wykonania zadań można traktować odpowiednio jako parametr urządzenia i parametr systemu komunikacyjnego. Na rys. 4 przedstawiono czasy wykonania zadania w systemie komunikacyjnym z różnymi protokołami stosowanymi na poziomie sieci przemysłowych, przyjmując dwubajtowe pole danych i dwie wartości prędkości transmisji: jednakową dla wszystkich protokołów  $V_{tr} = 500\text{ kbit/sek.}$  oraz maksymalną dla danego protokołu. Wartości czasów wykonania zadania dla poszczególnych protokołów komunikacyjnych wyznaczono z poniższych zależności [16]:

$$C_{can} = \frac{1}{V_{tr}} \left( \frac{34 + 8 * L_{dane}}{5} + L_{ster} + 8 * L_{dane} \right), \quad (1)$$

$$C_{profib} = \frac{1}{V_{tr}} \left[ 2 * T_{syn} + (L_{ster}^{ini} + L_{ster}^{odp} + L_{dane}^{ini} + L_{dane}^{odp}) * 11 \right], \quad (2)$$

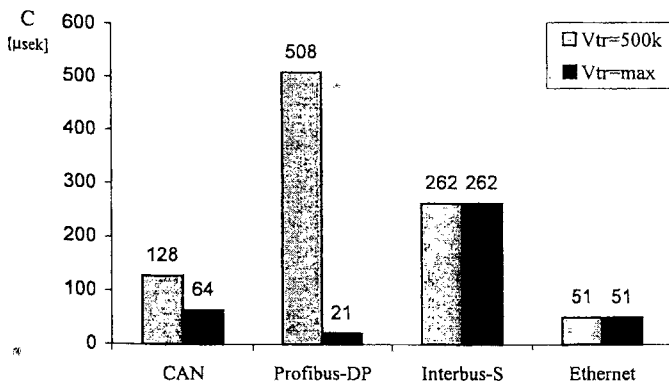
$$C_{ibus} = \frac{1}{V_{tr}} (13 * (L_{ster} + N * L_{dane})), \quad (3)$$

$$C_{eth} = \frac{1}{V_{tr}} ((L_{ster} + L_{dane}) * 8), \quad (4)$$

gdzie:  $L_{dane}$  - długość pola danych ramki w bajtach,

$L_{ster}$  - długość pól sterujących ramki,

$T_{syn}$  - czas synchronizacji pomiędzy cyklami komunikacyjnymi (min. 33 bity).

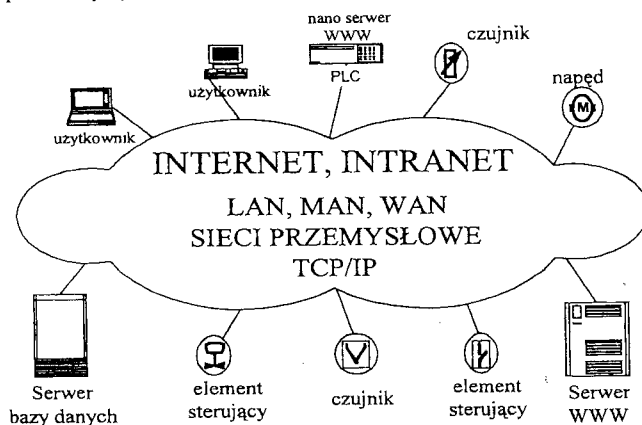


Rys. 6. Parametry czasowe zadania okresowego

Przedstawione na rys. 6 wyniki dla prostego przypadku pokazują duży zakres zmienności uzyskiwanych wyników, co oznacza, że wybór systemu komunikacyjnego i jego parametrów powinien być poprzedzony wykonaniem analiz, na bazie których można dokonać trafnych wyborów. Pomimo tego, że sieć Ethernet nie była projektowana z myślą do pracy w sieciach przemysłowych, wyniki uzyskane dla bardzo niekorzystnego dla tej sieci przypadku są bardzo dobre.

## 6. INTERNET W SIECIACH PRZEMYSŁOWYCH

Wykorzystanie na poziomie sieci przemysłowych rozwiązań sprzętowych i programowych, z sukcesem stosowanych w sieciach komputerowych (Ethernet, TCP/IP, HTTP, WWW) [9,10,14,15,18], prowadzi do uproszczenia wielopoziomowej struktury tworzącej model systemu informacyjnego przedsiębiorstwa. Uproszczenie struktury (rys. 4) przejawia się w tym że, zarówno dostęp do informacji pomiarowych jak i przesyłanie informacji sterujących elementami wykonawczymi lub danych konfiguracyjnych jest możliwe z poziomu przeglądarki internetowej, która stała się standardowym wyposażeniem komputera osobistego niezależnie od stosowanej platformy systemowej.



Rys. 4. Internetowa struktura komunikacyjna przedsiębiorstwa.

Podstawową zaletą wynikającą ze stosowania Ethernetu przemysłowego i technologii internetowych jest rezygnacja z konieczności stosowania dedykowanego oprogramowania pracującego po stronie użytkownika, co może w sposób znaczący obniżyć koszt funkcjonowania aplikacji, zwłaszcza przy dużej liczbie osób korzystających z niej.

Wprowadzenie technologii internetowej na poziom systemów pomiarowo - sterujących jest możliwe dzięki przeniesieniu na poziom węzłów pomiarowych i wykonawczych węzła automacyjnej bramy internetowej lub węzłów realizujących jednocześnie funkcje pomiarowo - sterujące i posiadających wyjście do sieci Ethernet. Na rys. 5 przedstawiono

## 7. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie Ethernetu przemysłowego i technologii internetowych na poziomie węzłów pomiarowo - sterujących pozwoli na uproszczenie infrastruktury komunikacyjnej przedsiębiorstwa i rozwiązywanie trudnego zagadnienia integracji sieci przemysłowych z systemem informacyjnym przedsiębiorstwa pracującym na poziomie lokalnych lub rozległych sieci komputerowych. Ponadto, rozwiązanie to pozwoli na unifikację urządzeń sieciowych, ujednoczenie

nie standardów komunikacyjnych dla komputerów i węzłów pomiarowo - sterujących oraz wpłynie na ograniczenie kosztów instalacji i eksploatacji zintegrowanych systemów informacyjnych.

Czynnik ekonomiczny i wysoka wydajność zdecydowały, że po wprowadzeniu w 1998 roku nowych unormowań międzynarodowych (IEEE 802.1Q/p) zapewniających m. innymi jakość usług i realizację determinizmu czasowego w sieci Ethernet, standard ten został wybrany przez środowisko przemysłowe do wykorzystania na poziomie systemów pomiarowo - sterujących. Poza obniżeniem kosztów integracji, rozwiązanie to poprzez ujednoczenie struktury komunikacyjnej powoduje uproszczenie integracji części wytwarzającej z częścią biznesową. Wykorzystanie Ethernetu przemysłowego i technologii internetowych na poziomie sieci przemysłowych zdecydowanie przybliża urzeczywistnienie idei systemów otwartych, niezwykle istotnych z punktu widzenia użytkowników.

## LITERATURA

- [1] Automation Research Corporation: *Device & Field Network. Market Studies*. 1999.
- [2] Boggs D.R., Mogul J.C., Kent A.Ch.: *Measured Capacity of an Ethernet: Myths and Reality*. Digital Western Research Laboratory. Research Report 1988/4.
- [3] Breyer R., Riley S.: *Swiched, Fast i Gigabit Ethernet*. Helion, Gliwice 2000.
- [4] Eccles L. H.: *A Smart Sensor Bus for Data Acquisition*. *Sensors Magazine*, March 1998.
- [5] Glanzer D.A.: *An Open Architecture for Information Integration*. *Sensors Magazine*, May 2001.
- [6] Hewlett-Packard. *Industrial Ethernet*. 1998.
- [7] Hirschman Network Systems: *Distributed Communication Architecture*. 1998.
- [8] Jordan J. R.: *Serial Networked Field Instrumentation*. Wiley Series in Measurement Science and Technology. 1995.
- [9] Kaplan G.: *Ethernet Winning Ways*. IEEE Spectrum, January 2001, pp.113-121.
- [10] Kmiecik W.: *Zarządzanie procesem technologicznym przez Internet*. Elektrosystemy luty, 2001, pp.88-89
- [11] Lee K.B., Schneeman R.D.: *Internet-Based Distributed Measurement System and Control Application*. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, June/99, pp. 23-27.
- [12] Lutz A.T.: *Using TCP/IP as an Instrument Interface*. *Sensors Magazine*, July, 1998, pp.798-802.
- [13] Mazurek P., Daca W.: *Monitorowanie i sterowanie urządzeniami przez Internet*. *Elektronizacja* 3/2001, pp.5-8.
- [14] Michta E.: *Rozproszone systemy pomiarowo – kontrolne nowej generacji*. *Pomiary Automatyka Kontrola PAK* 9/98, pp.344-347.
- [15] Michta E.: *Technologie internetowe w sieciowych systemach pomiarowo – sterujących*. MEZURA-AUROMECON 2001, Poznań, pp. 131-138.
- [16] Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowych systemów pomiarowo – sterujących*. Monografia 99. Politechnika Zielonogórska, 2000.
- [17] Mollen M.M.: *A new binary Logarithmic Arbitration Method for Ethernet*. Raport techniczny CSRI-298, Computer Systems Research Institute, University of Toronto. 1994.
- [18] National Instruments. *Integrating the Internet into Your Measurement System.*, 1999, pp. 1-9
- [19] Schneider S.: *Making Ethernet Work in Real Time*. *Sensors Magazine*, November, 2000
- [20] Sink P.: *A Comprehensive Guide to Industrial Networks*. *Sensors Magazine*, June, 2001.