

Model wymiany informacji w sieci PROFINET CBA

Rafał CUPEK

*Politechnika Śląska, Instytut Informatyki
rcupek@polsl.pl*

Streszczenie

Niniejsze opracowanie zawiera analizę mechanizmów komunikacyjnych stosowanych w sieci PROFINET CBA. Zaprezentowany został zarówno ogólny model kanału komunikacyjnego, sposób zestawiania komunikacji pomiędzy urządzeniami jak i praca sieci w trybie czasu rzeczywistego SRT i w trybie bazującym na stosie protokołów TCP/IP. Celem przedstawionej analizy jest szczegółowa prezentacja zjawisk komunikacyjnych zachodzących w sieci PROFINET. Prezentacja ta może stanowić punkt wyjścia zarówno dla rozważań dotyczących możliwości efektywnego wykorzystania istniejących w sieci PROFINET CBA mechanizmów komunikacyjnych, jak również dla analizy możliwości dalszego rozwoju tego standardu.

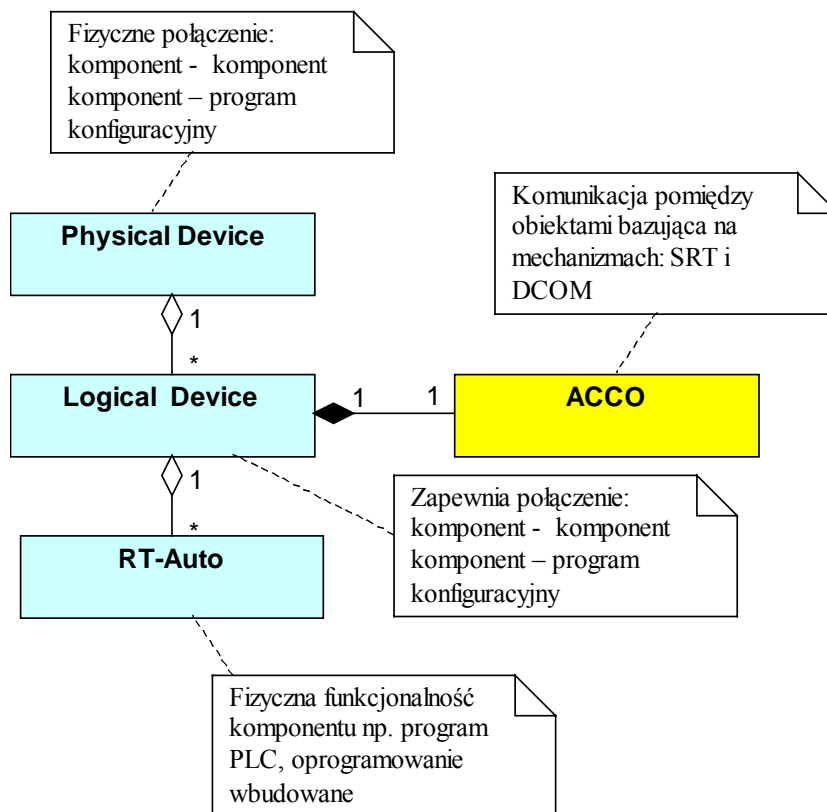
1. Wymiana danych pomiędzy komponentami systemu automatyki przemysłowej w sieci PROFINET CBA

Standard PROFINET CBA stanowi rozwiązanie komunikacyjne wykorzystywane do wymiany informacji pomiędzy realizowanymi w oparciu o komponenty układami automatyki przemysłowej. Standard ten jest stosowany w rozwiązaniach przemysłowych sieci polowych i jest on wyszczególniony przez normę IEC 61158 (Digital Data Communication for Measurements and Control – Fieldbus in Industrial Control Systems), jako klasa: „Type 10” w specyfikacji dziesięciu rodzin protokołów komunikacyjnych.

Kontekst zastosowania sieci PROFINET CBA w przemysłowych systemach sterowania został określony w postaci profilu komunikacyjnego: CPF3 zdefiniowanego spośród siedmiu profili komunikacyjnych objętych normą IEC 61784 (Profile Sets for Continuous and Discrete Manufacturing Relative to Fieldbus Use in Industrial Control Systems) [7].

Ideą przyświecającą twórcom rozwiązania PROFINET CBA było stworzenie uniwersalnego interfejsu komunikacyjnego, pozwalającego na łączenie komponentów automatyki przemysłowej, pochodzących od różnych dostawców. Interfejs ten z jednej strony pozwala na ukrycie wewnętrznej struktury dostarczanego rozwiązania technicznego, z drugiej strony umożliwia on komunikację z urządzeniami innych producentów, poprzez definiowaną w fazie tworzenia systemu listę powiązań sygnałów wejściowych i wyjściowych, niezbędnych dla współpracy pomiędzy komponentami sieci PROFINET CBA [2].

Opis udostępnianego przez komponent CBA interfejsu dostarczany jest przez producenta urządzenia w postaci specyfikacji, przedstawionej w bazującym na XML języku GSDML. Opis ten jest następnie wykorzystywany, do stworzenia w fazie projektowania, rozproszonego systemu automatyki przemysłowej, składającego się komponentów systemu sterowania i sieci wiążących je połączeń. Wymiana informacji pomiędzy komponentami zachodzi zgodnie z modelem komunikacyjnym definiowanym przez standard PROFINET CBA.



Rys.1. Struktura komponentu będącego węzłem sieci PROFINET CBA

Podstawowe składniki węzła sieci PROFINET CBA, będącego jednocześnie komponentem rozproszonego systemu automatyki, zostały zaprezentowane na rys.1[4].

Każda z zaprezentowanych na diagramie klas udostępniana jest w postaci obiektów interfejsu, zgodnych z modelem DCOM (Distributed Component Object Model) [1].

Za realizację fizycznego dostępu do sieci komunikacyjnej, odpowiada obiekt *Physical Device*, będący odzwierciedleniem sprzętu, wykorzystywanego do wymiany informacji. Obiekt *Logical Device* odpowiada za dostęp do usług oferowanych przez komponent PROFINET CBA. Zazwyczaj agregacja *Physical Device* i *Logical Device* tworzona jest w relacji jeden do jeden, jednak w przypadku komponentów złożonych, jak np. urządzenia realizującego jednocześnie procedurę sterowania w postaci Soft-PLC i umieszczonego w tym samym urządzeniu systemu wizualizacji klasy HMI (Human Machine Interface), istnieje możliwość definicji kilku obiektów logicznych, wykorzystujących pojedynczy interfejs komunikacyjny.

Obiekty reprezentowane przez instancje klasy *RT-Auto* odpowiadają za użytkową funkcjonalność komponentu. Realizują one specyficzne funkcje związane z danym urządzeniem i współpracują przy ich realizacji z innymi komponentami za pomocą sieci PROFINET CBA. Nad dostarczeniem mechanizmów komunikacyjnych niezbędnych do wymiany informacji na poziomie warstwy siódmej w modelu ISO/OSI, czuwa obiekt *ACCO* (Active Control Component Object), realizujący wymagania komunikacyjne będące sumą potrzeb zgłaszanych przez obiekty *RT-Auto* i obsługiwanych przez obiekt *Logical Device*.

ACCO połączony jest z *Logical Device* w agregacji całkowitej jeden do jeden, określającej związek, w którym instancja *ACCO* jest jedynym i wyłącznym obiektem, obsługującym potrzeby komunikacyjne generowane przez dane urządzenie logiczne. *ACCO* umożliwia utworzenie sieci połączeń z innymi elementami sieci PROFINET, wymianę informacji w czasie pracy urządzenia, jak również badanie statusu połączenia i kontrolę ograniczeń czasowych za pomocą funkcji kontroli jakości QoS.

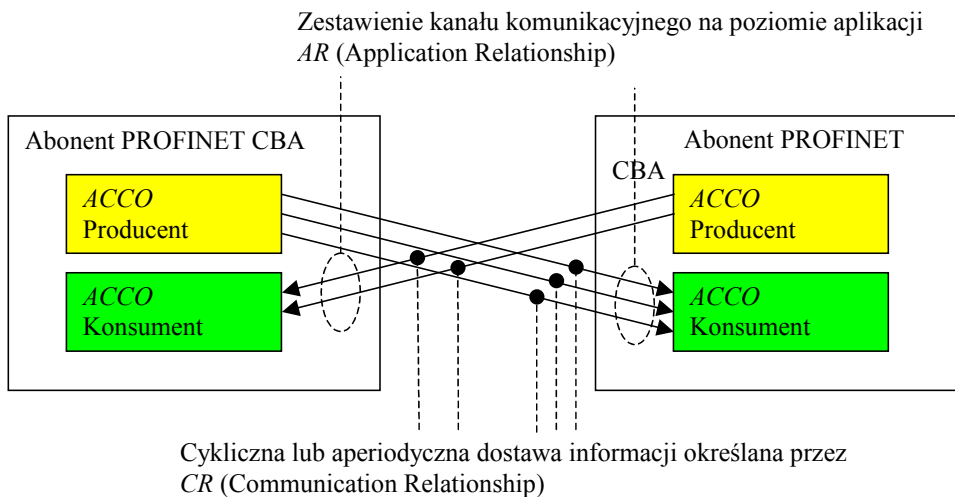
Każdy z elementów *ACCO* obecnych w sieci PROFINET CBA pełni rolę zarówno producenta, udostępniającego zmienne wyjściowe komponentu, jak i konsumenta, pobierającego potrzebne informacje o zmiennych wejściowych z innych komponentów [4]. Decyzja o liczbie i sposobie powiązań z innymi komponentami CBA podejmowana jest w fazie projektowania systemu automatyki i przekłada się ona na listę połączeń, generowaną za pomocą części inżynierskiej oprogramowania wykorzystywanego do przygotowania opisu systemu. Następnie opis ten zapisywany jest w pamięci nieulotnej poszczególnych komponentów.

Zapisany w sposób trwały opis wymagań komunikacyjnych nie jest jednoznaczny z precyzyjnym opisem rzeczywistej wymiany informacji, realizowanej w czasie pracy obiektów *ACCO*. Sieć połączeń tworzona jest dynamicznie w czasie pracy systemu na obiekcie (runtime), a jej rzeczywisty kształt ustalany jest dopiero w fazie zestawiania kanału komunikacyjnego pomiędzy obiektami *ACCO*. Faza ta dopuszcza także negocjację warunków związanych z parametrami danego połączenia [2].

Pojedynczy kanał wymiany informacji pomiędzy *ACCO* producenta i *ACCO* konsumenta określony jest jako *CR* (Communication Relationship), natomiast całość powiązań pomiędzy dwoma komponentami automatyki określona jest jako *AR* (Application Relationship) i definiowana jest poprzez listę niezależnych od siebie kanałów *CR* (rys.2). Połączenie *AR* definiowane jest zarówno ze względu zarówno na

konieczność dzielenia przez wiele kanałów *CR* wspólnego łącza komunikacyjnego, diagnostykę urządzenia, jak również ze względu na mechanizmy badania jakości połączenia QoS realizowane na poziomie *ACCO*.

Informacje transmitowane w ramach poszczególnych kanałów *CR*, oprócz użytecznej wartości poszczególnych zmiennych, dostarczają także szeregu informacji diagnostycznych. Na informacje diagnostyczne składają się nie tylko informacja na temat wystąpienia i typu błędu związanego z kanałem, bądź obsługiwany przez dany kanał urządzeniem, ale przekazywane są także znaczniki maintenance, niosące informacje o konieczności podjęcia działań serwisowych związanych z obsługiwany urządzeniem [3]. Dane te mogą w zdecydowany sposób ułatwić przetwarzanie informacji poprzez systemy klasy MES, gdyż część z istotnych dla systemów MES Maintenance zdarzeń jest prezentowana bezpośrednio na poziomie protokołu komunikacyjnego.



Rys.2 Połączenie pomiędzy komponentami sieci PROFINET CBA

Wymiany komunikacyjne *CR* mogą być definiowane w sposób aperiodyczny, co jest wykorzystywane np. dla transmisji informacji o alarmach i istotnych zdarzeniach posiadających wysoki priorytet. Wymiany mogą mieć także postać transakcji periodycznych, za pomocą których transmitowane są zazwyczaj zmienne procesowe. Oba typy wymian mogą być realizowane zarówno za pomocą niezdefiniowanych w czasie transmisji wykorzystujących magistralę DCOM, jak i za pomocą procedur komunikacyjnych PROFINET SRT, spełniających wymogi transmisji klasy soft real-time.

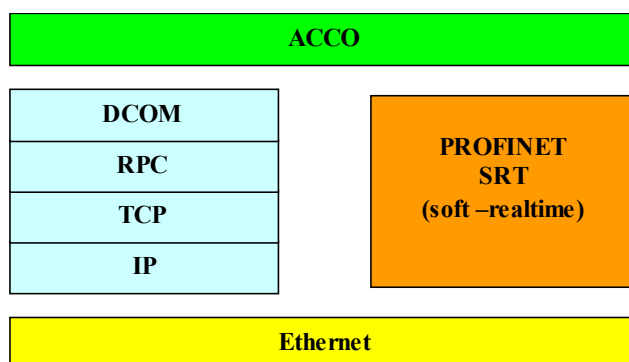
Dla trybu *SRT* istnieje możliwość tworzenia połączeń typu multicast, umożliwiających jednoczesne dostarczanie informacji do wszystkich zainteresowanych nią abonentów sieci. Rozwiązanie takie umożliwia udostępnianie informacji w sposób gwarantujący czasową i przestrzenną spójność danych. W fazie projektowania sieci połączeń istnieje możliwość określenia zarówno typu wykorzystywanego połączenia,

wymaganych parametrów jakościowych i okresu wymiany informacji związanego z pojedynczym kanałem CR [5].

Podsumowując całość procesu komunikacyjnego realizowanego w sieci PROFINET CBA należy wyodrębnić trzy fazy. Pierwsza faza obejmuje proces przygotowania za pomocą narzędzi inżynierskiej części systemu (development) opisu, precyzującego zarówno topologię jak i wymagane parametry powiązań między komponentami sieci. Faza ta wykonywana jest jednokrotnie, a jej wyniki zapisywane w pamięci nieulotnej komponentów.

Faza druga obejmuje przygotowanie odpowiednich kanałów komunikacyjnych, uzgadnianych pomiędzy ACCO powiązanych ze sobą komponentów. Na tym etapie do komunikacji wykorzystany jest stos protokołów TCP/IP i mechanizm DCOM. Faza druga powtarzana jest każdorazowo, w sposób globalny przy restarcie sieci, lub lokalnie wtedy, kiedy wymagane jest ustalenie nowych warunków połączenia pomiędzy komponentami.

Faza trzecia obejmuje właściwą wymianę danych realizowaną w czasie pracy systemu. Może ona mieć miejsce bądź to z wykorzystaniem specjalizowanego protokołu czasu rzeczywistego PROFINET STR, bądź też za pomocą mechanizmu DCOM bazującego na połączeniowym protokole RPC. Struktura wykorzystywanych protokołów komunikacyjnych została zaprezentowana na rys. 3.



Rys.3. Stos protokołów komunikacyjnych wykorzystywanych w sieci PROFINET CBA

2. Wymiana danych w trybie SRT

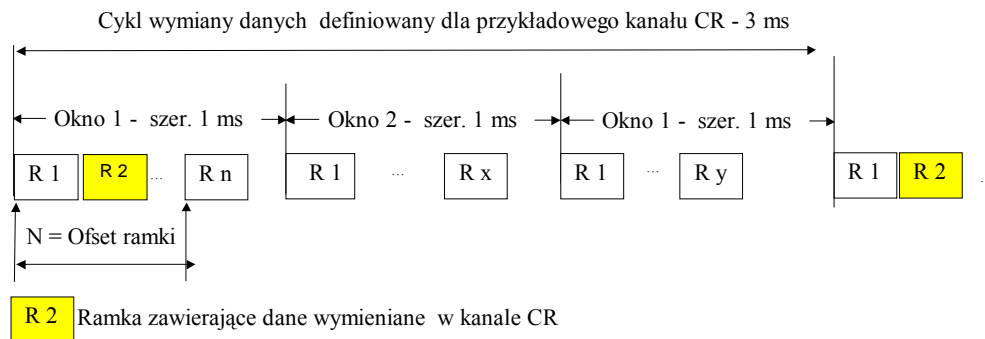
Zarówno w przypadku wymiany danych bazującej na magistrali DCOM, jak i w przypadku komunikacji w trybie PROFINET SRT, za realizację właściwej transmisji informacji użytkowych w czasie pracy urządzenia odpowiada ACCO producenta informacji. Zadaniem konsumenta jest ustalenie z dostawcą powiązań na poziomie aplikacji AR, jak i na poziomie poszczególnych wymian informacji CR oraz kontrola jakości połączenia z wykorzystaniem mechanizmów QoS. Zjawiska zachodzące po

ustaleniu kanałów komunikacyjnych muszą być analizowane oddzielnie dla trybu komunikacji SRT i dla komunikacji z wykorzystaniem magistrali DCOM.

Protokół komunikacyjny SRT odwołuje się bezpośrednio do poziomu warstwy aplikacji, umieszczając w ramach sieci Ethernet dane użytkowe, transmitowane zgodnie ze scenariuszem ustalonym wcześniej pomiędzy obiektami ACCO współpracujących ze sobą komponentów. Model komunikacyjny przyjęty dla trybu SRT zakłada statyczne szeregowanie wymian komunikacyjnych, bazujące na mechanizmie wykorzystywanym do komunikacji w czasie rzeczywistym w sieci Profinet I/O, który to z kolei schemat komunikacyjny został oparty na wcześniejszych rozwiązaniach sieci przemysłowej Profibus DP [6].

Protokół PROFINET I/O wykorzystuje transmisję ramek w sieci Ethernet (identyfikator ramki PROFINET I/O to 0x8892) w trybie full duplex 100 Mb/s zgodnie ze standardem IEEE 802.3. Wykorzystywane są priorytety zgodnie ze standardem IEEE 802.1Q. Stosowany algorytm komunikacyjny zapewnia bardzo wysoką przepustowość użyteczną sieci. Uzgodnienie parametrów transmisji następuje w fazie negocjacji połączenia. Z tego powodu transmisje cyklicznie nie wymagają dodatkowych ramek zapytania, czy też ramek potwierdzenia, ponieważ ich miejsce w cyklu komunikacyjnym zostało ustalone w fazie zestawiania kanału komunikacyjnego CR a o poprawności kanału komunikacyjnego świadczy obecność określonej ramki – zdefiniowanej przez jej identyfikator – w zdefiniowanym cyklu komunikacyjnym (rys.4). Potwierdzenia wymagają jedynie transakcje aperiodyczne obejmujące zdarzenia, ale te stanowią znikomą część wykorzystywanego pasma transmisji danych, zajmowanego przede wszystkim przez wymiany periodyczne.

Kolejna oszczędność związana jest z wykorzystaniem pasma komunikacyjnego i dotyczy samego kształtu ramki PROFINET SRT. Ramka ta poza mac-adresami preambułą typem ramki i polem VLAN zawiera jedynie dane użytkowe, oraz identyfikator ramki i licznik określający położenie ramki w statycznym cyklu komunikacyjnym, który jest wykorzystywany ze względu na występujące w switch-ach opóźnienia w propagacji ramek.



Rys.4. Przykład szeregowania wymian cyklicznych w trybie PROFINET SRT

Cykl komunikacyjny sieci PROFINET SRT bazuje na szczelinach czasowych o szerokości 31,25 μ s. Statyczny algorytm szeregowania transmisji wymaga oczywiście

precyzyjnych rozwiązań obejmujących synchronizację czasu węzłów. Transmisje cykliczne realizowane są w ściśle określonych momentach cyklu komunikacyjnego, niezależnie od zmian wartości danych zachodzących w warstwie aplikacji. Podobnie wysoko priorytetowe wymiany aperiodyczne mają swoje stałe okno czasowe w cyklu komunikacyjnym.

Realizacja poszczególnych wymian związanych z kanałami CR jest możliwa dzięki podziałowi pasma komunikacyjnego na szczeliny czasowe, synchronizowane z dokładnością na poziomie jednej mikrosekundy, za pomocą protokołu synchronizacji czasu IEEE 1588 (Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems).

Pojedyncze okno czasowe transmisji ma wymiar $n * 31,25 \mu s$ – gdzie n odpowiada parametrowi *SendClockFactor* i przyjmuje wartości z zakresu 1 – 128 [6]. Tak więc rzeczywisty wymiar okna może być z zakresu od $31,25 \mu s$ do $4000 \mu s$ i jest on uzależniony zarówno od ilości danych wysyłanych w jednym oknie, jak i od maksymalnej długości ramki. Maksymalna liczba transmitowanych w ramce danych użytkowych wynika z ograniczenia długości ramki w sieci Ethernet i wynosi 1.490 bajtów. Czas transmisji tej najdłuższej możliwej do wysłania ramki wynosi dla sieci Ethernet 100 Mb - $122,24 \mu s$.

Zestawiany na poziomie kanału AC scenariusz szeregowania wymian zakłada uzyskanie zadanego okresu transmisji poprzez współczynnik *ReductionRatio* określający w przedziale 1 – 16384 odległość w postaci liczby okien danych oddzielających dwie kolejne transmisje. Szerokość okna zależy natomiast od *SendClockFactor* – tak więc horyzont wymiany informacji może zawierać się w przedziale od $31,25 \mu s$ do $65,5 s$.

Przedział Czerwony RTCLASS3 (opcjonalny)	Przedział Pomarańczowy RTCLASS2 (opcjonalny)	Przedział Zielony								Przedział Żółty (opcjonalny)
		Prior. 7	Prior. 6	Prior. 5	Prior. 4	Prior. 3	Prior. 2	Prior. 1	Prior. 0	

Rys.5 podział na czasowego na priorytety transmisji

Każde z okien komunikacyjnych dzielone jest na przedziały, dedykowane dla określonych typów transmisji. W przypadku konieczności realizacji transmisji aperiodycznych o najwyższym priorytecie określanych jako RT_CLASS3, wykorzystywane jest tak zwany czerwony przedział pojawiający się na początku podstawowego okna komunikacyjnego. Dane aperiodyczne o priorytecie RT_CLASS2 są transmitowane w mogącym wystąpić po przedziale czerwonym przedziale pomarańczowym, a dane aperiodyczne o priorytecie RT_CLASS1 transmitowane są wewnątrz zielonego okna wymian cyklicznych na poziomie priorytetu szóstego. Okno zielone zawiera także realizowane z uwzględnieniem ośmiu poziomów priorytetów wymiany cykliczne. Za oknem zielonym może wystąpić okno żółte, obejmujące niewykorzystaną przez statyczny algorytm szeregowania część pasm komunikacyjnego. W oknie tym transmitowane są między innymi informacje konfiguracyjne wymieniane za pomocą mechanizmu DCOM, jak również istnieje możliwość wykorzystywania tego okna przez inne protokoły komunikacyjne. Ze względu na stałą długość podstawowego okna komunikacyjnego nie wytransmitowane w danym oknie informacje o niższych priorytetach, będą musiały poczekać na możliwość ich przesłania w kolejnych oknach.

Z tego też powodu istnieje konieczność kontroli stopnia wykorzystania pasma komunikacyjnego, będącego efektem szeregowania wymian, dla danego zestawu danych określającego parametry poszczególnych kanałów komunikacyjnych. Kontrola taka jest dostępna poprzez narzędzia diagnostyczne sieci, które umożliwiają także zmianę rozmiaru okna komunikacyjnego. Podział okna podstawowego na przedziały czerwony, pomarańczowy, zielony i żółty przedstawia rys.5.

3. Wymiana danych bazująca na stosie protokołów TCP/IP

Mechanizm komunikacyjny PROFINET SRT może być stosowany tylko w ograniczonym segmencie sieci przemysłowej, wykorzystywanym do komunikacji pomiędzy współpracującymi układami automatyki warstwy sterowania. Tryb SRT zapewnia wymianę informacji z uwzględnieniem ograniczeń czasowych, na poziomie pojedynczego cyklu sterownika PLC, liczonego w pojedynczych milisekundach. W przypadku konieczności dostarczania danych, poza realizowany z wykorzystaniem specjalizowanych urządzeń segment sieci przemysłowej, może być wykorzystywany tryb komunikacji bazujący na stosie protokołów TCP/IP. Tryb ten wykorzystuje protokoły: DCOM, RPC, TCP i IP.

Komunikacja bazująca na stosie TCP/IP nie daje gwarancji czasowych jak to ma miejsce w przypadku SRT. Szacowany dla sieci lokalnej okres wymiany informacji wynosi około 100 ms, ale wartość ta ma znaczenie statystyczne, a nie deterministyczne. Niewątpliwą zaletą tego trybu komunikacji jest jednak możliwość zdalnego dostępu do systemu automatyki z poziomu sieci rozległej. W takim przypadku należy jednak pamiętać, że ze względu na ograniczone możliwości obsługi protokołu DCOM w sprzęcie, stosowanym na poziomie systemów sterowania, właściwość *security* interfejsu DCOM określono z definicji jako *none* przenosząc obowiązek kontroli bezpieczeństwa na zewnętrzny układ separujący sieć poziomu sterowania od sieci rozległej [8].

Inaczej niż w przypadku PROFINET SRT wygląda też w trybie TCP/IP procedura komunikacyjna realizowana po zestawieniu połączenia wykorzystującego magistralę DCOM. W takim przypadku utworzony zostaje kanał komunikacyjny, bazujący na połączeniowym RPC. Dla zmniejszenia zajmowanego pasma komunikacyjnego zrezygnowano w przypadku wymian periodycznych z cyklicznej transmisji zmiennych przyjmując zasadę, że brak informacji jest także informacją. W trybie wykorzystującym stos protokołów TCP/IP transmitowane są jedynie zmiany wartości sygnałów obiektowych, przekraczające ustalony w fazie nawiązywania połączenia próg nieczułości, oraz informacje reprezentujące zdarzenia o charakterze aperiodycznym.

Ze względu na ograniczenie liczby wymian transmitowanych w sposób cykliczny, zmianie musiał ulec także algorytm kontroli parametrów jakościowych QoS dla poszczególnych kanałów komunikacyjnych *AC*. Dla każdego kanału *CR* definiowana jest *n*-krotność okresu wymiany, która wymusza wysłanie przez producenta prostego sygnału *ping*. Konsument znający okres komunikacji i parametry QoS uzyskuje nowe informacje, lub potwierdzenie wiarygodności posiadanych już danych. Ze względu na fakt, że kontrola jakości połączenia prowadzona jest na poziomie kanału *AR*, scena-

riusz procedury testowania połączenia poprzez sygnał ping jest optymalizowany na poziomie wymian realizowanych dla całego kanału AR.

Komunikacja bazująca na stosie protokołów TCP/IP może być stosowana dla realizacji komunikacji pomiędzy komponentami automatyki, do wymiany niekrytycznych czasowo parametrów, jak np. nastawy, czy sygnały wolnozmiennie. Mechanizm ten może być także wykorzystany do komunikacji pomiędzy system sterowania a systemami klasy HMI, gdzie oferowany mechanizm kontroli niezawodności transmisji QoS jest wystarczający dla większości zadań realizowanych przez system wizualizacji.

Szczególną zaletą rozwiązania komunikacyjnego bazującego na magistrali DCOM wydaje się możliwość bezpośredniej integracji systemów sterowania z wyższymi warstwami infrastruktury informatycznej przedsiębiorstwa. Wykorzystywany mechanizm komunikacji może być porównywany, z bazującym także na modelu DCOM standardem OPC. Protokoły RPC i TCP pozwalają na łatwe wyjście z obszaru działania ograniczonego do poziomu segmentu, lub kilku segmentów sieci przemysłowej najniższego poziomu i umożliwiają dostarczanie istotnych informacji o procesie poprzez bezpośrednie połączenie warstwy systemów sterowania z pozostałymi systemami informatycznymi przedsiębiorstwa. Innym z możliwych zastosowań tego trybu komunikacji może być zdalna diagnostyka i zdalne serwisowanie systemów automatyki przemysłowej.

Literatura

1. Guy Eddon and Henry Eddon: Inside COM+ Base Services , Microsoft Press, Redmond, Washington, 1999
2. Manfred Popp, Karl Weber: The Rapid Way to PROFINET, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe, 2004
3. PROFIBUS Working Group 7 "PROFINET and MES": PROFINET and MES Maintenance Operations v.1, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe, 2006
4. PROFIBUS Working Group 10 "PROFINET CBA": PROFINET CBA Architecture Description and Specification v.2.02, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe, 2004
5. PROFIBUS Working Group 11 "PROFINET CBA": Overview and guidance for PROFINET specifications Guideline for PROFINET v.2.1, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe 2006
6. PROFIBUS Working Group 11 "PROFINET IO": Application Layer protocol for decentralized periphery and distributed automation. Specification for PROFINET, v.2.1, Karlsruhe, 2006
7. PROFIBUS Working Group 11 "PROFINET IO": Profiles for distributed automation Specification for PROFINET, Version 2.1 Karlsruhe, 2006
8. PROFIBUS Working Group 18 "PROFINET Security": PROFINET Security Guideline v.1.0, Karlsruhe, 2005