

Adam MARKOWSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej
ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra

Porównanie właściwości czasowych wybranych rozwiązań Ethernetu przemysłowego

Dr inż. Adam MARKOWSKI

Od roku 1996 pracownik Politechniki Zielonogórskiej i Uniwersytetu Zielonogórskiego. Jest autorem 22 publikacji naukowych oraz kilku opracowań zrealizowanych na zamówienie przemysłu. Jego zainteresowania związane są z projektowaniem i analizą rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego.



e-mail: A.Markowski@ime.uz.zgora.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono klasyfikację rozwiązań Ethernetu przemysłowego. Przedstawiono strukturę ramki komunikacyjnej dla EtherCAT i PROFINET IRT. Zaprezentowano sposób wyznaczania czasu cyklu dla EtherCAT i PROFINET IRT.

Słowa kluczowe: Ethernet przemysłowy, czas cyklu.

Comparison of the cycle time of selected solutions for the Industrial Ethernet

Abstract

The paper presents classification of solutions for the Industrial Ethernet according to the obtained response time. There is presented the method of the carrier access together with the structure of a communication frame for EtherCAT and PROFINET IRT. The paper describes how to determine the cycle time, the cycle efficiency coefficient and the hardware delay coefficient of the cycle for EtherCAT and PROFINET IRT. The results presented in the paper concern example systems. In the first system the number of bytes sent to and received from the node was fixed and was set as 16, the number of nodes was variable from 1 to 50 with the step equal to 1. In the second system the number of nodes was also fixed as 50, while the numbers of bytes sent to and received was increasing from 10 to 500 with the step of 10. For every system there was an assumption of using EtherCAT and PROFINET IRT and the cycle time, the cycle efficiency coefficient and the hardware delay coefficient results were obtained by means of simulation. The selected results of the research are shown in Figs. 4-7.

Keywords: Industrial Ethernet, cycle time.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach wśród dostępnych na rynku urządzeń automatyki przemysłowej można odnotować wzrost udziału urządzeń z wbudowanymi usługami komunikacyjnymi wykorzystującymi Ethernet przemysłowy. Określenie Ethernet przemysłowy należy traktować jako całą grupę rozwiązań, które zmierzają do wykorzystania standardowego Ethernetu w przemyśle. W zależności od rozwiązania w różnym stopniu przeprowadzono modyfikacje protokołu standardowego. Przegląd najpopularniejszych rozwiązań Ethernetu przemysłowego można znaleźć w [1].

Aktualnie stosowane protokoły (rozwiązania) Ethernetu przemysłowego mogą być sklasyfikowane na trzy główne kategorie [2]. Sklasyfikowane protokoły stają się coraz bardziej wydajne pod względem osiąganych czasów odpowiedzi począwszy od kategorii pierwszej i skończywszy na kategorii trzeciej. Także w tej kolejności rośnie zakres ingerencji związany z koniecznością wprowadzenia dodatkowych funkcjonalności na poziomie warstwy łączenia danych. Modbus/IDA [1], Ethernet/IP [1] i FF HSE [1] są to rozwiązania reprezentatywne dla pierwszej kategorii. Protokoły te wykorzystują Ethernet taki jaki jest, dodając tylko

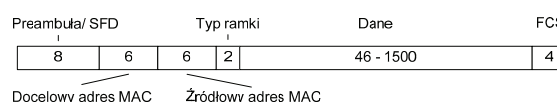
specyficzną dla zastosowań przemysłowych warstwę aplikacji nad stosem TCP/IP. Ponieważ w tej kategorii jest wykorzystywany cały stos TCP/IP, uzyskiwane czasy odpowiedzi nie są odpowiednie dla zastosowań w systemach czasu rzeczywistego. Typowe wartości czasu odpowiedzi są na poziomie 100 ms. Rozwiązania Ethernetu przemysłowego drugiej kategorii są postrzegane jako kompromis pomiędzy standardowym Ethernetem, a osiąganym odpowiednio krótkim czasem odpowiedzi na potrzeby systemów czasu rzeczywistego. Przykładem rozwiązania dla tej kategorii jest PROFINET RT. To rozwiązanie wykorzystuje obsługę priorytetów na poziomie warstwy Ethernet MAC, stosownie do standardu IEEE802.1D/Q. W celu skrócenia czasu odpowiedzi wprowadzono obejście warstwy sieciowej i transportowej dla danych przesyłanych w ramach aplikacji czasu rzeczywistego. Po zaimplementowaniu tej funkcjonalności można osiągnąć czas odpowiedzi na poziomie 10 ms.

Dalsze rozszerzenia rozwiązań Ethernetu przemysłowego prowadzące do poprawy czasu odpowiedzi są już tylko możliwe przez interwencję w mechanizmy szeregowania na poziomie warstwy MAC. Protokoły, które modyfikują oryginalny schemat szeregowania warstwy MAC Ethernetu należą do kategorii trzeciej. Żeby móc wykorzystać te protokoły konieczny jest specyficzny dla danego rozwiązania sprzęt i oprogramowanie. Dla przykładu EtherCAT [1], w całym cyklu wymiany danych, wykorzystuje tak zwaną ramkę sumaryczną. Oznacza to, że EtherCAT wykorzystuje tylko jedną ramkę dla wiadomości z i do wszystkich urządzeń. Te urządzenia, które są wywoływane w ramach transferu danych otrzymują dane na predefiniowanych pozycjach w ramce sumarycznej. Podstawy tej koncepcji są dobrze znane z rozwiązania sieci przemysłowej INTERBUS-S [1]. Z kolei PROFINET IRT wykorzystuje indywidualne ramki dla każdego węzła i wcześniej szereguje cały ruch w sieci. W fazie startowej każdy węzeł pracujący z protokołem PROFINET IRT odbiera ze stacji inżynierskiej jego indywidualną tablicę czasową odnośnie postępowania z nadchodzącymi ramkami, czyniąc w ten sposób cały ruch w sieci całkowicie przewidywalnym. Protokoły trzeciej kategorii pozwalają na osiągnięcie czasu odpowiedzi poniżej pojedynczych milisekund.

Jednym z podstawowych parametrów opisujących właściwości czasowe systemów pomiarowo-sterujące jest czas cyklu. W artykule przedstawiono sposób wyznaczania czasu cyklu w zależności od liczby węzłów oraz liczby przesyłanych do węzłów bajtów danych dla systemu pracującego z wykorzystaniem EtherCAT oraz PROFINET IRT[2,3].

2. Struktura ramek komunikacyjnych

Wszystkie rozwiązania Ethernetu przemysłowego wykorzystują jako nośnik standardową ramkę Ethernetową (rys. 1), która zaczyna się 7-bajtową preambułą oraz bajtem startowym Start-of-Frame Delimiter (SFD).

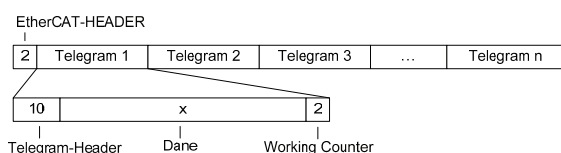


Rys. 1. Struktura standardowej ramki Ethernetowej
Fig. 1. Structure of a native Ethernet-frame

Bajty te są wykorzystywane do synchronizacji odbiorników warstwy fizycznej. Kolejne 12 bajtów to adres docelowy oraz adres źródłowy. Dwa następne bajty są zarezerwowane do oznaczenia typu ramki Ethernetowej i oznaczają wykorzystanie pola

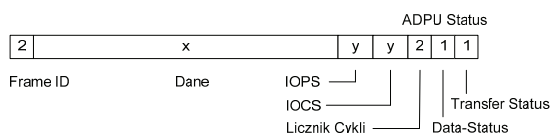
danych przez protokoły wyższych warstw. Następne pole ramki to przesyłane dane. Ramka kończy się czterobajtową sumą kontrolną FCS (Frame Check Sequence) w celu zapewnienia integralności przesyłanych danych.

EtherCAT wykorzystuje standardową ramkę Ethernetową z oznaczeniem typu jako 0x88A4. Specyficzne dla EtherCAT dane są umieszczone w polu danych ramki Ethernetowej i rozpoczynają się od dwubajтового nagłówka EtherCAT-Header (rys. 2). Dane wymieniane z poszczególnymi urządzeniami są umieszczane w tak zwanych telegramach (EtherCAT Telegrams). Telegramy rozpoczynają się 10-bajtowym nagłówkiem Telegram Header i są zamykane licznikiem pobrań Working Counter, który zajmuje dwa bajty. Licznik ten jest automatycznie inkrementowany przez urządzenia, które przetwarzają poszczególne telegramy. Możliwość łączenia telegramów EtherCAT w jedną sumaryczną ramkę redukuje nadmiarowość tego rozwiązania. Dane wyjściowe wysyłane przez kontroler w polu danych dedykowanego telegramu są „w locie” wymieniane na dane wejściowe [2].



Rys. 2. Struktura ramki EtherCAT
Fig. 2. Structure of an EtherCAT-frame

Podstawowa struktura ramki protokołu PROFINET IRT jest podobna do struktury ramki EtherCAT (rys. 3). Specyficzne dla tego protokołu bajty kontrolne i dane są także wbudowane w pole danych standardowej ramki Ethernetowej i rozpoczynają się zaraz po wskazaniu typu ramki 0x8892 przez przesłanie 2-bajтового pola identyfikatora Frame ID, który definiuje typ wiadomości PROFINET IO [2]. Zaraz po tym polu następuje pole danych, które przesyłane są do urządzenia.



Rys. 3. Struktura ramki PROFINET IRT
Fig. 3. Structure of a PROFINET IRT frame

Po polu danych następują bajty statusu IOPS (IO-Data Object Producer Status) oraz bajty statusu IOCS (IO-Data Object Consumer Status). Bajty IOPS oraz IOCS są przesyłane dla każdego submodułu wyróżnionego w urządzeniu i wskazują ważność cyklicznego transferu danych. Następnie jest dołączany status APDU (Application Layer Protocol Data Unit). Status APDU zawiera dwubajtowy licznik cykli używany w celu kontroli aktualności ramek w przypadku systemów z redundantnym okablowaniem i jeden bajt statusu danych (Data Status), który określa czy dane są ważne. Status APDU jest zamykany przez 1 bajt statusu transferu (Transfer-Status).

3. Czas cyklu

Systemy pomiarowo-sterujące stosowane w przemyśle oraz wykorzystywane w nich urządzenia, wymieniają w sposób cykliczny pomiędzy sobą dane. Czas cyklu jest określany jako czas niezbędny do jednorazowej wymiany danych wejściowych i wyjściowych pomiędzy kontrolerem i wszystkimi urządzeniami pracującymi w danym systemie. Wartość czasu cyklu rozstrzyga o przydatności systemu do zastosowań z występującymi w nim ograniczeniami czasowymi.

Minimalny czas cyklu t_{ecat} dla EtherCAT, przy założeniu, że dane dla wszystkich urządzeń mieszczą się w jednej ramce komu-

nikacyjnej oraz, że urządzenia pracują w topologii pierścienia, może być wyznaczony w oparciu o wyrażenie:

$$t_{ecat} = t_{med} + n_{dev} t_{ecat_fwd} + t_{ecat_frame} \quad (1)$$

gdzie: t_{med} – opóźnienie wprowadzane przez medium transmisyjne, t_{ecat_fwd} – opóźnienie wprowadzane przez pojedyncze urządzenie EtherCAT podczas przekazania ramki z wejścia na wyjście, n_{dev} – ilość urządzeń slave wyróżnionych w systemie, t_{ecat_frame} – czas wysłania ramki z kontrolera systemu EtherCAT.

Minimalny czas cyklu t_{pn} dla PROFINET IRT, przy założeniu, że urządzenia pracują w topologii liniowej i uwzględniony jest tylko kierunek transmisji od kontrolera do węzłów oraz, że jako pierwsza wysłana jest ramka do najdalszego urządzenia, może być wyznaczony w oparciu o wyrażenie:

$$t_{pn} = t_{med} + t_{pn_fwd} + n_{dev} t_{pn_frame} \quad (2)$$

gdzie: t_{med} – opóźnienie wprowadzane przez medium transmisyjne, t_{pn_fwd} – opóźnienie wprowadzane przez pojedyncze urządzenie PROFINET IRT podczas przekazania ramki z wejścia na wyjście, n_{dev} – ilość urządzeń slave wyróżnionych w systemie, t_{pn_frame} – czas wysłania ramki z kontrolera systemu PROFINET IRT.

W celu wyekspozowania wpływu charakterystycznych właściwości przedstawionych rozwiązań na osiągane wartości czasu cyklu zdefiniowano dwa dodatkowe współczynniki. Pierwszy z nich to współczynnik efektywności cyklu, który jest określony stosunkiem liczby przesłanych bajtów z danymi procesowymi do całkowitej liczby przesłanych bajtów w cyklu. Drugi współczynnik opisuje wpływ opóźnień sprzętowych (medium transmisyjne, poszczególne urządzenia) na osiągane wartości czasu cyklu i jest określony przez stosunek opóźnień powstałych na medium transmisyjnym oraz w poszczególnych urządzeniach do czasu cyklu. Współczynnik efektywności cyklu k_{ef_ecat} dla EtherCAT oraz k_{ef_pn} dla PROFINET IRT został wyznaczony w oparciu o wyrażenie:

$$k_{ef_ecat} = \frac{l_{bd}}{l_{eth} + l_{ecat} + l_{bd}}, \quad k_{ef_pn} = \frac{l_{bd}}{l_{eth} + l_{pn} + l_{bd}} \quad (3, 4)$$

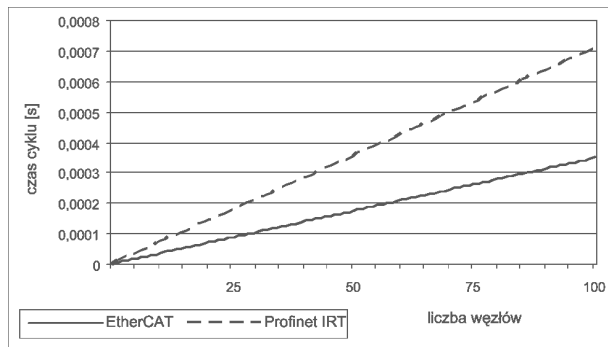
gdzie: l_{bd} - liczba bajtów danych przesłanych w cyklu, l_{eth} - liczba bajtów przesłanych w ramach wynikająca z realizacji protokołu Ethernet, l_{pn} - liczba bajtów przesłanych w ramach wynikająca z realizacji protokołu Profinet IRT, l_{ecat} - liczba bajtów przesłanych w ramach wynikająca z realizacji protokołu EtherCAT.

Współczynnik opóźnień sprzętowych cyklu k_{hd_ecat} dla EtherCAT oraz k_{hd_pn} dla Profinet IRT został wyznaczony w oparciu o wyrażenie:

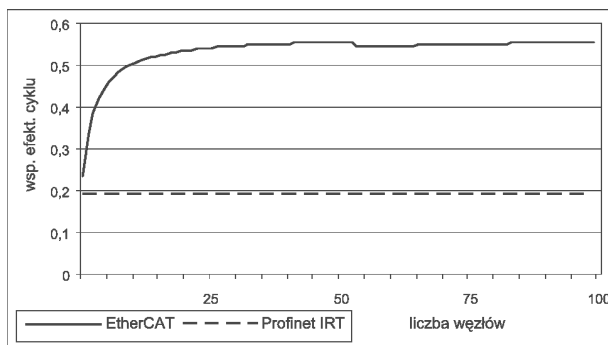
$$k_{hd_ecat} = \frac{t_{med} + n_{dev} t_{ecat_fwd}}{t_{ecat}}, \quad k_{hd_pn} = \frac{t_{med} + t_{pn_fwd}}{t_{pn}} \quad (5, 6)$$

4. Wybrane wyniki badań

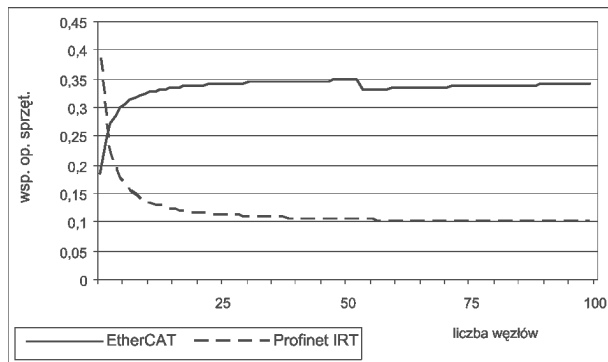
Zamieszczone w artykule wyniki badań dotyczą dwóch przykładowych systemów. W pierwszym systemie liczba przesyłanych do i pobieranych z węzłów bajtów danych była stała i wynosiła 16, liczba węzłów natomiast zmieniała się w od 1 do 50 z krokiem co 1. W drugim systemie liczba węzłów była stała i wynosiła 50, natomiast liczba przesyłanych do i pobieranych z węzłów bajtów danych zwiększała się od 10 do 500 z krokiem co 10. Przyjęto prędkość transmisji danych w systemie równą 100Mb/s. Dla każdego systemu założono wykorzystanie EtherCAT oraz PROFINET IRT i wyznaczono w sposób symulacyjny czas cyklu, współczynnik efektywności cyklu oraz współczynnik opóźnień sprzętowych cyklu. Wybrane wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 4-7.



Rys. 4. Czas cyklu w funkcji liczby węzłów
Fig. 4. The cycle time as a function of the number of devices



Rys. 5. Zależność współczynnika k_{ef_cat} oraz k_{ef_pn} od liczby węzłów
Fig. 5. Dependence of k_{ef_cat} and k_{ef_pn} coefficient on the number of devices



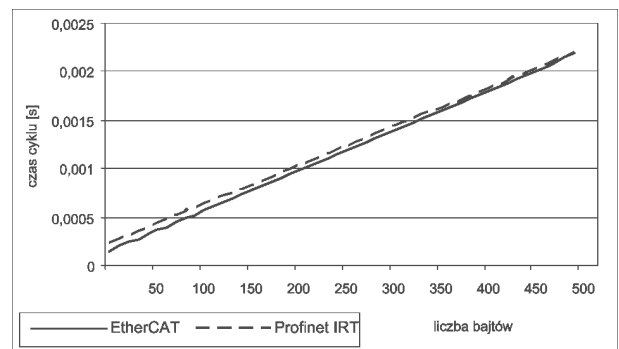
Rys. 6. Zależność współczynnika k_{hd_cat} oraz k_{hd_pn} od liczby węzłów
Fig. 6. Dependence of k_{hd_cat} and k_{hd_pn} on the number of devices

W przypadku systemu o stałej liczbie przesyłanych danych osiągnięte wyniki wyraźnie wskazują przewagę rozwiązania EtherCAT nad rozwiązaniem PROFINET IRT. Osiągnięte czasy cyklu dla EtherCAT (rys. 4) są w przybliżeniu o połowę krótsze od czasu cyklu wyznaczonego dla PROFINET IRT. Jest to głównie konsekwencja zastosowania w EtherCAT ramki sumarycznej do komunikacji kontrolera z urządzeniami. Jednak w obu przypadkach osiągnięte czasy cyklu są poniżej 1 milisekundy. Następstwem stosowania ramki sumarycznej w EtherCAT jest także wyższa wartość współczynnika efektywności cyklu dla tego rozwiązania (rys. 5). Zmiana wartości współczynnika efektywności cyklu dla EtherCAT w przypadku 54 węzłów związana jest z koniecznością przesyłania kolejnej ramki sumarycznej w systemie.

W przypadku współczynnika opóźnień sprzętowych cyklu (rys. 6) niższą wartość w przeważającej części charakterystyki wykazuje rozwiązanie PROFINET IRT i jest to wynik stosowania specyficznej kolejności wysyłanych z kontrolera ramek, w której to jako

pierwsza wysyłana jest ramka do najdalej położonego urządzenia[2].

Dla systemu o stałej liczbie węzłów osiągnięte czasy cyklu dla EtherCAT są na podobnym poziomie jak czasy cyklu wyznaczone dla PROFINET IRT (rys. 7). Z jednej strony jest to głównie konsekwencja przesyłania dużej ilości bajtów danych pomiędzy urządzeniami. W takiej sytuacji zastosowanie ramki sumarycznej w EtherCAT nie zmniejsza w znaczący sposób ilości ramek przesyłanych w systemie. Z drugiej strony specyficzna kolejność przesyłania ramek w PROFINET IRT pozwala na osiągnięcie mniejszych wartości współczynnika opóźnień sprzętowych cyklu niż w EtherCAT. Ewentualne zmniejszenie czasu cyklu dla EtherCAT związane z zastosowaniem ramki sumarycznej jest w PROFINET IRT równoważone bardzo małym współczynnikiem opóźnień sprzętowych cyklu.



Rys. 7. Czas cyklu w funkcji liczby przesyłanych bajtów danych
Fig. 7. The cycle time as a function of the payload per device

5. Podsumowanie

Uwzględnione w artykule rozwiązania Ethernetu przemysłowego EtherCAT oraz PROFINET IRT wykorzystują odmienne metody w celu dostarczenia danych do rozproszonych urządzeń. EtherCAT wykorzystuje ramkę sumaryczną dla wszystkich urządzeń, natomiast PROFINET IRT wykorzystuje dedykowane ramki dla każdego urządzenia. W konsekwencji w zależności od liczby węzłów występujących w systemie bądź od liczby bajtów danych przesyłanych pomiędzy urządzeniami osiągane czasy cyklu mogą być różne lub na podobnym poziomie. W systemach, w których zachodzi potrzeba przesyłania cyklicznie małej liczby bajtów danych pomiędzy urządzeniami zastosowanie rozwiązania EtherCAT pozwoli na osiągnięcie znacznie krótszych czasów cyklu niż w przypadku zastosowania rozwiązania PROFINET IRT. Praktyczne wykorzystanie powyższych rozwiązań jest możliwe tylko w oparciu o specyficzny sprzęt i oprogramowanie.

6. Literatura

- [1] Schnell G., Wiedemann B.: Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2008.
- [2] Jasperneite J., Schumacher M., Weber K.: Limits of Increasing the Performance of Industrial Ethernet Protocols. International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA 2007. Materiały konferencyjne, str. 17-24, 2007.
- [3] Prytz G.: A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT. International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA 2008. Materiały konferencyjne, str. 408-415, 2008.

otrzymano / received: 20.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.12.2012

artykuł recenzowany / revised paper