

Moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych. Omówiono standard komunikacji EtherCAT wraz z opisem działania urządzenia podrzędnego wykorzystującego profil komunikacyjny CiA402. Omówiono budowę i działanie modułu komunikacyjnego. Przedstawiono opis stanowiska badawczego oraz badania weryfikujące poprawność działania opracowanego modułu.

Abstract. The article presents an EtherCAT fieldbus communication module dedicated for electrical drives. The EtherCAT communications standard was described including the description of a slave device with CiA402 communications profile. The module structure and functional principle were described. The experimental setup was presented along with experiments that verify the correct operation of the developed module (**EtherCAT communication module dedicated for electrical drives**).

Słowa kluczowe: magistrala EtherCAT, CiA402, LAN9252, TwinCAT.

Keywords: EtherCAT fieldbus, CiA402, LAN9252, TwinCAT.

Wstęp

W obecnych czasach w wielu działach automatyki przemysłowej powszechnie stosuje się magistrale komunikacyjne. Umożliwiają one szybką wymianę danych pomiędzy sterownikami, układami wykonawczymi i czujnikami tworząc tzw. rozproszone systemy sterowania. W wielu zastosowaniach np. sterowaniu ruchem, istotne jest by dane wymieniane były w czasie rzeczywistym (ang. real time). Jednocześnie zapewniona musi być odpowiednia przepustowość, bezpieczeństwo oraz niezawodność takich sieci.

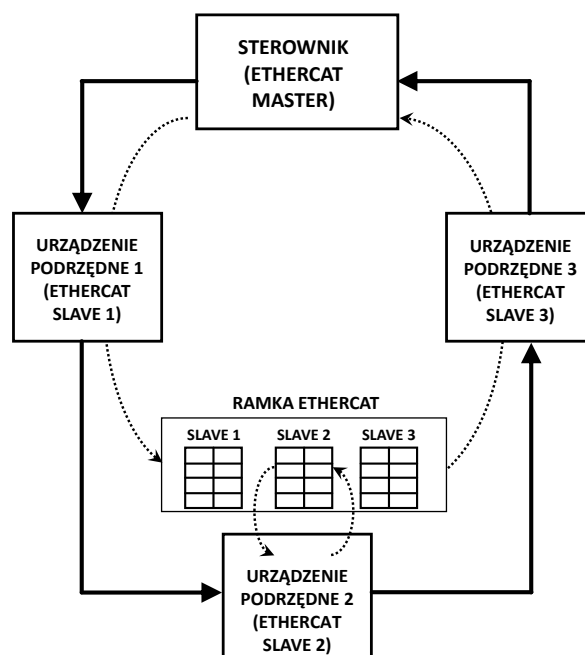
W ostatnich latach, coraz częściej[?] wykorzystuje się sieci bazujące na magistrali Ethernet. Standard ten upowszechnił się ze względu na jego stosunkowo wysoką przepustowość i kompatybilność z technologiami informatycznymi. Specyficzną odmianą standardowego Ethernetu jest Ethernet czasu rzeczywistego, który zapewnia bardzo małe opóźnienia w sieciowej wymianie danych a przez to uzyskanie determinizmu czasowego transmisji. Istnieje wiele odmian tego Ethernetu, do najważniejszych z nich należą: EtherNet/IP, PROFINET, EtherCAT, POWERLINK i SERCOS III [?]. Jednym z najpopularniejszych standardów jest EtherCAT. Standard ten zapewnia wysoką prędkość transmisji (100 Mbps), krótki minimalny czas cyklu komunikacyjnego (nawet 12 μ s) i niewielki czas obsługi pojedynczego węzła sieci (poniżej 1 μ s). Ponadto implementuje mechanizm zegarów rozproszonych, umożliwiający synchronizację węzłów sieci z dokładnością do 1 μ s[?]. Powyższe cechy są szczególnie pożądane w systemach, w których dąży się do synchronicznego sterowania wieloma układami napędowymi, np. w maszynach CNC[?] i robotach[?]. Z tego względu magistrala EtherCAT jest jedną z najczęściej stosowanych w układach rozproszonego sterowania ruchem.

Aby umożliwić komunikację zgodną ze standardem EtherCAT w urządzeniach nowobudowanych i już istniejących należy wyposażyć je w moduł komunikacyjny. Moduł taki implementuje funkcje protokołu komunikacyjnego (tzw. stos magistrali) EtherCAT odciążając główny procesor sterujący urządzenia wykonawczego. W przypadku układów napędowych należy uwzględnić specyfikę tego rodzaju układów wykonawczych oraz zgodność z odpowiednimi standardami. Moduł taki pozwala zwiększyć funkcjonalność zarówno komercyjnych układów napędowych jak również urządzeń budowanych w ramach prac badawczych.

W artykule zaprezentowano moduł komunikacyjny EtherCAT opracowany z myślą o zastosowaniu w napędach elektrycznych. Omówiono standard komunikacji EtherCAT wraz z opisem działania urządzenia podrzędnego wykorzystującego profil komunikacyjny CiA402. Omówiono budowę i działanie modułu komunikacyjnego. Przedstawiono opis stanowiska badawczego wraz z badaniami na nim przeprowadzonym. Przedstawiony moduł komunikacyjny EtherCAT stanowi rozwinięcie prac autorów w dziedzinie układów sterowania napędami z wykorzystaniem Ethernetu czasu rzeczywistego [].

Magistrala EtherCAT

W magistrali EtherCAT występuje jedno urządzenie nadrzędne (master) oraz wiele urządzeń typu podrzędne (slave). Urządzenie master jak i urządzenia slave znajdują się w tym samym segmencie sieci. Pojedyncza sieć z jednym urządzeniem master może obsługiwać do 65535 urządzeń slave. EtherCAT wykorzystuje okablowanie sieci Ethernet składające się z 4 par skręconych przewodów oraz złącza RJ45 (8P8P). Prędkość transmisji jest taka sama jak w Ethernetie i wynosi 100 Mbps. Wykorzystywana jest topologia pierścieniowa przy czym jedna para przewodów służy do przesyłania danych od mastera do slaveów a druga do transmisji w przeciwnym kierunku (full-duplex).



Rys.1. Schemat komunikacji w sieci EtherCAT

W związku z wykorzystaniem standardu Ethernet przez EtherCAT, w urządzeniach typu master można użyć standardowego kontrolera sieciowego Fast Ethernet (karty sieciowej), a host (np. komputer PC) nie potrzebuje dedykowanego sprzętu w postaci procesora komunikacyjnego. W odróżnieniu od urządzeń typu master, urządzenia typu slave wymagają w swojej budowie wykorzystania specjalistycznego kontrolera.

Urządzenie master jest odpowiedzialne za zainicjowanie transferu danych do węzłów slave. Proces komunikacji przebiega w następujący sposób. Najpierw urządzenie master wysyła jedną ramkę Ethernet, która dociera do wszystkich urządzeń slave. Następnie pierwsze z urządzeń slave wyodrębnia dane wejściowe z ramki i wstawia dane wyjściowe do ramki. Zmodyfikowana ramka jest ponownie przesyłana do następnego urządzenia slave. Końcowe urządzenie slave przesyła zmodyfikowaną ramkę do urządzenia nadrzędnego. Z punktu widzenia urządzenia master, wysyłana i odbierana jest tylko jedna ramka danych. Kontroler EtherCAT urządzenia slave w momencie odebrania ramki realizuje jedynie odczyt danych z ramki i zapis danych do ramki. Realizowane jest to „w locie” czyli bez analizowania i przetwarzania ramki przez układ scalony kontrolera. Właściwe przetwarzanie danych przez stos protokołu oraz przygotowanie danych zwrotnych realizowane jest później. Dzięki temu opóźnienia wprowadzane przez węzeł sieci jest minimalne (kilkanaście nanosekund).

Jedna ramka Ethernet zawiera dane różnych urządzeń podrzędnych w danej sieci. Ze względu na przetwarzanie danych sprzętowo przez urządzenia podrzędne, w sieci EtherCAT nie stosuje się mechanizmu CSMA/CD. Czas przesyłania danych jest całkowicie kontrolowany przez urządzenie nadrzędne. Z tego powodu główna platforma obliczeniowa powinna być zdolna do deterministycznej pracy w czasie rzeczywistym, aby zapewnić cykliczne transfery danych z małymi opóźnieniami (niskim jitterem).

Na rysunku nr 2. pokazano strukturę ramki EtherCAT. Protokół EtherCAT wykorzystuje standardową ramkę Ethernet IEEE 802.3. Pole typu ramki ma stałą wartość 0x88A4 oznaczającą protokół EtherCAT. Z punktu widzenia urządzenia master, w sieci EtherCAT realizowana jest standardowa komunikacja typu UDP/IP. W ramce EtherCAT zawarte są 2 bajty nagłówka i od 44 do 1498 bajtów na sekcję danych. Sekcja danych składa się z datagramów, z których każdy zawiera dane dla poszczególnych układów slave.

Rys.2. Schemat struktury ramki EtherCAT

Dane są przesyłane między urządzeniami master-slave w formie danych procesowych (PDO - Process Data Object). Każdy PDO zawiera informację, które umożliwiają weryfikację, czy dane zostały poprawnie odczytane i przetworzone. W niektórych przypadkach dane przeznaczone dla jednego z urządzeń slave nie mogą być przesłane w ramach jednego cyklu komunikacyjnego (jednej ramki Ethernet). W takim wypadku dopuszczalne jest ich pofragmentowanie i przesłanie w kilku cyklach komunikacyjnych.

W magistrali EtherCAT możliwa jest synchronizacja węzłów sieciowych. W tym celu wykorzystywany jest mechanizm zegarów rozproszonych (DC - Distributed Clock). Mechanizm ten pozwala na synchronizację działania wszystkich węzłów sieci z dokładnością mniejszą niż 1 mikrosekunda. W mechanizmie tym zegar jednego z urządzeń podrzędnych w sieci jest zegarem referencyjnym, do którego okresowo synchronizowane są zegary pozostałych urządzeń. W procesie synchronizacji zegarów uwzględniane są opóźnienia propagacji sieci mierzone podczas inicjalizacji sieci. Dzięki temu mechanizmowi wszystkie urządzenia w sieci EtherCAT mogą być wyzwolane jednocześnie. Ma to istotne znaczenie w sterowaniu wielosiowym, gdzie poszczególne napędy muszą poruszać się synchronicznie względem siebie.

Moduł komunikacyjny EtherCAT slave na bazie LAN9252

W protokole EtherCAT zdefiniowane są warstwy fizyczna, łącza danych oraz aplikacji modelu OSI. Warstwy te zrealizowane są inaczej w przypadku urządzeń nadrzędnych i podrzędnych. W celu zapewnienia bardzo szybkiego przetwarzania „w locie” danych zawartych w ramce Ethernetowej przez urządzenia slave, wyposażone są one w dedykowany sterownik ESC (EtherCAT Slave Controller).

W warstwie fizycznej urządzenia podrzędne wykorzystują standardowe złącze RJ45(8P8P), transformatory impulsowe i standardowe układy Ethernet PHY (physical layer). W przypadku warstwy łącza danych wykorzystywane są układy ESC. W niniejszej pracy wykorzystywany jest układ LAN9252[?] firmy Microchip Technology, który ma wbudowane układy Ethernet PHY. Warstwa aplikacji najczęściej implementowana jest programowo w układach mikroprocesorowych, itp. Autorzy w pracy zaimplementowali warstwę aplikacyjną EtherCAT w postaci dedykowanego oprogramowania na 16-to bitowym mikrokontrolerze PIC24HJ128GP306[?] firmy Microchip Technology. Na rysunku nr 3 pokazano schemat modułu komunikacyjnego EtherCAT slave na bazie LAN9252.

Rys.3. Schemat moduł komunikacyjnego EtherCAT slave na bazie LAN9252

Sterownik EtherCAT (ESC) LAN9252 jest dedykowanym układem scalonym umożliwiającym zarządzanie komunikacją pomiędzy magistralą komunikacyjną EtherCAT a warstwą aplikacyjną. LAN9252 obsługuje szeroki zakres aplikacji, w tym wejścia/wyjścia cyfrowe i analogowe, serwonapędy, urządzenia pomiarowe.

Interfejs MII LAN9252 znajduje się pomiędzy układem transformatorów wraz z łączami RJ45(8P8P) warstwy fizycznej a sterownikiem ESC. Wymiana danych z warstwą aplikacyjną na mikrokontrolerze odbywa się przy wykorzystaniu lokalnego interfejsu ESC, który w standardzie EtherCAT nazywany jest PDI (Process Data Interface). Na rysunku nr 4 zaprezentowano schemat blokowy kontrolera ESC LAN9252.

Z punktu widzenia mikrokontrolera PIC24HJ128GP306, układ ECS traktowany jest jako pamięć zewnętrzna, która posiada możliwość generacji przerwań. Poprzez PDI możliwe jest odczytywanie i zapisywanie odpowiednich regionów pamięci w ESC, co przekłada się na realizację transmisji danych z i do mikrokontrolera.

Rys.4. Schemat blokowy kontrolera ESC LAN9252

Układ LAN9252 ma przestrzeń adresową o rozmiarze 8KB. Pierwszy 1KB (0x0000-0x0FFF) dedykowany jest rejestrom konfiguracyjnym ESC. Pamięć RAM danych procesowych rozpoczyna się od adresu 0x1000. Pamięć RAM jest odczytywana i zapisywana przez ramkę EtherCAT lub PDI. ESC musi zostać poprawnie zainicjowany przy każdorazowym uruchomieniu, ponieważ dane konfiguracje nie są w nim zapisywane na stałe. Dlatego, każdy układ ESC wymaga zewnętrznej pamięci EEPROM do przechowywania danych konfiguracyjnych (interfejs I2C). Układ ESC nie zacznie poprawnie działać, dopóki nie zostanie zakończona jego poprawna konfiguracja na podstawie danych odczytanych z pamięci EEPROM.

Rys.5. Schemat blokowy połączenia ESC LAN9252 z mikrokontrolerem PIC24HJ128GP306 poprzez PDI typu SPI.

W kontrolerze ESC LAN9252 można wykorzystać kilka rodzajów interfejsów PDI – interfejs szeregowy SPI, interfejs równoległy lub wejścia i wyjścia cyfrowe. Za konfigurację PDI w układzie ESC odpowiadają rejestry od 0x0140 do 0x0141. W niniejszej pracy został wykorzystany interfejs PDI w trybie SPI. Na rysunku nr 5 przedstawiono schemat blokowy połączenia ESC LAN9252 z mikrokontrolerem PIC24HJ128GP306 poprzez PDI typu SPI. W tym wypadku, urządzenie w trybie SPI master to mikrokontroler, a ESC to SPI slave. Wymiana informacji pomiędzy urządzeniami poprzez interfejs SPI rozpoczyna się, gdy mikrokontroler ustawi stan „0” na linii SPI_SEL. Komunikacja poprzez PDI składa się z fazy przesyłania adresu i fazy przesyłania danych pod zadany adres w ESC. W fazie adresu, master przesyła adres, do którego należy uzyskać dostęp oraz polecenie. W fazie danych prezentowane są dane wyjściowe przesyłane przez urządzenie podrzędne, a dane wejściowe są przesyłane przez urządzenie nadrzędne.

Interfejs PDI odpowiada za synchronizację pracy pomiędzy ESC, a mikrokontrolerem. W samym standardzie EtherCAT istnieją trzy tryby synchronizacji. Są to odpowiednio FreeRun, SM-Synchron i DC-Synchron. W trybie FreeRun urządzenie podrzędne nie generuje sygnału przerwania SPI_IRQ przez ESC. Kontrola wymiany danych poprzez PDI regulowana jest bezpośrednio przez działania mikrokontrolera. W trybie SM-Synchron synchronizacja następuje w wyniku otrzymania ramki Ethernet przez urządzenie slave. ESC wygeneruje sygnał przerwania SPI_IRQ, aby wyzwolić pracę mikrokontrolera do obsługi danych procesowych. W trybie DC-Synchron synchronizacja następuje w wyniku zmiany stanu na linii SYNC, kontrolowanego przez ESC. Sygnał SYNC generowany jest jednocześnie we wszystkich urządzeniach danej sieci EtherCAT. Synchronizacja tego sygnału pomiędzy wszystkimi urządzeniami podrzędnymi nastąpiła dzięki działaniu mechanizmu zegarów rozporoszonych.

Rys.6. Schemat stosu EtherCAT dla urządzenia typu slave

Na rysunku nr 6 przedstawiono schemat stosu EtherCAT dla urządzenia typu slave, który składa się z warstwy dostępu do sprzętu, ogólnego stosu EtherCAT i aplikacji użytkownika. Warstwa dostępu do sprzętu zapewniona jest poprzez PDI. W przypadku wyższych warstw, zaimplementowane są one na mikrokontrolerze PIC24HJ128GP306. W tej warstwie zaimplementowany jest profil komunikacyjny CiA402, który ma kluczowe znaczenie w przypadku budowy interfejsów komunikacyjnych EtherCAT dla urządzeń napędowych.

CiA402 – profil komunikacyjny CANopen dla urządzeń napędowych

EtherCAT w warstwie aplikacyjnej umożliwia wykorzystanie kilku rozwiązań. Najczęściej stosowanym jest protokół CANopen, a dokładniej CoE (CANopen over EtherCAT)[?]. Klasa urządzenia slave (np. moduł we/wy, napęd elektryczny, przetwornik położenia) definiowana jest przez tzw. profil urządzenia (ang. device profile). Profilem CANopen dedykowanym do obsługi napędów elektrycznych jest Can in Automation (CiA) 402[?], który jest określony przez standard IEC[?]. Profil ten definiuje strukturę OD (Object Dictionary) odwzorowującą zmienne procesowe i konfiguracyjne typowe dla napędu elektrycznego. Są to m.in. położenia, prędkości i prąd zadane oraz rzeczywiste, nastawy regulatorów, wartości feed-forward oraz słowa sterujące i statusowe. Umożliwia to utworzenie standardowego interfejsu pomiędzy aplikacją kontrolera ruchu a warstwą komunikacyjną (warstwą aplikacji), niezależnego od rodzaju i producenta sterownika nadrzędnego. W prezentowanym module komunikacyjnym autorzy zaimplementowali profil CiA402 magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych. Każdy z obiektów OD składają się z indeksów 16 bitów i danych. Obiekty indeksów z zakresu od 0x6000 do 0x67FE są określane przez profil CiA402.

Rys.7. Maszyna stanów profilu komunikacyjnego CiA402

Profilu CiA402 przewiduje istnienie maszyny stanów, która ma bezpośredni wpływ na sekwencję sterowania napędem. Silnik nie można uruchomić, dopóki maszyna stanów nie zostanie przełączona w odpowiedni stan. Na rysunku nr 7 przedstawiono maszynę stanów profilu komunikacyjnego CiA402.

Przejścia w maszynie stanów realizowane są w zależności od wartości indeksu 0x6040 o nazwie ControlWord. Stan NOT_READY_TO_SWITCH_ON maszyny stanów jest stanem wewnętrznym w którym komunikacja jest włączona. Użytkownik nie może monitorować tego stanu. SWITCH_ON_DISABLED to stan minimalny, do którego użytkownik ma dostęp. W tym stanie inicjalizacja napędu jest zakończona. Napęd może wykonać przejścia „0” i „1” po automatycznej inicjacji. Napięcie w układzie przekształtnika napędu może się pojawić w stanie READY_TO_SWITCH_ON, jednak dalsze operacje na napędzie wymagają przejścia do następnego stanu. SWITCHED_ON to stan, gdy napęd jest już gotowy, natomiast nadal nie może on otrzymywać poleceń realizacji ruchu. Dopiero stan OPERATION_ENABLE umożliwia pełne wykorzystanie napędu do pracy. W wyniku wystąpienia sytuacji awaryjnej w napędzie, bez względu na dotychczasowy stan maszyna stanów, następuje przeskok do stanu awaryjnego - FAULT.

Poprzez plik opisu urządzenia slave, EtherCAT master może uzyskać informacje o układzie slave i ma wpływ na jego konfigurację. Plik opisu urządzenia slave EtherCAT jest plikiem opisanym w składni XML [?].

Badania modułu komunikacyjnego EtherCAT slave na bazie LAN9252

W celu weryfikacji poprawności działania modułu komunikacyjnego zasymulowano działanie komunikacji z serwonapędem w sieci EtherCAT. W tym celu wykorzystano dedykowany układ deweloperski[?] jako moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych. Jako sterownik nadrzędny (urządzenie master) wykorzystano komputer PC. Schemat blokowy stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku nr 8.

Rys.8. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Funkcje układu master EtherCAT są realizowane na komputerze PC z systemem Windows 10 z zainstalowanym oprogramowaniem TwinCAT 3. Aplikacja TwinCAT wykorzystuje mikro jądro czasu rzeczywistego, które

zapewnia pracę oprogramowania z zachowaniem determinizmu czasowego. W aplikacji TwinCAT możliwa jest implementacja m. in. programowych sterowników PLC oraz sterowników wieloosiowych CNC. Komunikacja z węzłami slave sieci EtherCAT układu master na stanowisku badawczym realizowana jest poprzez kartę sieciową firmy Intel. Dostęp do zasobów karty sieciowej zapewniony jest poprzez dedykowany sterownik czasu rzeczywistego, dostarczony wraz z oprogramowaniem TwinCAT.

Warstwa aplikacji stosu EtherCAT opracowanego modułu komunikacyjnego magistrali EtherCAT została wygenerowana przy pomocy aplikacji EtherCAT Slave Stack Code Tool v.5.12 firmy Beckhoff. W celu poprawnego działania interfejsu PDI mikrokontrolera PIC24HJ128GP306 z układem ESC LAN9252, autorzy pracy opracowali dedykowane oprogramowanie (sterownik) umożliwiające poprawne działanie PDI. Rysunek nr 9 przedstawia moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych.

Rys.9. Zdjęcie modułu komunikacyjnego magistrali EtherCAT przeznaczony dla napędów elektrycznych

Warstwa aplikacji wykorzystuje profil komunikacyjny CANopen CiA402, który może symulować działanie napędu w trybie regulacji prędkości. Symulacja działania napędu polega na odsyłaniu wartości zadanej prędkości otrzymanej z układu master jako wartości rzeczywistej prędkości. Symulacja działania napędu (modułu komunikacyjnego) w aplikacji TwinCAT została przedstawiona na rysunku nr 10.

Rys.10. Symulacja działania napędu (modułu komunikacyjnego) w aplikacji TwinCAT

W celu sprawdzenia poprawności działania modułu komunikacyjnego magistrali EtherCAT zostały przeprowadzone badania podczas jego pracy. Moduł pracował w trybie symulowanej regulacji prędkości z włączoną synchronizacją typu DC-Synchron. Czas cyklu, w którym zadawano kolejne wartości prędkości wynosił 500 μ s. Przeprowadzono pomiar cykliczności generowania sygnału SYNC0 w PDI. SYNC0 sygnalizuje cykl działania zegara rozproszonego wyzwalającego urządzenie wykonawcze. W przypadku napędu elektrycznego oznacza to z reguły przekazanie wartości zadanej położenia, prędkości lub prądu do pętli regulacji napędu. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku nr 11.

Rys.10. Symulacja działania napędu (modułu komunikacyjnego) w aplikacji TwinCAT

Zgodnie z oczekiwaniami, zmiana sygnału SYNC0 następuje co 500 μ s, co potwierdza poprawność działania modułu komunikacyjnego. Uzyskanie krótszych czasów cykli zadawania kolejnych wartości prędkości wymagałoby przeprowadzenia dogłębnej konfiguracji komputera oraz oprogramowania sterującego TwinCAT. Autorzy uważają to za ciekawy kierunek dalszych badań, który będzie kontynuowany w przyszłości. W szczególności moduł komunikacyjny może być zaimplementowany w eksperymentalnych układach napędowych do badania zaawansowanych metod regulacji, innych niż klasyczne regulatory kaskadowe. Mogą to być np. regulatory adaptacyjne, predykcyjne, skrośne, powtarzalne i inne [?12,?13].

Moduł komunikacyjny posłuży również jako platforma do testowania opracowywanych urządzeń wykonawczych komunikujących się poprzez magistralę EtherCAT (np. modułów wejścia/wyjścia, modułów pomiarowych).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT dedykowany do napędów elektrycznych. Moduł zaimplementowano z wykorzystaniem układu scalonego Microchip LAN9252 oraz mikrokontrolera PIC24HJ128GP306. W mikrokontrolerze

zaimplementowano stos magistrali EtherCAT z protokołem warstwy aplikacyjnej CANOpen. Warstwę aplikacyjną rozbudowano o protokół CiA402 dedykowany dla napędów elektrycznych. Moduł wykorzystuje popularny interfejs mikrokontrolerowy SPI dzięki czemu może być zintegrowany z dowolnym napędem elektrycznym. Moduł przeznaczony jest do rozbudowy nowo opracowywanych i już istniejących napędów elektrycznych o komunikację zgodną z powszechnie przyjętym standardem EtherCAT. Dotyczy to zarówno urządzeń komercyjnych jak również napędów opracowywanych w ramach prac badawczych.

Badania zostały sfinansowane przez Zakład Energoelektroniki "TWERD" Sp. z o.o., w ramach grantu Voucher Badawczy województwa Kujawsko-Pomorskiego „Moduł komunikacyjny EtherCAT do inwerterów dla energetyki odnawialnej” nr ????.

LITERATURA

- [1] Fitzpatrick M., Machining and CNC technology, *McGraw Hill Higher Education*, (2013)
- [2] Paprocki M., Erwiński K., Grzesiak L. M., Minimalizacja błędów nadążania w wielosiowych maszynach CNC poprzez zastosowanie sterowania predykcyjnego z neuronowym modelem obiektu regulacji., *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.4b, 169-174
- [3] Erwiński K, Paprocki M., Wawrzak A., Grzesiak L. M., PSO based feedrate optimization with contour error constraints for NURBS toolpaths, *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, (2016), 1200-1205
- [4] Szczepański R., Erwiński K, Paprocki M., Accelerating PSO based feedrate optimization for NURBS toolpaths using parallel computation with OpenMP, *22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, (2017), 431-436
- [5] Paprocki M., Wawrzak A., Erwiński K., PC-based CNC machine control system with LinuxCNC software, *Measurement Automation Monitoring*, 63 (2017), 15-19
- [6] Erwiński K., Paprocki M., Grzesiak L. M., Karwowski K., Wawrzak A., Application of Ethernet Powerlink for communication in a Linux RTAI open CNC control system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (2013), n.2, 628-636
- [7] Przybył, A. Smolağ, J. Kimla, P., Rozproszony system sterowania obrabiarką numeryczną bazujący na sieci Ethernet Czasu Rzeczywistego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), n.2, 342-346
- [8] Hambarde P., Rachit V., Jha S., he survey of real time operating system: RTOS, *International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies*, (2014)
- [9] Paprocki M., Wawrzak A., Erwiński K., Kłowskiak M., Elastyczny układ sterowania CNC maszyn bazujący na PC, *Mechanik*, 91 (2018), n.4, 299-303
- [10] Zurawski R., *Industrial Communication Technology Handbook*, CRC Press, (2014)
- [11] Wu X., Xie L., Performance evaluation of industrial Ethernet protocols for networked control application, *Control Engineering Practice*, 84 (2019), 208-217
- [12] Szczepański R., Tarczewski T., Grzesiak L.M., Zieliński M., Adaptive state feedback speed controller for PMSM based on Artificial Bee Colony algorithm, *Applied Soft Computing*, 83 (2019)
- [13] Wu J., Liu C., Xiong Z., Ding H., Precise contour following for biaxial systems via an A-type iterative learning cross-coupled control algorithm, *International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, 93 (2015), 10-18

Autorzy: dr inż. Marcin Paprocki, E-mail: zwirek@fizyka.umk.pl; dr inż. Krystian Erwiński, E-mail: erwin@fizyka.umk.pl; Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń; prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej; ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: lmg@isep.pw.edu.pl;