

Stefan DOMEK<sup>1</sup>, Mirosław PAJOR<sup>2</sup>  
Krzysztof PIETRUSEWICZ<sup>1</sup>, Łukasz URBAŃSKI<sup>1</sup>

## **EKSPERYMENTALNY SYSTEM *OCEAN* OTWARTEGO STEROWANIA NAPĘDAMI LINIOWYMI**

System sterowania *OCEAN* (*Open modular Control system for linEAR motion drive*) jest systemem otwartym, opracowanym i wykonanym w ramach projektu badawczo - rozwojowego R03 042 02. W artykule omówiono strukturę sprzętowa i programową tego systemu oraz funkcjonalność jego modułów z uwzględnieniem funkcji inteligentnych. Będzie on stanowił bazę dla dalszych prac nad konstrukcją i sterowaniem obrabiarką inteligentną.

### 1. WPROWADZENIE

Większość współcześnie wykorzystywanych systemów sterowania obrabiarek sterowanych numerycznie (CNC) to systemy całkowicie zamknięte dla użytkownika [7],[13]. Inżynierowie zwykle mogą jedynie oprogramować działanie maszyny na podstawowym poziomie użytkownika dotyczącym programu obróbki skrawaniem. Nawet, jeżeli modyfikacja jest bardzo prosta z uwagi na zaawansowane rozwiązania informatyczne interfejsu operatora maszyny (w tym dzięki wizualizacji 3D, symulacji procesu przed obróbką, predefiniowane cykle obróbcze czy funkcje systemów CAD/CAM oraz kontrolę kolizji narzędzia), to funkcje te nie mogą zwykle być w prosty sposób modyfikowane przez użytkownika. Otwartość jest ostatnimi czasy modną cechą wszelkiego rodzaju układów sterowania. Otwarta architektura układu sterowania, jakkolwiek byłby rozumiana przez projektantów, jest zauważalnym trendem w technologii współczesnych systemów sterowania [3],[13-14],[16].

Prace nad systemami sterowania o otwartej architekturze dla obrabiarek CNC prowadzone były zarówno w Stanach Zjednoczonych, Europie jak i w Azji. Spośród licznych rozwiązań do najpopularniejszych zaliczyć należy:

---

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

<sup>2</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Al. Piastów 19, 70-311 Szczecin

- architektura OSACA. Rozwiązania tej architektury dotyczyły głównie rozwiązań programowych [11];
- architektura OSEC. Jej założenia sięgają zarówno samych komponentów automatyki jak i zagadnień logistyki czy wsparcia technicznego serwisu maszyn technologicznych [12];
- architektura HOAM-CNC. Założenia tej architektury skupiały się głównie na warstwie sprzętowej rozwiązania systemu sterowania, włączając w to nowe rodzaje czujników, czy dedykowane do realizacji specjalistycznych funkcjonalności moduły [2];
- architektura OMAC. Obecnie najpopularniejsza w przemyśle architektura, głównie z uwagi na obszerność i elastyczność założeń, zarówno w warstwie sprzętowej jak i programowej [10].

Opracowany system OCEAN (*Open modular Control system for linEAR motioN drive*) bazuje na architekturze wypracowanej przez organizację OMAC. Niniejszy artykuł opisuje architekturę sprzętowo-programową tego systemu z uwzględnieniem funkcji inteligentnych.

## 2. INTELIGENCJA W SYSTEMIE STEROWANIA CNC

Podstawowym wynikiem realizacji projektu badawczo - rozwojowego R03 042 02 02 „Opracowanie i badania prototypu obrabiarkowego zespołu posuwowego z napędami liniowymi sterowanego w dwóch osiach z układu CNC o otwartej architekturze” był prototypowy otwarty system sterowania obrabiarki CNC, na którym zaimplementowane zostały procedury:

- sterowania napędami,
- wizualizacji,
- komunikacji systemu sterowania z innymi urządzeniami/maszynami, jak również interfejs dla integracji funkcji „inteligentnych” obrabiarki,
- nadzorowania stanu dynamicznego systemu obrabiarka – proces skrawania.

Procedury sterowania zespołem posuwowym oraz opracowane procedury diagnostyki i nadzorowania stanu dynamicznego systemu obrabiarka – proces skrawania, zaimplementowane zostały w rzeczywistym układzie sterowania. Przeprowadzone badania stanowiły jeden z etapów prac nad konstrukcją obrabiarki „inteligentnej”, której schemat przedstawiono na rysunku 1.

Prawidłowe zdiagnozowanie zaistnienia niekorzystnych stanów dynamicznych jest podstawą podjęcia dalszych kroków zmierzających do uruchomienia procedur przeciwdziałających tym zjawiskom.

W koncepcji obrabiarki „inteligentnej” wszystkie podsystemy cząstkowe:

- aktywnej kontroli prędkości obrotowej wrzeciona,
- aktywnej eliminacji drgań,
- aktywnej kontroli układu zamocowania przedmiotu obrabianego,
- aktywnej kontroli pracy narzędzia, monitorowanie sił skrawania (np. poprzez pośrednią analizę prądów w poszczególnych napędach osi/elementów wykonawczych), diagnostyki stanu narzędzia na podstawie symptomów obserwowanych podczas realizacji procesu skrawania,

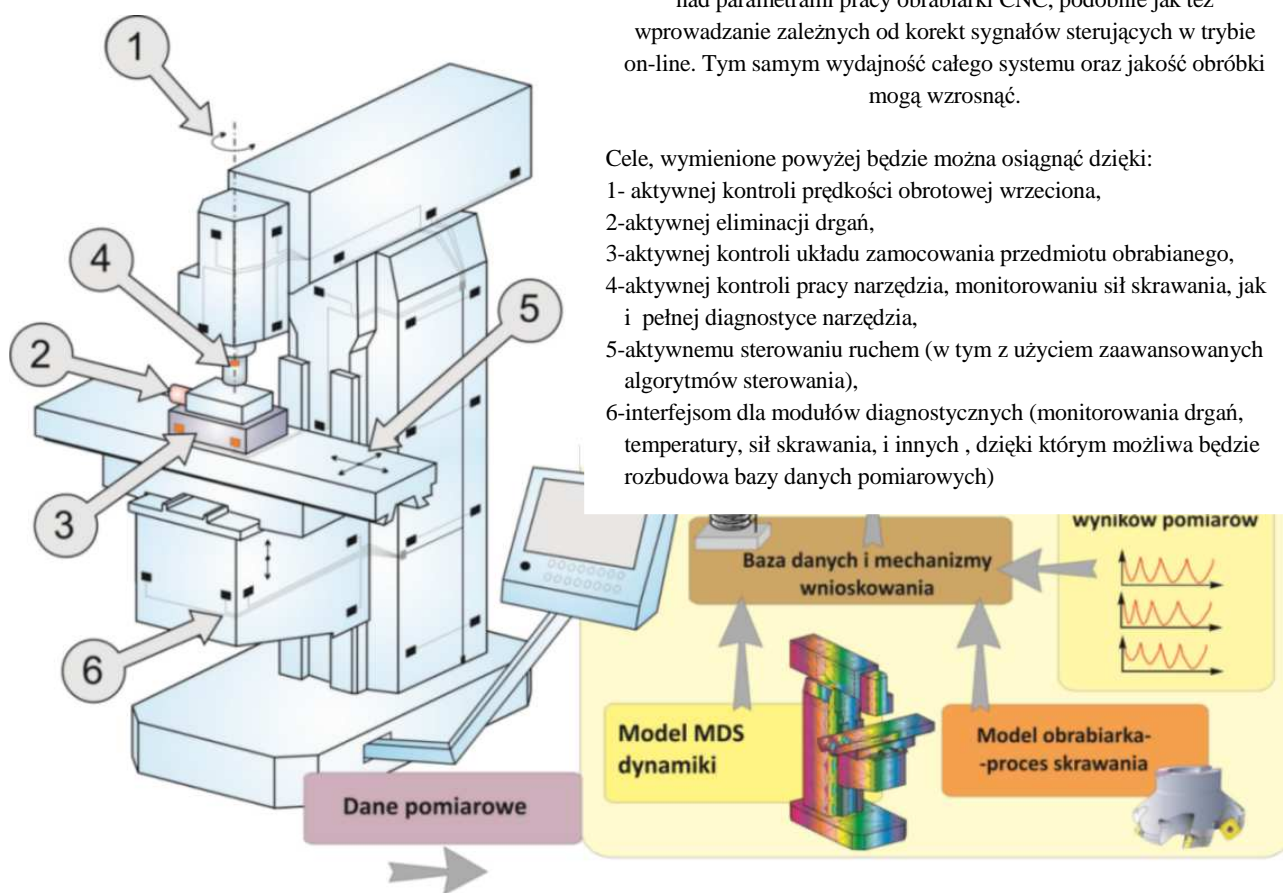
- aktywnego sterowania ruchem (również z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji),
  - analizy w czasie rzeczywistym informacji diagnostycznych pochodzących zarówno z sygnałów standardowo dostępnych pomiarowo jak i dodatkowych pomiarów specjalistycznych (dźwięk, drgania, temperatura elementów korpusowych maszyny),
- winny być zintegrowane w jeden kompleksowy hierarchiczny system kontrolowany przez jednostkę centralną układu CNC.

#### Otwarty system sterowania CNC

Najistotniejszą funkcją opracowanego systemu jest aktywny nadzór nad parametrami pracy obrabiarki CNC, podobnie jak też wprowadzanie zależnych od korekt sygnałów sterujących w trybie on-line. Tym samym wydajność całego systemu oraz jakość obróbki mogą wzrosnąć.

Cele, wymienione powyżej będzie można osiągnąć dzięki:

- 1- aktywnej kontroli prędkości obrotowej wrzeciona,
- 2- aktywnej eliminacji drgań,
- 3- aktywnej kontroli układu zamocowania przedmiotu obrabianego,
- 4- aktywnej kontroli pracy narzędzia, monitorowaniu sił skrawania, jak i pełnej diagnostyce narzędzia,
- 5- aktywnemu sterowaniu ruchem (w tym z użyciem zaawansowanych algorytmów sterowania),
- 6- interfejsom dla modułów diagnostycznych (monitorowania drgań, temperatury, sił skrawania, i innych, dzięki którym możliwa będzie rozbudowa bazy danych pomiarowych)



Rys. 1. Koncepcja systemu sterowania obrabiarki „inteligentnej”  
Fig. 1. Conception for „intelligent” machine tool control system

Zagadnienie integracji tych podsystemów zrodziło wiele problemów, zarówno natury funkcjonalnej jak i implementacyjnej, wynikających m.in. z niekorzystnych wzajemnych sprzężeń jednocześnie działających podsystemów.

System nadzoru pracy obrabiarki „inteligentnej” wyposażony jest w odpowiednie interfejsy komunikacyjne dla celów implementacji baz danych, algorytmów obliczeniowych, interfejsy dla implementacji modeli obrabiarki (drganiowego,

termicznego). Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie w pracy obrabiarki modeli procesów roboczych stworzonych na podstawie zebranych danych eksperymentalnych z testów, które w przyszłości będą prowadzone na obrabiarce.

Opracowany system posiada funkcje, dzięki którym wspomniane elementy będą mogły stanowić źródło wiedzy niezbędnej do wnioskowania oraz wyboru strategii sterowania, a osiągnięty wysoki poziom otwartości umożliwia adaptację do zmiennych w czasie warunków pracy.

### 3. FUNKCJONALNOŚĆ MODUŁÓW PROGRAMOWYCH SYSTEMU *OCEAN*

System sterowania *OCEAN* wymagał wcześniejszego przygotowania funkcji bezpośrednio odpowiedzialnych za:

- sterowanie pracą serwonapędów (realizację podstawowych ruchów urządzeń),
- analizę instrukcji sterujących pracą obrabiarki CNC (G kodów),
- aplikacje łączące poszczególne elementy systemu,
- aplikacje obsługi serwera OPC,
- bazy danych procesowych
- aplikacje wizualizacyjne.

Na oprogramowanie bazowe komputerowego systemu sterowania składają się dwa podstawowe moduły:

- moduł sterowania maszyną/napędami,
- moduł wizualizacji – interfejs operatora.

Od strony programowej system podzielić można na następujące moduły logiczne, zaprezentowane w sposób graficzny na rysunku 2 [6].

**OCEAN.drive.** Moduł sterowania układem napędowym; wartością zadaną dla poszczególnych osi napędowych są korygowane wartości pozycji osi wirtualnych, sterowanych z poziomu dekodera programu obróbki; tryb ruchu odbywa się poprzez zadawanie pozycji bez zatrzymania w punkcie końcowym danego fragmentu procedury ruchu. W ramach modułu wyróżnia się:

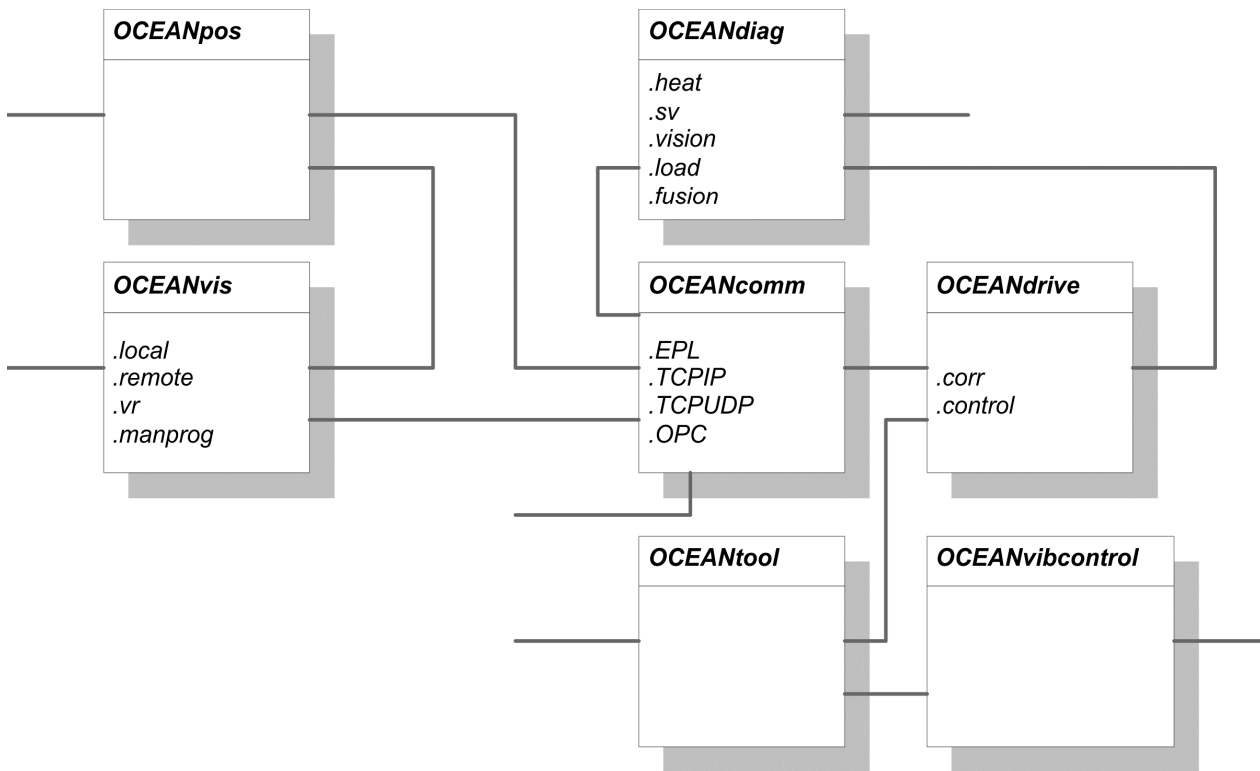
- **OCEAN.drive.corr.** Obsługa addytywnych (wartości zadanych pozycji, prędkości, prądu) i parametrycznych (parametrów regulatorów, profili ruchu, parametrów obróbki) korekt pracy układu napędowego,
- **OCEAN.drive.control.** Moduł, który w przyszłości pozwoli na implementację własnych, opracowanych przez użytkownika algorytmów regulacji w serwonapędzie obrabiarki. Dodatkowo, pozwoli na uwzględnianie w pracy serwonapędu rezultatów działania elementów modułu *OCEAN.diag*, jako uzupełnienie informacji z enkoderów/liniałów pomiarowych.

**OCEAN.vis.** Moduł wizualizacji, interfejsu operatora oraz innych elementów związanych z wizualizacją procesu. W skład modułu obsługi wizualizacji wchodzi:

- **OCEAN.vis.local.** Funkcje związane z lokalnym interfejsem operatora,
- **OCEAN.vis.remote.** Funkcje związane ze zdalnym dostępem do interfejsu operatora oraz zmiennych/informacji z procesu obróbki. Technologie

wykorzystywane tutaj to VNC (*Virtual Network Communication*) oraz WWW. Dla funkcjonalności tego modułu przydatne są funkcje modułu *OCEAN.comm*,

- **OCEAN.vis.vr**. Funkcje związane z obsługą obrabiarki w środowisku wirtualnej rzeczywistości (*Virtual Reality*),
- **OCEAN.vis.manprog**. Moduł powiązany z *OCEAN.vis.vr* w przyszłości posłuży do manualnego programowania obrabiarki w wirtualnej rzeczywistości.



Rys. 2. Architektura programowa systemu sterowania  
Fig. 2. Software architecture of the control system

**OCEAN.vibcontrol**. Moduł integrujący aktywny eliminator drgań z systemem sterowania obrabiarki. Zakupiony system prototypowania dSpace służy do sterowania eliminatorem drgań oraz realizuje część obliczeń diagnostycznych.

W ramach projektu *OCEAN* zdefiniowano także strukturę oraz warunki komunikacji trzech kolejnych modułów programowych, które docelowo dołączone będą do systemu sterowania obrabiarki. Ich szczegółowe funkcjonalności realizowane są w ramach prac wykonywanych w równolegle prowadzonych komplementarnych projektach badawczych:

**OCEAN.tool**. Zestaw interfejsów związanych z obsługą narzędzi inteligentnych.

**OCEAN.pos**. Moduł integracji zautomatyzowanego pozycjonowania materiału do obróbki na stoliku obrabiarki (m.in. celem minimalizacji ubytków materiału skrawanego).

**OCEAN.diag**. Moduł obsługi funkcji diagnostycznych i podejmowania decyzji oraz monitorowania warunków pracy układu obrabiarka-narzędzie-proces skrawania-element obrabiany (*Integrated Condition Monitoring*). Obejmuje następujące, wstępnie zbadane

funkcje (w ramach raportowanego projektu opracowano interfejsy wymiany danych w opracowanym systemie sterowania):

- **OCEAN.diag.heat.** Funkcje związane z zagadnieniami termicznymi w pracy obrabiarki. Moduł wypracowywać będzie konkluzję dla modułu *OCEAN.drive.corr*, celem zapewnienia poprawy pracy układu napędowego;
- **OCEAN.diag.sv.** Moduł analizy dźwięku i drgań podczas pracy obrabiarki (Sound & Vibration). W niniejszym projekcie do sprzętowej realizacji funkcji ICM wykorzystano platformę sprzętową cRIO firmy National Instruments wraz z modułem Dynamic Signal Acquisition (51200 próbek/sekundę, standard IEPE/ICP dla podłączenia czujników przyspieszeń/dźwięku);
- **OCEAN.diag.vision.** Moduł obsługi systemów wizyjnych, stosowanych do analizy statystycznej produkcji i monitorowania stanu narzędzi i stanu powierzchni po obróbce;
- **OCEAN.diag.load.** Moduł monitorowania sił skrawania oraz obciążenia poszczególnych osi napędowych obrabiarki;
- **OCEAN.diag.fusion.** Moduł sprzętowej syntezy informacji z czujników o różnym charakterze. Dzięki funkcjonalności tego modułu możliwe będzie łączenie różnych kombinacji sygnałów diagnostycznych.

Istotne jest przy tym, że funkcjonalności poszczególnych bloków funkcyjnych opracowanych w ramach systemu stworzone są z użyciem normatywnego (IEC 61131-3) języka programowania systemów sterowania, jakim jest język *Structured Text* [1],[8-9],[15] i to zarówno w zakresie interfejsu zmiennych (deklaracji zmiennych) jak i samej implementacji (kodu bloku funkcyjnego). Takie podejście zapewnia 100% konwersję opracowanych w projekcie kodów na platformy systemów sterowania innych producentów, aniżeli wykorzystany w projekcie. Dla zapewnienia przejrzystości opracowanej struktury funkcjonalnej systemu zastosowano język programowania wysokiego poziomu, jakim jest *Continuous Function Chart*, charakterystyczny dla dużych systemów automatyki procesowej DCS (*Distributed Control Systems*).

Przyjęcie opisanych tutaj założeń (wymagań) co do zakresu funkcjonalności opracowywanego w projekcie systemu sterowania wymagało dobrania szerokiej gamy zaawansowanych technologicznie komponentów sprzętowych. Zgodnie z założeniami, wybrano komponenty typowe dla rozwiązań przemysłowych, określając jednocześnie poziom i wymagania co do ich możliwości funkcjonalnych.

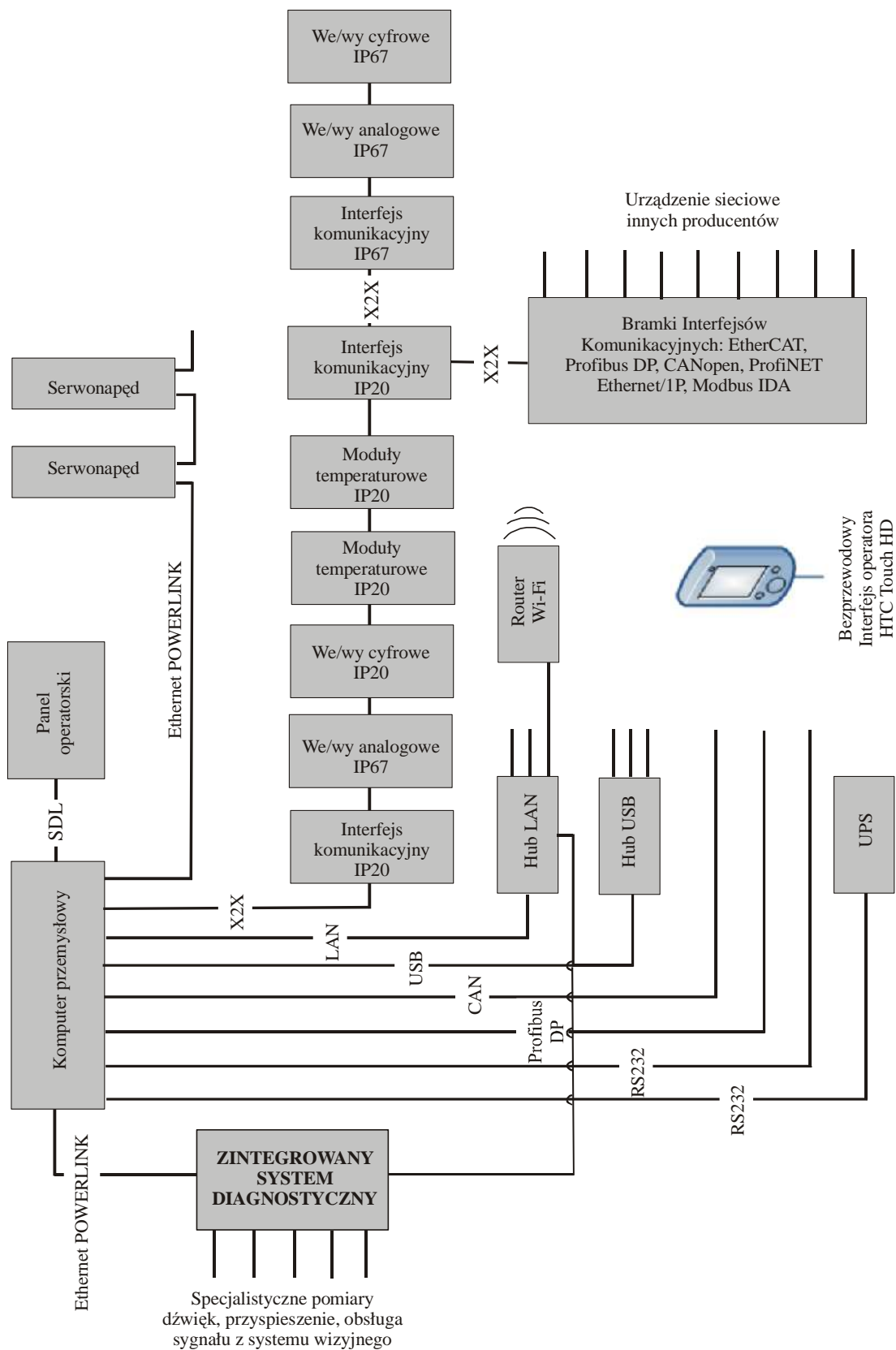
#### 4. ARCHITEKTURA SPRZĘTOWA SYSTEMU *OCEAN*

W ramach jednego z zadań projektu *OCEAN* zmontowano komponenty układu sterowania i nadzoru. Opracowano dokumentację projektu elektrycznego szafy sterowniczej prototypowego układu sterowania. Zakupiono wszystkie kluczowe komponenty modułowego systemu szybkiego prototypowania (komputera sterującego oraz osprzętu dSpace), według poniższej specyfikacji:

- komputer przemysłowy APC620 firmy Bernecker&Rainer – Intel Pentium M 1.8GHz, 1GB RAM, 40GB HDD, DVD-RW, z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego bazującym na VxWorks,
- panel z dotykowym ekranem ciekłokrystalicznym wraz z dodatkowymi przyciskami uzupełniającymi interfejs operatora,
- karty interfejsów komunikacyjnych: Profibus DP, CAN, Ethernet Powerlink, X2X,
- stacja rozproszonych wejść/wyjść w klasie ochronności IP20 (do zabudowy w szafie): 24 wejścia cyfrowe, 8 wejść analogowych, 4 wejścia pełnego mostka tensometrycznego, 20 wejść temperaturowych rezystancyjnych, 8 wyjść analogowych, 24 wyjścia cyfrowe, 8 wyjść cyfrowych 2A,
- stacja rozproszonych wejść/wyjść w klasie ochronności IP67 (do montażu na maszynie): 16 wejść/wyjść cyfrowych, 2 wejścia/2 wyjścia analogowe napięciowe, 2 wejścia/2 wyjścia analogowe prądowe,
- przemysłowy HUB sieci Ethernet,
- serwonapędy cyfrowe ACOPOS wraz z okablowaniem,
- system modułowy dSpace.

Na rysunku 3 zaprezentowano architekturę sprzętową opracowanego systemu sterowania, wskazującą na wysoki poziom otwartości opracowanego rozwiązania. Możliwe jest dowolne rozbudowywanie interfejsów zarówno komunikacyjnych jak i sygnałowych o dowolne standardy. Centralnym elementem systemu jest komputer przemysłowy, komunikujący się z panelem operatorskim za pomocą dedykowanego łącza SDL. Do komputera przemysłowego dołączone są:

- moduły komunikacyjne, wejść/wyjść sygnałowych, w standardach wykonania IP20 (do szafy sterowniczej) oraz w standardzie IP67 (do montażu bezpośrednio na maszynie); komunikacja pomiędzy tymi modułami odbywa się z pomocą dedykowanej sieci komunikacyjnej X2X,
- bramki interfejsów komunikacyjnych, dzięki którym możliwe jest dołączenie urządzeń innych producentów, pracujących w sieci z użyciem protokołów takich, jak: EtherCAT, Profibus DP, CANopen, ProfiNet, Ethernet/IP, czy Modbus IDA;
- HUB USB, dzięki któremu możliwe jest podłączenie wielu urządzeń, pracujących w tym standardzie,
- HUB LAN/Router WLAN, dzięki któremu (w zabezpieczony z użyciem protokołu WPA2-PSK) możliwa jest komunikacja komputera sterującego z urządzeniami zewnętrznymi, jak np., bezprzewodowy kolorowy, dotykowy interfejs operatora, do którego opracowania wykorzystano palmtopa firmy HTC, model Touch HD (na którym uruchomiono aplikację klienta technologii serwerowej VNC) o rozdzielczości 480x800 pikseli,
- serwonapędy, komunikujące się z jednostką centralną z użyciem otwartego deterministycznego przemysłowego protokołu komunikacyjnego Ethernet Powerlink,
- system diagnostyczny, na który składają się: sterownik czasu rzeczywistego (z systemem operacyjnym VxWorks) NI cRIO-9014, moduł NI 9234 Sound&Vibration (51.2kS/s, 4 wejścia IEPE, 2mA), układ FPGA NI9113 (Virtex-5 firmy Xilinx; obudowa montażowa modułów), moduł Master Ethernet Powerlink dla sterowników cRIO; sterownik cRIO komunikuje się z komputerem sterującym za



Rys. 3. Architektura sprzętowa systemu sterowania O.C.E.A.N.

Fig. 3. Hardware architecture of the O.C.E.A.N. control system



- pomocą protokołów Ethernet Powerlink oraz Ethernet TCP/IP, zamiennie z TCP/UDP; w ten sposób dane o drganiach, z pomiarów akustycznych przekazywane są po analizie bezpośrednio do systemu sterowania CNC,
- system bezpieczeństwa zgodny z normą PLCopen Safety.

## 5. PODSUMOWANIE

Wymiernym efektem zrealizowanych prac projektowych i badawczych, projektu badawczo - rozwojowego R03 042 02, było wykonanie eksperymentalnego, otwartego układu sterowania CNC oraz studialnej konstrukcji obrabiarkowego zespołu przewodnicowego najnowszej generacji [5] i prototypowego systemu diagnostycznego [4]. Układy te przekazane zostały innowacyjnej jednostce badawczo-rozwojowej, jaką jest Centrum Mechatroniki ZUT w Szczecinie i stanowić będą podstawowy obiekt badawczy, na bazie którego będą kontynuowane dalsze prace, których celem będzie pełna realizacja koncepcji obrabiarki „inteligentnej”. Stwarza to warunki do powstania nowych rozwiązań innowacyjnych z obszaru wysokich technologii w zakresie mechatroniki obrabiarkowej.

### EXPERIMENTAL OPEN CONTROL SYSTEM OCEAN FOR LINEAR DRIVES

The paper presents an open control system OCEAN elaborated and carried out in a frame of research - development project R03 042 02, and destination for control machine tool, linear drives, in two axes. The hardware and software structure has been discussed and its modules functionality concerning intelligent functions. The system will be a base for further investigations on design and control of intelligent machine tools.

### LITERATURA

- [1] *Practical industrial programming using IEC 61131-3 for PLCs*, IDC Technologies, 2007.
- [2] ASATO O.L., KATO E.R.R., INAMASU R.Y., PORTO A.J.V., 2002, *Analysis of open CNC architecture for machine tools*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, XXIV, 208-212.
- [3] BIN L., YUN-FEI Z., XIAO-QI T., 2004, *A research on open CNC system based on architecture/component software reuse technology*, Computers in Industry, 55, 73-85.
- [4] DOMEK S., DWORAK P., PIETRUSEWICZ K., 2010, *Zintegrowany system monitorowania warunków pracy układu napędowego obrabiarki sterowanej numerycznie*, Przegląd Elektrotechniczny, 86/6/113-115.
- [5] DOMEK S., PAJOR M., PIETRUSEWICZ K., URBAŃSKI Ł., 2009, *Otwarty modułowy system sterowania obrabiarki CNC*, Modelowanie inżynierskie, 6/37/77-82.
- [6] DOMEK S., PIETRUSEWICZ K., 2009, *Mechatronika w doskonaleniu konwencjonalnych urządzeń technicznych na przykładzie obrabiarki wielofunkcyjnej*, Przegląd Elektrotechniczny, 85/9/81-87.
- [7] HABRAT W., 2007, *Obsługa i programowanie obrabiarek CNC*, Podręcznik operatora Wydawnictwo i Handel Książkami "KaBe" s.c.
- [8] JOHN K.-H., TIEGELKAMP M., 2010, *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids*, 2 ed. Heidelberg: Springer-Verlag.

- 
- [9] ÖHMAN M., JOHANSSON S., ARZÉN K.-E., 1998, *Implementation aspects of the PLC standard IEC 1131-3*, Control Engineering Practice, 6/547-555.
- [10] OMAC API Work Group, 1999, *OMAC API SET working document*, version 0.20.
- [11] OSACA Consortium, 1996, *Open system architecture for controls within automation (OSACA) systems. ESPRIT III project Final Report*.
- [12] OSE Consortium, 1998, *OSEC-II project technical report - development of open system environment for controller (OSEC)*, Technical Report.
- [13] PIETRUSEWICZ K., 2008, *CNC open architectures*, Control Engineering, 55/1/17-18.
- [14] PRITSCHOW G., ALTINTAS Y., JOVANE F., KOREN Y., MITSUISHI M., TAKATA S., VAN BRUSSEL H., YAMAZAKI K., 2001, *Open controller architecture - past, present and future*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50/2/463-470.
- [15] RZOŃCA D., SADOLEWSKI J., STEC A., ŚWIDER Z., TRYBUS B., TRYBUS L., 2008, *Programming controllers in structured text language of IEC 61131-3 standard*, Journal of Applied Computer Science, 16/1/49-67.
- [16] YONGLIN C., 2005, *An evaluation space for open architecture controllers*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26/351-358.