

Projektowanie mechatroniczne. Technika *Hardware-in-the-loop* a założenia Industry 4.0

Krzysztof Pietruszewicz

1. Wprowadzenie

W artykule niniejszym przedstawiono technikę symulacji, w ramach której w trybie czasu rzeczywistego weryfikacji podlega część oprogramowania związanego ze sterowaniem, model obiektu sterowania wraz z czujnikami oraz elementami wykonawczymi, jak również środowisko (otoczenie), w którym obiekt sterowania funkcjonuje. Założenia Industry 4.0 kładą duży nacisk na techniki symulacji procesów produkcji oraz funkcjonowania maszyn w otoczeniu produkcyjnym. Technika *Hardware-in-the-loop* wspiera te założenia, zapewniając bezpieczny dla otoczenia sposób weryfikacji innowacyjnych strategii oraz algorytmów sterowania.


W artykule [1] przedstawiono dziewięciostopniowy model [2] rozwoju zespołów badawczych oraz przedsiębiorstw, stosujących w swoich procesach projektowych podejście bazujące na modelach. W niniejszym artykule skupiono się na technice znanej powszechnie jako *Hardware-in-the-loop simulation*. Dzięki zastosowaniu narzędzi z tej grupy możliwe staje się testowanie maszyn oraz nowych koncepcji sterowania nimi bez obawy o fizyczne uszkodzenia niekiedy bardzo kosztownych elementów wykonawczych. Poniżej przybliżono główne założenia techniki HIL.

2. Założenia *Hardware-in-the-loop*

W artykule [1] wskazano na różnice pomiędzy podejściem naukowym do prototypowania algorytmów regulacji a podejściem korzystającym ze sprzętowych platform docelowych.

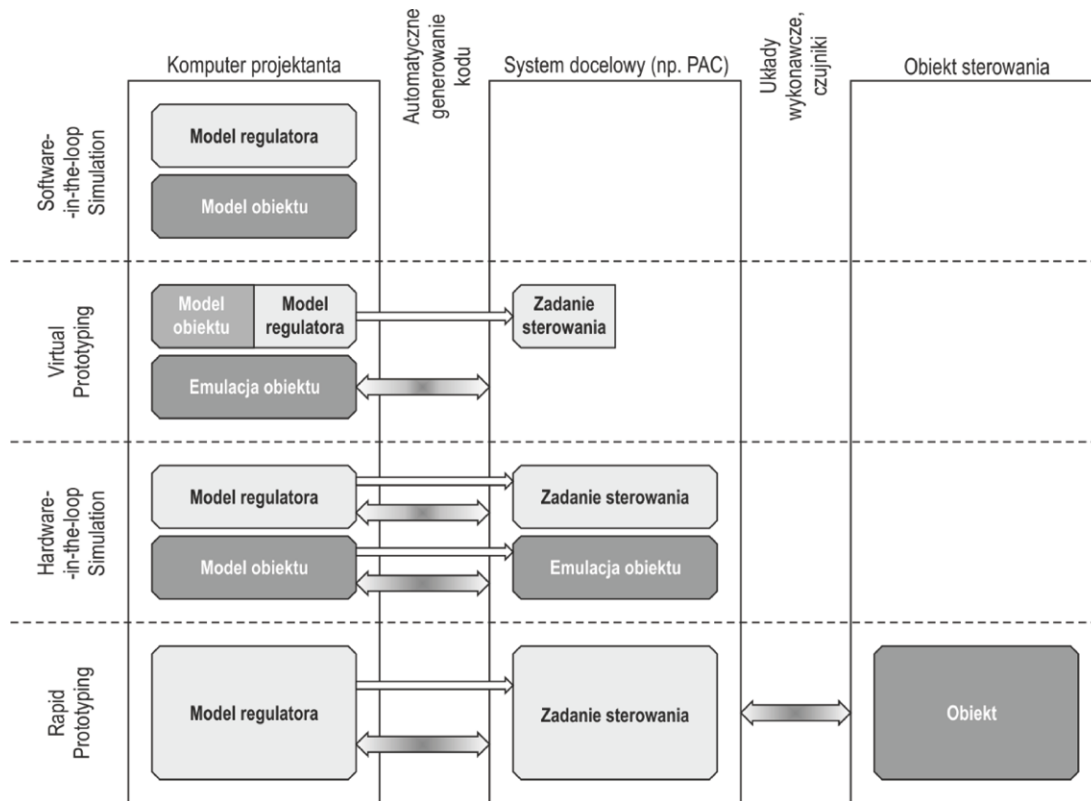
Na rysunku 1 podsumowano główne kroki procedury szybkiego prototypowania w docelowych systemach przemysłowych:

- *Software-in-the-loop-simulation* (symulacja komputerowa). Pierwszym etapem projektowania mechatronicznego (w tym szybkiego prototypowania) jest prowadzenie weryfikacyjnych badań symulacyjnych z użyciem opracowanych modeli. Modele można opracowywać na bazie wyprowadzeń analitycznych bądź na podstawie wyników prowadzonych eksperymentów identyfikacyjnych. Oprogramowanie do badań symulacyjnych zainstalowane jest zwykle na komputerze projektanta, zależy to jednak od stopnia skomplikowania modelu. Może się bowiem zdarzyć, iż model będzie na tyle złożony, iż jego identyfikacja/symulacja w warunkach zbliżonych do czasu rzeczywistego (konieczne z uwagi na kolejny krok) będzie wymagać znacznych mocy obliczeniowych (wydajności procesora, ilości pamięci RAM komputera). Obecnie na rynku dostępnych jest wiele narzędzi (programów komputerowych) służących do prowadzenia badań symulacyjnych, jednakże aby takie oprogramowanie mogło stanowić efektywny element procedur szybkiego prototypowania, musi umożliwiać generowanie kodu programu/modelu symulacyjnego do postaci zrozumiałej dla kompilatorów systemów docelowych (sterowników, układów FPGA, systemów wbudowanych);
- *Virtual Prototyping* (wirtualne prototypowanie). Jest to etap projektowania (prototypowania) nowego algorytmu sterowania lub przetwarzania sygnałów, w którym na komputerze projektanta symulowany jest model procesu (obiektu sterowania), zaś w docelowym systemie (sterowniku) uruchomiony jest zaprojektowany algorytm.

 **Abstract:** Nowadays Industry 4.0 is one of the most interest discussion topic within technical community. Digitalization, Internet of Things, process and machine simulation, virtual prototyping (including Hardware-In-the-Loop technique) are its basis. The article explains the approach of HIL real-time simulation with the illustrative example of 3-axis milling machine numerical control system. Some software and hardware tools that enable HIL implementation possible are referenced.

This is second paper from the series "Mechatronic Design",

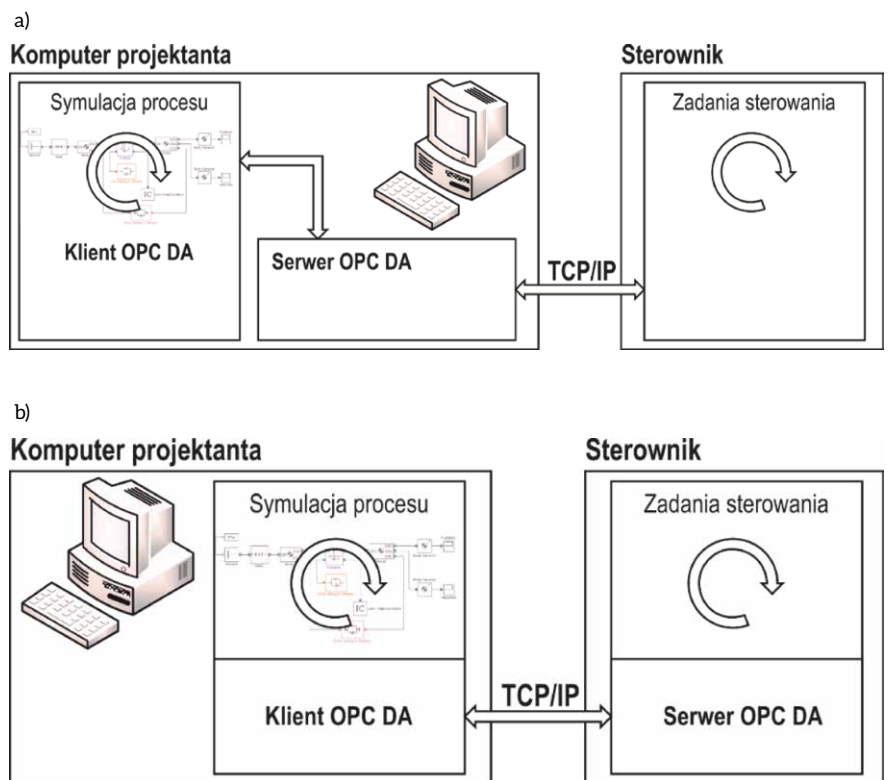
Zadania sterowania na nim uruchomione (w trybie czasu rzeczywistego) komunikują się z określonym czasem próbkowania z symulowanym procesem. Dogodną dla tego celu technologią informatyczną jest komunikacja z użyciem OPC DA (OLE for Process Control w specyfikacji Data Access). Możliwe scenariusze komunikacji przedstawiono na rysunku 2. W przypadku konfiguracji z rysunku 2 a model obiektu symulowany w oprogramowaniu komunikuje się (za pomocą funkcji klienta OPC DA) z serwerem OPC DA, uruchomionym na tym samym komputerze. Z kolei konfiguracja serwera zawiera wszystkie informacje (adres IP sterownika, nazwę procesora, nazwę zadania sterowania, nazwę i typ zmiennych, jak również czas cyklu dostępu oraz sposób – tylko odczyt czy odczyt/zapis), konieczne do cyklicznej wymiany danych z algorytmem sterowania, uruchomionym



Rys. 1. Procedury szybkiego prototypowania w docelowych systemach przemysłowych

w docelowym systemie sterowania. Ważne jest, iż konfiguracja ta umożliwia komunikację również z dowolnymi zadaniami sterowania, oprogramowanymi również z użyciem jednego z języków normy IEC 61131-3. Konfiguracja z rysunku 2 b jest możliwa do realizacji współcześnie w wąskiej (najbardziej zaawansowanej technologicznie) grupie produktów sterowań przemysłowych. Główną zaletą tego rozwiązania jest brak konieczności instalowania oprogramowania serwera OPC DA na komputerze projektanta systemu sterowania, albowiem stanowi on funkcjonalność systemu operacyjnego danego sterownika. Konfiguracja zmiennych, sposobu i czasu dostępu do zmiennych odbywa się w narzędziu opracowania aplikacji systemu sterowania – tej samej, w której programuje się typowe zadania, tzn. niewymagające korzystania z narzędzi szybkiego prototypowania;

- *Hardware-in-the-loop-simulation* (symulacja modelu obiektu wraz z zaprojektowanym sterownikiem w docelowym sterowniku). Jest to niezmiernie



Rys. 2. Wirtualne prototypowanie z użyciem docelowego systemu sterowania: a) serwer OPC DA zainstalowany na komputerze projektanta; b) serwer OPC DA jako jedna z funkcji systemu operacyjnego sterownika

ważny etap procedury opracowania nowych rozwiązań algorytmów sterowania i przetwarzania sygnałów. Polega na tym, że uprzednio symulowane rozwiązanie (model wraz z algorytmem sterowania) umieszczane jest w jądrze systemu operacyjnego docelowego systemu sterowania jako dwa osobne zadania sterowania: emulacji zachowania zamodelowanego obiektu oraz zadania sterowania. Etap ten jest o tyle istotny, że pozwala bez niebezpieczeństwa uszkodzenia elementów wykonawczych i(lub) czujników w obiekcie przetestować zachowanie całego systemu w sprzęcie docelowym. Dzięki temu w prosty sposób można testować wszystkie, nawet te najbardziej nieprawdopodobne scenariusze uszkodzeń, awarii, strategii sterowania. Testowanie w trybie HIL jest obecnie bardzo popularnym podejściem w procedurach mechatronicznego projektowania;

- **Rapid Prototyping** (szybkie prototypowanie). Stanowi ostatni etap wdrożenia nowo opracowanego algorytmu w przypadku rozwiązania z docelowym systemem sterowania. Kod algorytmu sterowania jest kompilowany, następnie umieszczany w ramach funkcji systemu operacyjnego sterownika (jako moduł programu – zadanie sterowania), zaś sam sterownik podłączony do obiektu sterowania po jednokrotnym restarcie rozpoczyna sterowanie nim. Komputer projektanta w tym trybie pracy może służyć np. jako system monitorowania/akwizycji danych w początkowym etapie działania systemu. Później jest już odłączany i sterownik funkcjonuje samodzielnie.

Podsumowując, technika HIL stanowi jedno z ogniw procesu polegającego na ciągłym testowaniu i weryfikacji [2]. W przeciwieństwie do symulacji komputerowych układów dynamicznych w pętli otwartej (sam obiekt, element wykonawczy, czujniki) oraz zamkniętej (pełne sprzężenie zwrotne od obiektu, poprzez czujniki, algorytm regulacji oraz elementy wykonawcze) technika HIL pozwala dodatkowo zweryfikować poprawność wykonywania kodu systemu sterowania w reżimie czasu rzeczywistego. Dużą zaletą techniki HIL jest to, że nie wymaga

ona przesyłania sygnałów do rzeczywistych elementów wykonawczych. Dzięki temu weryfikacja i walidacja algorytmów sterowania odbywają się w warunkach bezpiecznych.

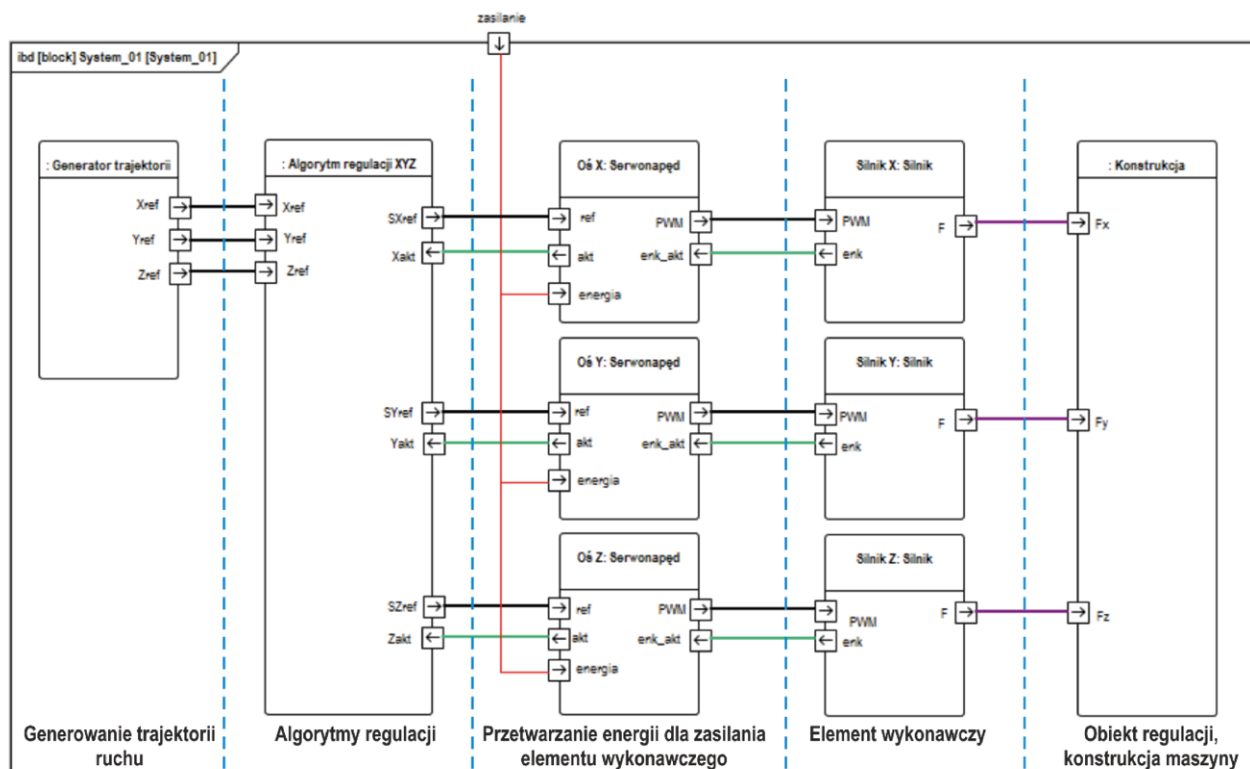
Na rysunku 3 zaprezentowano przykładowy układ regulacji frezarki sterowanej numerycznie CNC dla 3 osi ruchu X, Y, Z z podziałem na komponenty – podsystemy logiczne, które odrębnie stanowić mogą samodzielne obiekty badań (w tym symulacyjnych).

Generowanie trajektorii ruchu odbywa się zwykle na podstawie programu technologicznego obróbki skrawaniem zapisanego w formie tzw. G-kodu. Następnie odpowiednie algorytmy regulacji położenia, prędkości i prądu sprawiają, iż energia elektryczna, dostarczana do serwonapędu za pomocą silnika elektrycznego, porusza elementami konstrukcyjnymi maszyny – obrabiarki. Sprzężenia pomiarowe w systemie sterowania to z jednej strony enkodery wbudowane w silniki, pozwalające określić położenie elementów maszyny w przestrzeni kartezyjskiej, z drugiej zaś wewnętrzne układy pomiarowe prądu czy sygnały przesyłane w postaci zmiennych programu sterowania. Oznaczenia z rysunku 3: [Xref, Yref, Zref] – wartości zadane położenia w układzie kartezyjskim; [SXref, SYref, SZref] – wartości zadane położenia dla silników poszczególnych osi (wartości w układzie lokalnym); [Xakt, Yakt, Zakt] – aktualne położenie w układzie kartezyjskim; [Fx, Fy, Fz] – siły w poszczególnych osiach ruchu, wymagające przemieszczenie elementów korpusowych obrabiarki; PWM – sygnał sterujący silnikiem; energia – energia dostarczana do serwonapędu dla sterowania silnikiem.

3. Założenia Industry 4.0

Wiele uwagi ostatnimi czasy poświęca się rozwojowi technologii informatycznych w przemyśle. Nikomu już nie trzeba wyjaśniać znaczenia skrótów jak IoT czy pojęcia BigData. Industry 4.0 jest popularnym tematem wielu konferencji, targów, seminariów. Czym jest w praktyce? Jaki jest związek projektowania mechatronicznego (bazującego na modelach) z nową przemysłową rewolucją?

W najnowszym raporcie poświęconym wdrażaniu koncepcji Industry 4.0



Rys. 3. Struktura systemu sterowania typowej 3-osiowej frezarki sterowanej numerycznie

w Europie [3] Ron Davies wskazuje następujące technologie oraz techniki, które stanowią istotne wsparcie dla technologicznego przełomu, jakim niekiedy określa się Industry 4.0. Technologie te należą do najintensywniej rozwijanych oraz wspieranych przez dotacje wielu krajów europejskich. Ron Davies do najważniejszych zalicza powiązanie technologii informacyjnych i teleinformatycznych dla integracji systemów na wielu etapach powstawania nowych produktów. Cyberfizyczne systemy, niedawno nazywane systemami mechatronicznymi, będące kombinacją wbudowanych w konstrukcję maszyn czujników, inteligentne manipulatory, których algorytmy pozwalają na samodzielną rekonfigurację – wszystko to wspiera rozwój przemysłu. Nie można tutaj pominąć komunikacji w sieci urządzeń, z zastosowaniem różnego rodzaju mediów transmisji. Ostatnią, jednak nie najmniej istotną technologią

dla Industry 4.0 jest szeroko rozumiana symulacja, modelowanie oraz wirtualizacja procesów projektowych zarówno nowych produktów, jak i nowych technik produkcyjnych czy wręcz całych przepływów materiałów od dostawców komponentów po użytkowników końcowych.

Projektowanie bazujące na modelach, od koncepcji po wirtualne maszyny, ich testy w reżimie czasu rzeczywistego po końcową implementację w produkcie finalnym – to nierozłączne aspekty nowej rewolucji technologicznej znanej jako Industry 4.0. Wdrożenie techniki HIL w przedsiębiorstwie wymaga nie tylko narzędzi sprzętowych i programowych, ale również procesów, przepływu informacji pomiędzy inżynierami, wzajemnego zrozumienia celów stosowania tego typu narzędzi.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono najpopularniejsze platformy HIL, dostępne obecnie na rynku.

4. Platformy HIL

Współcześnie platformy sprzętowo-programowe dla realizacji badań HIL można podzielić na specjalistyczne rozwiązania dedykowane, będące połączeniem procesorów wysokiej wydajności, szybkich magistral komunikacyjnych, matryc reprogramowalnych układów logicznych oraz rozwiązania PLC/PAC, w kombinacji z oprogramowaniem dla automatycznego generowania kodu.

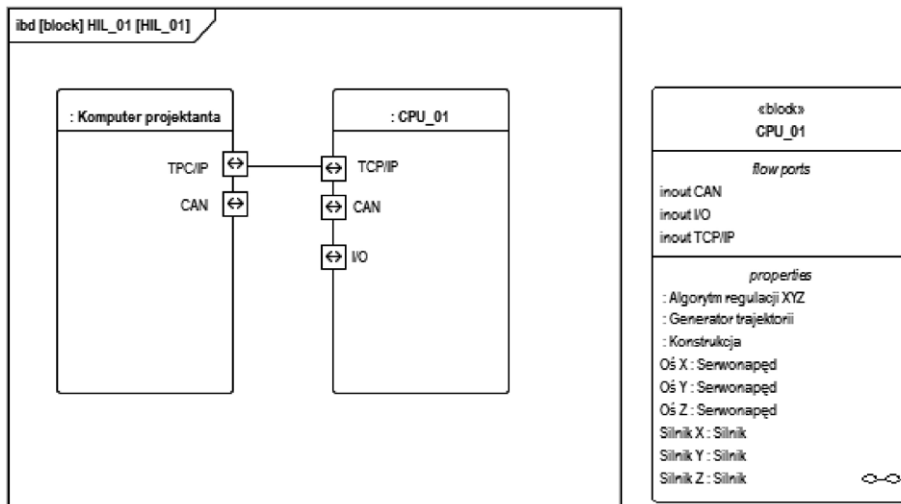
W grupie rozwiązań specjalistycznych wyróżniamy produkty takich firm, jak: National Instruments, dSPACE, speedgoat, OPAL-RT. Rozwiązania sprzętowe z grupy sterowników programowalnych wspierane są oprogramowaniem do automatycznego generowania kodu, z których najpopularniejszym obecnie jest przybornik Simulink PLC Coder dla Matlab/Simulink. B&R Automation Studio Target for Simulink jest rozwiązaniem dedykowanym dla sterowników i komputerów przemysłowych firmy Bernecker & Rainer.

5. Przykład architektury systemu dla HIL

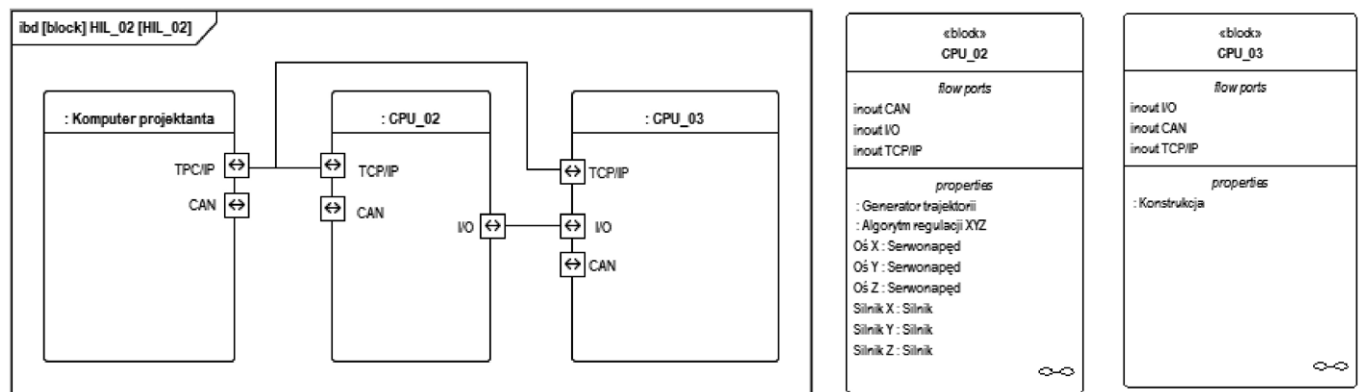
Na kolejnych rysunkach przedstawiono i omówiono możliwe architektury

reklama

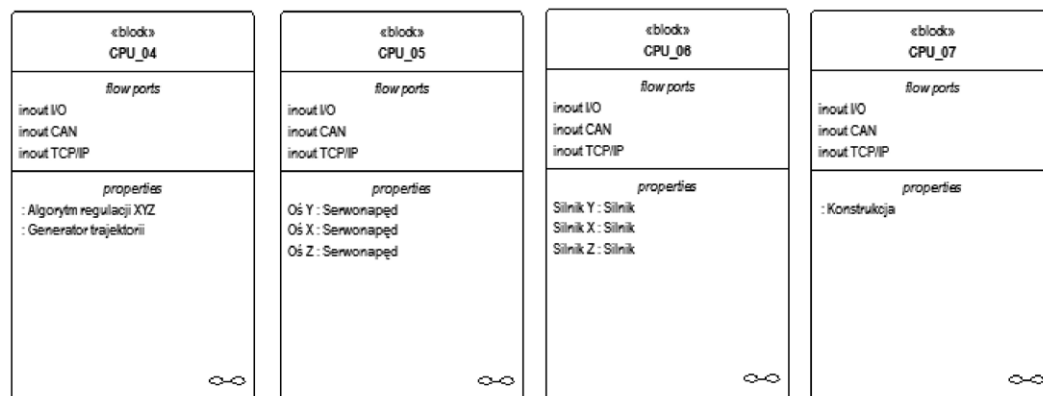
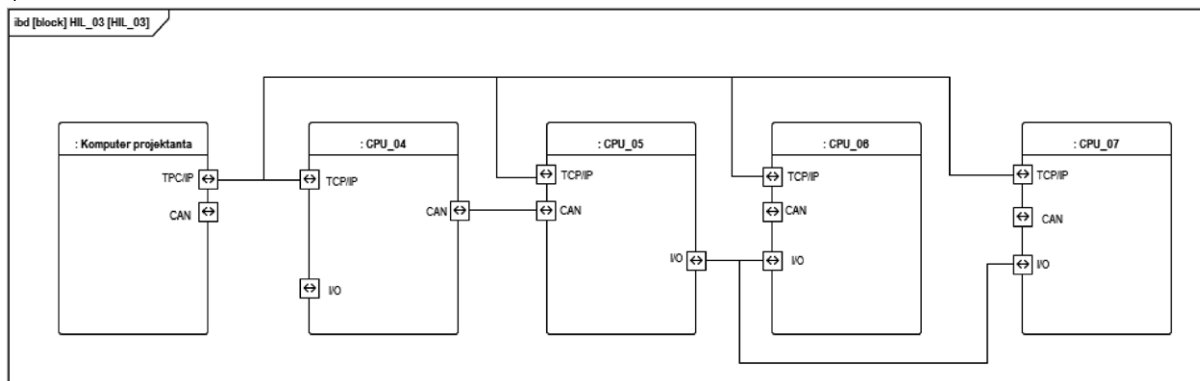
a)



b)



c)



Rys. 4. Warianty rozdziału modeli pomiędzy procesory w układzie HIL

sprzętowo-programowe dla realizacji symulacji HIL systemu, którego strukturę funkcjonalną zamieszczono na rys. 3.

Pierwszy z wariantów, przedstawiony na rysunku 4 a, jest rozwiązaniem najpopularniejszym, z uwagi na swoją prostotę. W tym rozwiązaniu modele generatora trajektorii, algorytmu regulacji, serwonapędów, silników oraz konstrukcji maszyny stanowią pojedynczą aplikację, wykonywaną przez jeden procesor z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego. Program z komputera projektanta jest monitorowany z zastosowaniem protokołu TCP/IP.

Przykład rzeczywistego stanowiska badawczego zbudowanego w oparciu o architekturę z rysunku XXa zamieszczono na rysunku 5. Badania HIL realizowane były z użyciem komputera przemysłowego APC620. Zweryfikowany algorytm stanowił następnie element aplikacji sterowania serwonapędem (regulator prędkości).

Kolejne architektury z rysunków 4 b, c pozwalają na uwzględnienie wpływu właściwości zastosowanych w rozwiązaniu protokołów komunikacyjnych na wydajność i jakość działania weryfikowanych algorytmów.

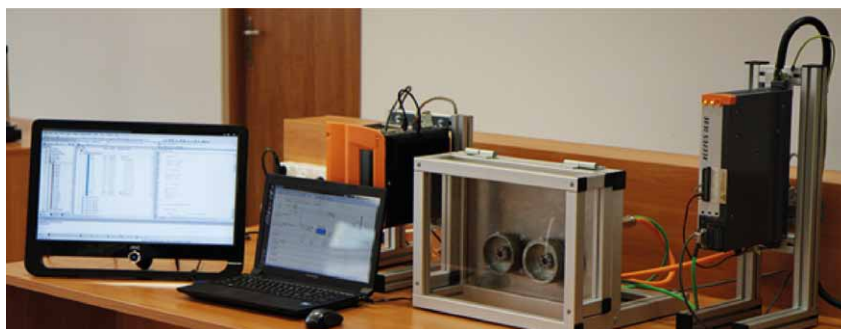
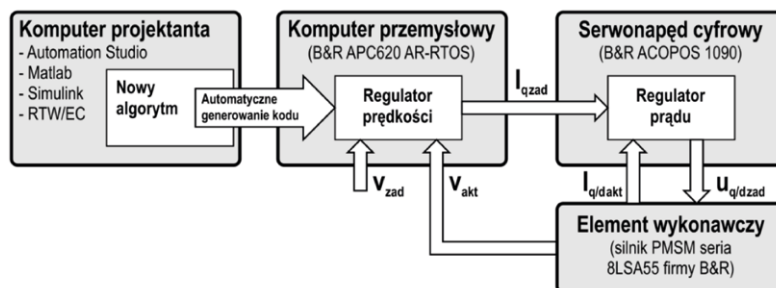
W rozwiązaniu z rysunku 4 b procesor CPU_02 wykonuje program zawierający modele obliczeniowe generatora trajektorii, algorytmu regulacji, serwonapędów oraz silnika, zaś komunikacja z procesorem CPU_03 (zawierającym obliczenia modelu konstrukcji maszyny) oparta jest o sygnały fizyczne (moduły I/O obu sterowników). Programy obu sterowników przesyłane są z komputera projektanta, a następnie monitorowane za pomocą protokołu TCP/IP.

Rozwiązanie przedstawione na rysunku 4 c jest najbardziej złożonym, jednakże najbardziej odwzorowującym fizyczną architekturę typowego systemu sterowania obrabiarki CNC.

6. Wnioski końcowe

W przedstawionym przykładzie systemu sterowania frezarki sterowanej numerycznie CNC:

- realizowane jest zadanie sterowania ruchem maszyny;
- jest możliwość wystąpienia sytuacji niebezpiecznej;



Rys. 5. Stanowisko szybkiego prototypowania opracowane na Wydziale Elektrycznym ZUT w Szczecinie: struktura stanowiska (a), zdjęcie stanowiska (b)

- dynamika obiektu ulega dużym zmianom (zmienne tarcie, zmienna temperatura otoczenia) i zakłóceniom (zmienna w czasie siła skrawania);
- prowadzone są prace nad nowymi algorytmami poprawy jakości ruchu;
- wielokrotne testy nowych parametrów algorytmów regulacji są czasochłonne i energochłonne;
- potencjalny zysk z opracowania nowych algorytmów sterowania ruchem, poprawy istniejących algorytmów są duże, również w wymiarze bezwzględnym.

Wszystkie powyższe wskazane powody stawiają technikę *Hardware-in-the-loop* jako tą, która pozwala w krótkim czasie zaproponować na rynku nowe algorytmy regulacji, zapewniające wysoką jakość pracy przy coraz nowych oczekiwaniach użytkowników końcowych.

Technika HIL współcześnie ma swoje zastosowanie w modelowaniu i testowaniu serwonapędów, elektrycznych oraz hydraulicznych, w syntezie nowych, wielowymiarowych algorytmów sterowania, m.in. turbinami wiatrowymi, generatorami turbin wiatrowych, w przemyśle motoryzacyjnym, w medycynie, w branży kosmicznej, w branży lotniczej, morskiej... i wielu, naprawdę wielu innych...

Na zakończenie należy dodać, iż Industry 4.0 to nie tylko cyfryzacja i in-

formatyzacja przemysłu. Jednym z najważniejszych aspektów jest upraszczanie maszyn w zakresie elastyczności rozwoju kolejnych ich wersji. Czy jest to możliwe bez wsparcia ze strony narzędzi symulacyjnych oraz zapewniających szybkie testowanie nowych wersji produktów (do takich zalicza się technika HIL)? Odpowiedź brzmi – nie, a konkurencja w wielu obszarach rynku jest olbrzymia...

W kolejnym artykule postaramy się przybliżyć zagadnienia związane z opracowywaniem graficznych specyfikacji funkcjonalnych systemów sterowania maszyn oraz ich efektywnego dokumentowania.

Literatura

- [1] PIETRUSEWICZ K.: *Projektowanie mechatroniczne. Projektowanie bazujące na modelach*. „Napędy i Sterowanie” 11/2015.
- [2] ROGER A.: *Managing model-based design*. 2015.
- [3] DAVIES R.: *Industry 4.0. Digitalisation for productivity and growth*. 2015.

dr hab. inż. Krzysztof Pietruszewicz – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny

artykuł recenzowany