



## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kielana „Aspekty sterowania urządzeniami mechatronicznymi przez Internet – analiza protokołu TCP/IP”

#### 1. Ocena tematu rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych ze sterowaniem układów mechatronicznych poprzez sieć komputerową. Autor rozpatruje obiekt sterowania, który jest połączony z regulatorem w układzie zamkniętym z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego, a sygnały z obiektu sterowania do regulatora i z regulatora do obiektu sterowania są przekazywane przez sieć Internet (lub lokalną sieć Ethernet), która wprowadza opóźnienie wynikające z transmisji danych. Proponowana przez autora koncepcja badań polega na zastąpieniu rzeczywistych układów przez ich modele matematyczne zaimplementowane w programie SIMULINK oraz na karcie procesorów sygnałowych DSP1104. W miejsce rzeczywistej sieci Internet w badaniach przeprowadzonych przez autora jest wykorzystywany jej sprzętowy Emulator. Dzięki takim założeniom autor może badać obiekty sterowania, o różnych modelach i parametrach tych modeli, współpracujące z regulatorami różnego typu i zmieniających parametrach analizując wpływ opóźnienia wprowadzanego przez sieć komputerową na jakość regulacji.

W celu realizacji analizowanego zadania autor pracy musiał przeanalizować: wykorzystanie odpowiednich protokołów transmisji danych w sieciach komputerowych (w szczególności protokołu TCP/IP – połączeniowy protokół warstwy transportowej z ang. nazwy Transfer Control Protocol i protokół warstw sieciowej – Internet Protocol) oraz brak determinizmu czasowego przy transmisji danych m. in. w sieci Internet. Musiał również



opracować stanowisko do badań symulacyjnych, w którym realizował połączenie układów sterowania z regulatorami poprzez emulator sprzętowy sieci Internet przy wykorzystaniu autorskich programów napisanych w języku C++.

Na stanowisku badawczym autor mógł przeprowadzać badania symulacyjne, w różnych wariantach dla różnych modeli elementów układu i w różnych trybach pracy Emulatora sieci Internet. Stanowisko to umożliwiło mu również przeprowadzenie wybranych badań na obiekcie rzeczywistym. Badania te odnosiły się do sterowania prędkością obrotową silnika prądu stałego z pętlą sprzężenia zwrotnego zamkniętą przez Emulator.

Temat podjęty przez autora rozprawy jest aktualny i istotny dla różnych dziedzin elektrotechniki, mechatroniki i informatyki. Wyniki badań w tej tematyce mogą być wykorzystywane do sterowania różnych układów mechatronicznych (np. robotów) poprzez sieci komputerowe.

## **2. Charakterystyka pracy, tematyka poruszanych problemów**

Rozprawa doktorska składa się z dziesięciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania, czterech załączników i spisu literatury. Rozprawa obejmuje 170 stron tekstu.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie, autor przedstawił tematykę rozprawy. Następnie sformułował tezę, cel oraz główne kierunki badań. Autor stawia tezę, że możliwe jest poprawne działanie układu regulacji z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego zamkniętą poprzez sieć Internet przy czym:

– Badania poprawności działania takich układów można zrealizować wykorzystując modele matematyczne obiektów sterowanych i regulatorów, zaimplementowanych w programie SIMULINK oraz na karcie procesorów sygnałowych DSP1104, jak też przy wykorzystaniu Emulatora sieci Internet.

– Badania poprawności działania takich układów mogą mieć charakter komputerowych badań symulacyjnych. Badania symulacyjne prowadzone według określonej metodologii pozwalają stwierdzić, czy jest możliwe poprawne współdziałanie układu sterowania z konkretnym regulatorem poprzez sieć Internet.

Do zweryfikowania tak postawionej tezy doktorant zrealizował pięć celów szczegółowych, prowadzących do opracowania autorskiej koncepcji badań.

Osiągnięcie celów oraz realizację tezy autor uzyskał na drodze badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych.



W rozdziale drugim pracy doktorant przedstawił szczegółową charakterystykę modelu Referencyjnego Łączenia Systemów Otwartych, który umożliwia standaryzację połączeń w sieci Internet. Model ten jest określany skrótem ISO/OSI (z ang. nazwy Open System Interconnection) i został opracowany przez Międzynarodową Organizację Normalizacji (ISO). Autor opisał poszczególne jego warstwy oraz ich funkcje, podkreślając przy tym znaczenie procesu enkapsulacji oraz fragmentacji danych. W rozdziale tym autor, wystarczająco szczegółowo opisał wybrane protokoły: Ethernet, IP, TCP, UDP (wraz ze szczegółowym opisem budowy ramek tych protokołów), ich zastosowania oraz cechy charakterystyczne z punktu widzenia transmisji danych dla potrzeb rozpatrywanej tematyki, ze szczególnym uwzględnieniem braku determinizmu czasowego w komunikacji sieciowej. Ponadto autor opisał podstawy budowy sieci Ethernet, w tym sposób działania oraz cechy charakterystyczne przełącznika sieciowego (ang. switch) oraz mechanizmów CSMA/CD (protokół wielodostępu z badaniem zajętości nośnika i wykrywaniem kolizji). Doktorant szczegółowo opisał budowę ramek wspomnianych protokołów sieciowych, sposób nawiązywania połączenia (ang. three-way handshake) oraz komunikacji (klient-serwer) za pomocą protokołu TCP.

W rozdziale trzecim autor omawia opracowaną i przyjętą koncepcję badania procesów sterowania przez Internet, polegającą na zastąpieniu obiektów rzeczywistych, przez odpowiadające im modele matematyczne, zaimplementowane w środowisku MATLAB/Simulink oraz na karcie procesorów sygnałowych DSP1104. Zaproponowane podejście umożliwia zmianę parametrów modelu (które występują w równaniach modelu jako odpowiednie współczynniki) oraz badanie wpływu tych zmian na jakość regulacji. Sieć Internet oraz sieć lokalna są rzeczywiste lub najczęściej symulowane za pomocą emulatora sprzętowego, pracującego według zadanych parametrów emulatora.

W rozdziale tym autor przedstawia również warunki realizacji proponowanej koncepcji badań, na które składają się wyszczególnione przez autora dwa warunki szczegółowe.

Warunek pierwszy stanowi, że warunki badań symulacyjnych, nie mogą odbiegać od warunków badań realizowanych na obiektach rzeczywistych oraz sugeruje, że *"...należało zapewnić warunki symulacji jak najbardziej zbliżone do warunków rzeczywistych czyli synchronizować obliczenia tak, aby model matematyczny zachowywał się dokładnie w taki sam sposób jak obiekt rzeczywisty"*. W celu spełnienia tego warunku, autor zaproponował dwie metody, Metodę A oraz Metodę B.

Metoda A polega na zastosowaniu komputera z systemem Windows 7 Professional i realizację symulacji układu sterowania wraz z algorytmem i obiektu sterowanego przy



pomocy programu Matlab/Simulink z zastosowaniem bloku RTBlock, synchronizującego pracę środowiska Simulink z czasem rzeczywistym. W metodzie tej wymiana danych przez sieć komputerową (Intranet lub Internet) między modelami matematycznymi układu sterowania i obiektu realizowana jest przy pomocy autorskiego wielowątkowego programu SKMThread.

Metoda B polega na zastosowaniu karty procesorów sygnałowych DSP1104, wyposażonej w system czasu rzeczywistego do implementacji modelu matematycznego układu sterowania wraz z algorytmem oraz modelu matematycznego obiektu. System współpracuje z komputerem PC przez kartę rozszerzeń DSP1104 ISA. W metodzie tej wymiana danych między modelami matematycznymi jest realizowana za pośrednictwem komputerów podłączonych do sieci Internet (lub Intranet) przy pomocy autorskiego wielowątkowego programu SKCDSP1104 działającego pod kontrolą systemu operacyjnego działającego na komputerze PC.

Warunek drugi, stanowi, iż proponowana koncepcja (nazywana przez autora metodologią) będzie poprawna, jeżeli w wyniku zastosowania dodatkowego autorskiego programu SKMThread lub SKCDSP1104, czasy transmisji przez sieć lokalną nie zwiększą się znacząco (tzn. zwiększą się w sposób pomijalnie mały), tj. jak pisze autor, konieczne jest zapewnienie w obecności proponowanego oprogramowania bezstratnej wymiany danych oraz zapewnienie minimalnego (pomijalnego z punktu widzenia prowadzonych badań) czasu transmisji w dodatkowym torze transmisji.

W podrozdziale 3.4 autor opisuje stanowisko badawcze, stworzone w celu sprawdzenia warunku drugiego realizacji proponowanej metodologii badań. Ponadto autor przedstawił zrealizowany program badań, opis przeprowadzonych eksperymentów, algorytm realizacji eksperymentu oraz ich wyniki, zestawienia tabelaryczne i wykresy porównawcze oraz wnioski. Celem przeprowadzonych przez autora badań było wyznaczenie oraz porównanie czasów opóźnień transmisji w sieci lokalnej, dla trzech konfiguracji łącza sieci zestawionej odpowiednio z kabla sieciowego z przeplotem, przełącznika sieciowego oraz routera bezprzewodowego. Program badań obejmował wykonanie serii eksperymentów, w których mierzono czasy opóźnień transmisji pakietów, dla trzech konfiguracji zastawień oprogramowania. Dwa pierwsze według odpowiednio Metody A oraz Metody B, trzecia w tzw. układzie odniesienia, w którym wymiana danych odbywała się wyłącznie między instancjami programu SKMThread pracującymi w architekturze klient-serwer.

Badania przeprowadzono dla czterech częstości wysyłania pakietów, co w efekcie pozwoliło na realizację pomiarów czasów transmisji pakietów dla 36 kombinacji konfiguracji



stanowiska (wynikających z istnienia 3 konfiguracji programów, 3 konfiguracji łącza sieci lokalnej, 4 częstości wysyłania pakietów). Pojedynczy eksperyment polegał na pomiarze czasu transmisji dla 5000 pakietów, które wysyłano w równomiernych (zadanych) odstępach czasu. Na podstawie pomiarów pojedynczego eksperymentu wyznaczano następujące wartości: wartość minimalną, maksymalną oraz średnią. Autor, w celu określenia zmienności otrzymanych wyników pomiarów czasów opóźnień podczas transmisji pakietów w sieci lokalnej (Intranet), wyznaczał odchylenie standardowe, charakteryzujące rozrzut wyników wokół średniej arytmetycznej.

We wnioskach, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, autor stwierdził, że warunek drugi, związany z proponowaną metodologią jest spełniony dla obu zaproponowanych koncepcji - Metody A oraz Metody B.

**W rozdziale czwartym** autor przedstawił, istotne z punktu widzenia możliwości sterowania, cechy sieci Internet. W rozdziale tym doktorant przedstawił też możliwości zastosowania do badań emulatora NE500 sieci Internet produkcji firmy SIMENA, jego tryby pracy i nastawy parametrów. Podał również wyniki badań eksperymentalnych odnoszących się do czasu transmisji i strat pakietów dla trzech kanałów transmisyjnych o długości od 200 do 600 km.

**W rozdziale piątym** doktorant analizuje układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym zamkniętym przez Internet z punktu widzenia teorii układów z opóźnieniem. Sieć Internet (lub sieć lokalną Intranet) autor zastępuje elementem opóźniającym o transmitancji  $e^{-st}$ , a następnie rozwija funkcję  $e^{-st}$  w szereg Maclaurina uwzględniając w dalszych analizach 3 wyrazy tego rozwinięcia. Następnie wyprowadza transmitancję układu zamkniętego z opóźnieniami wprowadzanymi przez Internet zakładając, że układ sterowania jest układem liniowym, inercyjnym pierwszego lub drugiego rzędu, a regulator jest postaci P lub PI. W przeprowadzonym badaniach symulacyjnych zakłada wymuszenie w postaci skoku jednostkowego oraz arbitralnie parametry regulatora i układu sterowania (przedstawione w tabeli 4) zmieniając wartości czasu opóźnienia wprowadzanego przez Internet. Autor stwierdza, że dla wszystkich analizowanych przypadków dla zerowego czasu opóźnienia odpowiedź układu jest aperiodyczna. Następnie określa graniczne czasy opóźnień, dla których odpowiedź układu staje się periodyczna tłumiona oraz gdy układ przechodzi w układ niestabilny. W podrozdziale 5.2.5 autor arbitralnie formułuje kryterium poprawności współpracy danego układu regulacji z siecią Internet, stwierdzając: *„Jeżeli odpowiedź układu regulacji z pętlą sprzężenia zwrotnego jest aperiodyczna, to współpracę tego samego układu*



regulacji z pętlą sprzężenia zwrotnego zamkniętą przez Internet uznaje się za poprawną, gdy zostanie zachowany aperiodyczny charakter odpowiedzi układu”.

Rozdział szósty odnosi się do badań symulacyjnych przeprowadzonych na stanowisku badawczym m. in. z wykorzystaniem Emulatora sieci Internet. Badania symulacyjne są przeprowadzane przy zakłóceniu w postaci skoku jednostkowego dla wybranych modeli i parametrów układu sterowania i regulatora przy zmienianym czasie opóźnienia w następujących wariantach:

- symulacje na jednym komputerze bez Emulatora,
- symulacje na dwóch komputerach z Emulatorem.

W drugim przypadku symulacji modele obiektu regulacji oraz regulatora przedstawiono w programie SIMULINK (Metoda A) oraz zamiennie na kartach procesorów sygnałowych (Metoda B) dla dwóch trybów pracy Emulatora: w trybie „ $\tau_{Fixed}$ ” (w którym podaje się stałą wartość opóźnienia) oraz w trybie „ $\tau_{min}$  i  $\tau_{max}$ ” (w którym zadaje się wartość minimalną i maksymalną opóźnienia). Z przeprowadzonych badań wynika, że w trybie „ $\tau_{Fixed}$ ” Emulatora graniczne czasy opóźnień: gdy odpowiedź układu staje się periodyczna tłumiona ( $\tau_{gr(a-p)}$ ) oraz gdy układ przechodzi w układ niestabilny ( $\tau_{gr(p-n)}$ ) są prawie identyczne dla wszystkich analizowanych przypadków symulacji. W trybie „ $\tau_{min}$  i  $\tau_{max}$ ” Emulatora sprawdzany jest m. in. warunek (32)  $\tau_{max} < \tau_{gr(a-p)}$ . Jak wykazały badania, granice  $\tau_{gr(a-p)}$  uzyskuje się znacznie wcześniej dla badań symulacyjnych na jednym komputerze, niż w badaniach symulacyjnych z Emulatorem Internetu, w którym wymiana informacji pomiędzy regulatorem, a obiektem regulacji odbywa się przez rzeczywiste karty sieciowe komputerów, z wykorzystaniem protokołu TCP/IP.

W rozdziale siódmym autor przedstawia uproszczony algorytm postępowania dla sprawdzenia poprawności współpracy zadanego układu regulacji z zadaną siecią Internet.

W rozdziale ósmym doktorant m. in. opisuje badania laboratoryjne na rzeczywistych obiektach. Podczas badań sterowano prędkością obrotową silnika prądu stałego w układzie zamkniętym poprzez Emulator sieci Internet z modelem regulatora typu PI zamodelowanym na karcie procesora sygnałowego DSP1104. Wymiana informacji pomiędzy Emulatorem a kartami DSP1104 była zrealizowana przez autorski program doktoranta. Badania przeprowadzono najpierw dla modelu silnika wyznaczając opóźnienie graniczne  $\tau_{gr(a-p)}$ , przy którym odpowiedź układu staje się periodyczna. Następnie przeprowadzono badania w układzie z rzeczywistym silnikiem zmieniając parametry Emulatora  $\tau_{min}$  i  $\tau_{max}$ . Porównano wartości graniczne czasu opóźnienia  $\tau_{gr(a-p)}$  dla układu z rzeczywistym silnikiem i z jego modelem i stwierdzono nieznaczne zwiększenie tego czasu (z 11 do 14 ms) dla układu z



rzeczywistym silnikiem. Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest sterowanie rzeczywistych obiektów np. silników prądu stałego przez Internet i sterowanie to może być zadawalające.

W **rozdziale dziewiątym** przedstawiono szczegółowy opis autorskich programów napisanych w języku C++ (z wykorzystaniem interfejsu programistycznego WinAPI) umożliwiających wymianę informacji pomiędzy programem SIMULINK zainstalowanym na dwóch komputerach oraz zamiennie pomiędzy kartami procesorów sygnałowych DSP1104 przez sieć TCP/IP/Ethernet. Napisanie tych programów umożliwiło wykonanie badań symulacyjnych oraz badań na rzeczywistym silniku prądu stałego.

W **rozdziale dziesiątym** przedstawiono podsumowanie i wnioski i podano perspektywę dalszych badań w analizowanym zakresie.

W załącznikach podano: wydruki programów, szczegółowy opis działania, implementacji oraz schematy blokowe analizowanych modeli matematycznych w programie SIMULINK oraz na karcie procesorów sygnałowych DSP1104, wyniki badań symulacyjnych nie umieszczonych w głównym bloku rozprawy.

Spis literatury jest reprezentatywny i dobrze wybrany.

Tekst napisany jest w sposób zrozumiały, dobrym językiem polskim i nie zawiera nieścisłości pojęć i treści. Tekst zawiera mało pomyłek redaktorskich. Układ pracy jest prawidłowy, a wywody przedstawione są w sposób zrozumiały. Świadczy to o umiejętności autora redagowania rozpraw naukowych. Teza rozprawy doktorskiej dotyczy możliwości poprawnego działania układu regulacji z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego zamkniętą poprzez sieć Internet. Teza ta jest oryginalna oraz w pewnym sensie udowodniona w pracy.

Oceniam recenzowaną rozprawę doktorską mgra inż. P. Kielana pozytywnie jako uzupełnienie wiedzy w omawianej tematyce.

### **3. Główne pytania i uwagi dyskusyjne**

- a) Teza pracy składa się z trzech luźno ze sobą związanych tez składowych. Wydaje mi się, że trzecie zdanie w tezie pracy jest zbędne.
- b) Tytuł rozprawy skromnie sugeruje, iż praca dotyczy jedynie analizy protokołu sieciowego TCP/IP (analizy ruchu sieciowego), w istocie tematyka pracy jest szersza jednakże nie wyczerpuje w pełnym zakresie wszystkich tytułowych aspektów sterowania urządzeniami mechatronicznymi.



- c) W rozprawie brakuje pogłębionej, krytycznej analizy efektów prac innych badaczy. Autor wspomina jedynie na str. 8, iż takie badania były prowadzone i podkreśla przy tym, iż *"...ze względu na brak determinizmu czasowego, w wielu publikacjach nie zaleca się stosowania sieci opartej na protokole TCP/IP w tych zastosowaniach"*. Brak ten jest szczególnie odczuwalny w stosunku do analizy źródeł z teorii regulacji.
- d) W rozdziale 5.2.5 autor formułuje *„kryterium poprawności współpracy zadanego układu regulacji z zadaną siecią Internet”* w oparciu o charakter przebiegu odpowiedzi układu regulacji na skok jednostkowy. Według autora współpraca jest poprawna, jeżeli przebieg jest aperiodyczny. Dlaczego w pracy nie próbowano analizować „standardowych” (znanych z teorii regulacji) kryteriów stabilności, odporności i jakości sterowania? Ponadto w pewnych warunkach odpowiedź układu może być periodyczna także bez opóźnienia.
- e) Przeprowadzono badania działania układu przede wszystkim na modelach w programie Matlab/Simulink oraz na modelach zaprogramowanych na karcie procesorów sygnałowych DSP1104. Tylko jeden przykład odnosi się do rzeczywistego obiektu – silnika prądu stałego. W badaniach wykorzystano emulator symulujący sieć Internet. Czy możemy być pewni, że układ będzie zawsze poprawnie pracował w rzeczywistych warunkach? Na str. 35 autor pisze, że należało *„zapewnić warunki symulacji jak najbardziej zbliżone do warunków rzeczywistych czyli synchronizować obliczenia tak, aby model matematyczny zachowywał się dokładnie w taki sam sposób jak obiekt rzeczywisty”*. Zasadniczo model matematyczny nigdy nie będzie zachowywał się dokładnie tak samo jak obiekt rzeczywisty. Ponadto stosowanie modelowania matematycznego wymaga analizy stosowalności modelu w tym analizy założeń upraszczających.
- f) Do określenia wpływu zmian parametrów układu regulacji (w szczególności opóźnienia wnoszonego przez sieć Internet), w pracy wybrano bardzo uproszczoną metodę symulacyjną (podrozdziały 5.2.3 i 5.2.4) polegającą na systematycznej zmianie opóźnienia (arbitralnie przyjęto krok zmian równy 1 ms) i obserwowaniu odpowiedzi układu na skok jednostkowy. Można, zatem przypuszczać, że wyznaczone wartości graniczne opóźnień zawarte w tabeli 5 są jedynie przybliżeniem rzeczywistych wartości granicznych. Czemu do analizy symulacyjnej nie zastosowano bardziej złożonych, a zarazem dokładniejszych metod, np. metod statystycznych. Ponadto mając postać analityczną transmitancji operatorowych układu regulacji,



wyznaczoną przez autora w rozdziale 5 pracy, można szacować zakresy dopuszczalnych opóźnień.

- g) Badania w rozdziale 5 prowadzono dla prostych, liniowych modeli o arbitralnie dobranych parametrach (parametry z tabeli 4). Dlaczego w badaniach przyjęto takie modele i wartości parametrów i dlaczego nie badano innych?
- h) W rozdziale 5 (str. 63) wprowadzono element opóźniający o transmitancji  $e^{-sT}$  w torze głównym i w torze sprzężenia zwrotnego, który zastępuje sieć Internet. W jakim celu funkcję tą aproksymowano szeregiem Maclaurina? Do wyznaczenia transmitancji układu regulacji otwartego i zamkniętego, jak również w obliczeniach odpowiedzi układu na skok jednostkowy można przecież użyć dokładnej postaci funkcji wykładniczej. Rozwiązania takie są znane i opisywane w podręcznikach z teorii regulacji.
- i) W jedynym eksperymencie, jaki przeprowadził autor nie podano założeń przyjętych przy formułowaniu równań silnika prądu stałego. Równania opisujące pracę silnika dotyczą prostego, liniowego modelu. Zastrzeżenia budzą następujące zależności:
- W zależnościach na siłę elektromotoryczną i moment elektromagnetyczny (wzory 40 i 41) użyto błędnie takiego samego współczynnika  $k_F$ . Ten współczynnik też dwukrotnie występuje na rys. 67.
  - Czy w zależności (43) symbol  $T_o$  w mianowniku oznacza stałą czasową elektromechaniczną  $T_m$ ? Stałą czasową elektromechaniczną wprowadza się w równaniach zapisanych dla jednostek względnych. Autor nic o tym nie pisze.

#### 4. Drobne uwagi redakcyjne

- a) Na str. 20 jest „... stacja wstrzymuje się transmisja ...”, powinno być „... stacja wstrzymuje się transmisją ...”.
- b) Na str. 47 we wzorze (7) w jednym indeksie występuje „ $avr$ ”, a powinno być „ $av$ ”.
- c) Na str. 57 w piątej linii od końca oraz w środku str. 58 jest „...min...”, powinno być „m. in.”.
- d) Dlaczego na schemacie blokowym z rys. 67 oznaczono prędkość przez  $\Omega$ , a w równaniach  $n$ ?
- e) Na rys. 109 w załączniku Z4.1 zaznaczono błędnie, że prędkość obrotowa jest mierzona w radianach na sekundę.



- f) Na str. 112 do oznaczania liczb rzeczywistych zamiennie stosuje się kropkę i przecinek dziesiętny.
- g) Na str. 132 pomyłkowo występuje: „... Przedstawiono również główny kierunek badań oparty na założeniu...”. Ma być „...oparty na założeniu ...”.

## 5. Podsumowanie i ocena końcowa pracy

Czytając tekst pracy można przekonać się, że autor bardzo dobrze orientuje się w zagadnieniach sieci komputerowych i sprzętu komputerowego, które szczegółowo i fachowo opisuje, natomiast elementy badanego układu rzeczywistego, które nie należą do Internetu, zostały potraktowane bardziej pobieżnie. Autor opracował jednak koncepcję badania procesów sterowania przez Internet, dzięki zastosowaniu modeli matematycznych i ich implementacji w programie SIMULINK oraz z zastosowaniem karty procesorów sygnałowych DSP1104. Opracował stanowisko do badań symulacyjnych i pomiarowych. Na pewno ciekawym elementem pracy jest zastosowanie emulatora sprzętowego sieci Internet. Wydaje mi się, że zastosowanie Emulatora umożliwiło uzyskanie wyników w zwartej postaci. Autor przeprowadził ciekawe eksperymenty, dla szerokiej gamy konfiguracji stanowiska. Ciekawe są również uzyskane wyniki liczbowe badań przeprowadzonych dla różnych konfiguracji połączeń (kabel, przełącznik sieciowy, router bezprzewodowy) sieci komputerowej. Jednak mówiąc, o sterowaniu przez Internet nie jesteśmy w stanie określić struktury połączeń oraz za pomocą jakich urządzeń to połączenie zostanie zrealizowane. Ponadto w Internecie pakiety mogą dochodzić do odbiorcy różnymi drogami.

Jednym z zasadniczych mankamentów pracy jest brak analizy opartej o podstawy teorii regulacji z wykorzystaniem transmitancji operatorowych (wyznaczonych w piątym rozdziale pracy) z punktu widzenia dopuszczalnych opóźnień w transmisji sygnałów wprowadzanych przez sieć komputerową. Ponadto Autor analizował jedynie najprostsze układy regulacji stosowane w mechatronice, nie odnosząc się do bardziej złożonych struktur układu napędowego (np. układu pozycjonującego stosowanego w napędach manipulatorów) i regulatora. W pracy analizowano jedynie regulatory typu P i PI, które nie są optymalne dla obiektów z opóźnieniem stochastycznym.

Pomimo powyższych uwag dyskusyjnych, uważam że przedstawiona rozprawa jest istotnym wkładem autora w szeroko rozumianą elektrotechnikę i automatykę. Z przeprowadzonych przez autora monografii badań wynika, że możliwe jest sterowanie



rzeczywistych obiektów np. silników prądu stałego przez Internet i sterowanie to może być zadawalające. W związku z powyższym autor uzyskał zadawalające wyniki badań, które są interesujące z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego.

Biorąc pod uwagę, że mgr inż. Paweł Kielan:

- wywiązał się z postawionych w rozprawie zadań (choć niektóre aspekty wymagają dalszej analizy i pogłębienia z wykorzystaniem rzeczywistych przemysłowych systemów mechatronicznych),
- wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania trudnych problemów naukowych,
- zaprezentował dostatecznie wysoki poziom wiedzy z elektrotechniki, automatyki, informatyki i mechatroniki,

uważam, że praca doktorska „Aspekty sterowania urządzeniami mechatronicznymi przez Internet – analiza protokołu TCP/IP” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, określone przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych i stawiam Wysokiej Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stefan Panek