

Szczecin, 10.06.2022 r.

Prof. dr hab. inż. Stefan Domek
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Strzelczyka
„Adaptacyjny system wymiany informacji w rozproszonych układach sterowania”

1. PODSTAWA PRAWNA, PRZEDMIOT I ZAKRES RECENZJI

Podstawą sporządzenia recenzji była umowa o dzieło nr 07/AEiE/22 z dnia 19.04.2022 r. podpisana przez prof. dr. hab. inż. Dariusza Zmarzęgo, Przewodniczącego rady naukowej dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika Politechniki Opolskiej.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Strzelczyka zatytułowana „Adaptacyjny system wymiany informacji w rozproszonych układach sterowania”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, prof. PO.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261) recenzja zawiera ocenę rozprawy doktorskiej pod względem spełnienia warunków określonych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika, dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych (Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych – Dz. U. z 2018 r., poz. 1818 z późniejszymi zmianami).

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA, ZAKRES I CEL ROZPRAWY

Oprogramowanie współczesnych systemów automatyki i robotyki jest coraz bardziej skomplikowane, a jego opracowanie wymaga coraz większego wysiłku oraz dłuższego czasu. Obejmuje ono bowiem oprócz właściwych zadań filtracji, identyfikacji, monitorowania zmiennych procesowych, sterowania, optymalizacji itd., również zadania komplementarne, takie jak: komunikacja lokalna, komunikacja globalna, proces wykrywania nowych węzłów systemu, rekonfiguracja struktury układu sterowania, zdalna modyfikacja algorytmów kontroli, dystrybucja parametrów roboczych czy reagowanie na zdarzenia zewnętrzne, np. przekroczenia poziomów granicznych czy pojawiające się defekty.

Równocześnie rosnące wymagania technologiczne i oczekiwania użytkowników, zwłaszcza w systemach sterowania dużymi instalacjami przemysłowymi i/lub naukowo-badawczymi, zmuszają twórców oprogramowania do poszukiwania metod optymalizacji procesu jego tworzenia oraz nadania mu cech bardziej uniwersalnych i ogólnych, w informatyce określanych mianem generyczności. Wspomagają one opracowanie oprogramowania dla konkretnych rozwiązań implementacyjnych w automatyce i robotyce zakładając utrzymanie funkcjonalności oprogramowania użytkowego w przypadku zmiany warstwy sprzętowej i w naturalny sposób prowadzą do koncepcji oprogramowania wielokrotnego użytku.

Jedną z metod osiągnięcia tego celu jest zastosowanie tzw. oprogramowania pośredniczącego, oddzielającego warstwę systemu operacyjnego oraz warstwę sprzętową od bazujących na niej aplikacji sterujących. Pełni ono niejako rolę pośrednika w transakcjach wymiany informacji ze sprzętem oraz wprowadza dodatkową abstrakcję, umożliwiającą odwoływanie się do wewnętrznych peryferii systemu.

Zaproponowana na początku bieżącego stulecia koncepcja oprogramowania pośredniczącego wskazywała na potencjalne korzyści z takiego rozwiązania – tworzący oprogramowanie użytkowe projektuje część logiczną swojej aplikacji wraz z niezbędnymi algorytmami sterującymi, bez analizy trudnych kwestii informatycznych, które są mu udostępnione w postaci zbioru gotowych funkcjonalności. Mimo iż wykorzystanie oprogramowania pośredniczącego w procesie tworzenia oprogramowania systemów rzeczywistych, w tym robotycznych jest przekonujące, to jednak wiele istniejących rozwiązań wykazuje istotne braki – dostępne architektury pośredniczące cechują się dużym stopniem skomplikowania oraz znaczną objętością kodu i z tego powodu utrudniają początkowy etap projektowania oprogramowania sterującego. Podobnie często integracja już istniejącego oprogramowania sterującego z gotowym oprogramowaniem pośredniczącym jest trudna do zrealizowania. Wynika to głównie z faktu, że programy pośredniczące tworzone są najczęściej na potrzeby konkretnych projektów i środowisk informatycznych.

Autor rozprawy postanowił stworzyć nową, autorską architekturę oprogramowania pośredniczącego przeznaczoną do rozproszonych i modułowych systemów sterowania maszyn i urządzeń robotycznych, która pomimo rozbudowanej gamy funkcjonalności zapewnia krótką ścieżkę integracji z nowym lub istniejącym już systemem obejmującym kilka aplikacji sterujących znajdujących się w jednym module sprzętowym lub w kilku modułach współpracujących ze sobą. Aby osiągnąć ten cel przeprowadził analizę dostępnych na rynku podobnych rozwiązań a następnie opracował i zaimplementował pośredniczący system wymiany informacji wraz z warstwami abstrakcji sprzętowej, dystrybucji zdarzeń oraz detekcji elementów sieci.

Wybór takiej metody badawczej uważam za właściwy i w pełni uzasadniony. Zastosowane narzędzia i metody analizy świadczą o tym, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Przemysława Strzelczyka mieści się w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika i wpisuje się w aktualny i istotny dla niej nurt badań.

Swoje idee Autor zawarł w dość ogólnej tezie rozprawy mówiącej, że „Możliwe jest opracowanie programowej warstwy komunikacyjnej, realizującej zadania wymiany informacji w rozproszonych systemach sterowania i urządzeniach o budowie modułowej, pełniącej funkcje

kontrolne w zakresie konfiguracji i podstawowych zasad bezpieczeństwa systemu sterowania, będącej warstwą pośrednią pomiędzy aplikacjami sterującymi a warstwą sprzętową i systemem operacyjnym”.

Jej słuszność, niezależnie od rozważań czysto informatycznych, postanowił wykazać przeprowadzając liczne badania symulacyjne i eksperymenty laboratoryjne na samodzielnie wykonanym wielowęzłowym układzie sterowania napędami górnej części aktywnego egzoszkieletu ręki. W tym celu zaprojektował i zbudował prototyp takiego egzoszkieletu oraz opracował dla niego modułowy system sterowania. Zaproponowane metody realizacji postawionych celów oceniam jako oryginalne, trafnie dobrane i dające potencjalną możliwość uzyskania interesujących rezultatów teoretycznych i praktycznych.

3. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 161 stron. Właściwy tekst poprzedzony jest rozbudowanym spisem treści i zakończony wykazem źródeł bibliograficznych. Praca zawiera 113 ilustracji i 9 tabel.

Merytorycznie pracę można podzielić na trzy części. Każda część opisuje zagadnienia częściowo znane z literatury, ale zawiera również oryginalne dokonania Doktoranta, o charakterze zarówno naukowym, jak i praktycznym. I tak:

- część pierwsza, czyli rozdziały 1 i 2, obejmuje analizę problemu, przegląd dostępnych rozwiązań o zbliżonej funkcjonalności, a także określenie autorskiej koncepcji oprogramowania pośredniczącego;
- część druga, ujęta w obszernym rozdziale 3 i rozdziale 4, odnosi się bezpośrednio do tytułu rozprawy i dotyczy opracowanych koncepcji oraz implementacji podsystemów: lokalnej i globalnej wymiany informacji (LNCL i GNCL), automatycznej detekcji węzłów systemu (NDL), adaptacji i rozgłaszania zdarzeń (EBL) oraz abstrakcyjnej warstwy sprzętowej (HAL). W celu sprawdzenia systemów komunikacyjnych przeprowadzono badania laboratoryjnego wielowęzłowego systemu sprzętowego obejmującego do 8 modułów Raspberry Pi 2B v1.1;
- część trzecia, obejmująca rozdziały 5 i 6, opisuje zbudowany przez Autora w celu weryfikacji poprawności opracowanego oprogramowania prototyp egzoszkieletu ręki, będący przykładem układu modułowego. Przedstawiono model kinematyczny egzoszkieletu, wyniki optymalizacji parametrów regulatora wraz z opracowanym modelem napędów oraz aplikacje sterujące. Całość uzupełniono omówieniem wyników wszechstronnych badań.

W ostatnim, 7 rozdziale podsumowano osiągnięte cele szczegółowe rozprawy oraz wskazano na możliwe inne zastosowania zaproponowanych rozwiązań.

W zakończeniu rozprawy podano liczący 141 pozycji spis wykorzystanych źródeł bibliograficznych. Obejmują one artykuły naukowe opublikowane w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, jak również dokumentację oprogramowania i sprzętu – wszystko przemieszane i zestawione w niejasnym porządku. Podano także jeden podręcznik akademicki (poz. [141]), co nie jest moim zdaniem odwołaniem właściwym dla rozpraw doktorskich.

Spis obejmuje 3 prace współautorstwa Doktoranta, ściśle związane z tematem rozprawy doktorskiej, opublikowane w krajowych czasopismach. Z danych internetowych wynika, że w kwietniu br. ukazała się kolejna praca współautorstwa Doktoranta na temat oprogramowania pośredniczącego, tym razem w czasopiśmie z listy JCR (*Sensors* 2022, 22(8), 2986).

4. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY

Autor rozprawy rozwiązał postawione cele w sposób kompleksowy, właściwie przywołując źródła inspiracji i założenia proponowanych metod. Złożone zagadnienia informatyczne przedstawił w formie właściwej dla prac naukowych, tj. podając odniesienia do źródeł literaturowych, formułując odpowiednie założenia funkcjonalne oraz projektując odpowiednie elementy tworzące strukturę adaptacyjnego systemu wymiany informacji i weryfikując ich poprawność. Skuteczność proponowanych metod pośredniczącego wspomaganie projektowania systemu sterowania egzoszkieletem ręki zilustrował wynikami licznych badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Zamieścił również krytyczne dyskusje otrzymanych rezultatów.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. w grupie zagadnień dotyczących oprogramowania pośredniczącego dla systemów sterowania:
 - opracowanie autorskiej koncepcji oprogramowania pośredniczącego oraz zbadanie możliwości jej wykorzystania w rozproszonych i modułowych systemach sterowania urządzeń robotycznych;
 - opracowanie i implementację lokalnego i globalnego podsystemu wymiany informacji wraz z przeprowadzeniem badań wydajnościowych;
 - opracowanie koncepcji oraz implementację podsystemów dystrybucji zdarzeń i detekcji elementów sieci;
2. w grupie zagadnień dotyczących implementacji programowo-sprzętowej opracowanych algorytmów:
 - opracowanie i wykonanie prototypu egzoszkieletu kończyny górnej;
 - opracowanie modelu symulacyjnego napędów i układów sterowania oraz przeprowadzenie optymalizacji parametrów regulatorów;
 - implementację programów sterujących na bazie opracowanego oprogramowania pośredniczącego i wykonanie badań układu prototypowego.

5. UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka, na ogół dość drobnych wątpliwości i uwag natury ogólnej, wartych komentarza Doktoranta:

1. czym wytłumaczyć fakt, iż średni czas przesyłu pojedynczego pakietu dla rozmiaru pakietu równego 2048 bajtów jest większy zarówno od czasu dla rozmiaru 1024, jak i 4096 (Tabela 4.1 oraz rys. 4.4, str. 73, 74) – z czego może wynikać brak monotoniczności?
2. algorytm PID regulatora opisany wzorem (5.8) oraz pokazany na rys. 5.4 ma formę bardzo elementarną, raczej niestosowaną w praktyce – m.in. brakuje filtra w torze różniczkowania i bloku ograniczeń sygnału wyjściowego. Jest ogólnie znane, że komercyjne wersje

algorytmów PID mają wiele uzupełniających modyfikacji, zwiększających ich efektywność i odporność na zmiany parametrów sterowanego obiektu (punktu pracy) oraz przeciwdziałających niekorzystnym wpływom ograniczeń sygnałów (tzw. układy *anti-windup*). Autor omawiając prototyp egzozszkieletu wielokrotnie pisze o konieczności stosowania ograniczeń (np. na str. 124), choć wskazuje głównie na aspekty bezpieczeństwa operatora (rozdział 6.5.5). Czy rozważano w czasie badań wykorzystanie bardziej złożonej wersji algorytmu sterowania?

3. w uzupełnieniu poprzedniej uwagi powstaje pytanie czy adaptacja wzmocnień regulatorów metodą określaną w literaturze jako *gain scheduling*, opisana szczegółowo na str. 96 i dalszych i pokazana na rys. 5.39 – 5.44, a polegającą na uzależnieniu wartości współczynników wzmocnienia regulatorów od położenia kąтового i kierunku ruchu w złączach, wspomaganą projektowo algorytmem genetycznym (5.16), nie byłaby łatwiejsza przy zastosowaniu bardziej złożonego algorytmu sterowania? Czy Autor przeprowadził jakieś próby dla mniejszego zakresu przestrojeń wzmocnień regulatorów zwłaszcza, że granice przedziałów zmienności momentów dla złącza łokciowego na str. 103 oraz dla złącza barkowego 2 na str. 105 wydają się być dość arbitralne?
4. wykonany prototyp egzozszkieletu może pracować w dwóch trybach: nadsztywnym i rehabilitacyjnym; oba tryby znacząco różnią się z punktu widzenia zadań układu sterowania – w pierwszym trybie regulator wspomaga operatora bazując na sygnałach z zestawu czujników nacisku, w drugim realizuje regulację programową według predefiniowanych trajektorii ruchu. Praktyka pokazuje, że dla obu zadań powinno się dobierać inne parametry algorytmu PID. Czy Autor próbował uzależnić nastawy regulatorów PID od aktualnie wybranego trybu pracy egzozszkieletu?
5. w uzupełnieniu uwagi 4. – jak zrealizowano generator trajektorii egzozszkieletu w trybie rehabilitacyjnym? Czy uczestniczyła w tym któraś z warstw oprogramowania pośredniczącego?
6. jak już wspomniano, Autor tworząc oprogramowanie w sposób właściwy zwracał dużą uwagę na problemy bezpieczeństwa operatora. Na str. 145 napisał, że „w trybie rehabilitacyjnym wykorzystywane są te same funkcjonalności w zakresie bezpieczeństwa, jak ma to miejsce w trybie nadsztywnym”. Czy mógłby przybliżyć w jaki sposób w oprogramowaniu uwzględnił kontrolę maksymalnego momentu i maksymalnej prędkości obrotowej obsługiwanego złącza egzozszkieletu w obu trybach, w kontekście właściwości algorytmu PID?
7. Jak rozumieć zapis na str. 140 „Próba uruchomienia każdej kolejnej aplikacji **spowoduje niezdefiniowane zachowanie układu.**”?

Ponadto:

8. w rozprawie brakuje spisu oznaczeń i skrótów oraz spisów rysunków, tabel i fragmentów kodu co jest odstępstwem od przyjętych standardów i utrudnia lekturę;
9. w podsumowaniu brakuje także opisu dorobku publikacyjnego Doktoranta oraz informacji na temat Jego zaangażowania w projektach badawczych co podkreśliłoby umiejscowienie tematyki doktoratu w obszarze badań naukowych reprezentowanej dyscypliny.

Edycja rozprawy jest bardzo staranna. W czasie lektury zauważyłem jedynie bardzo drobne niedociągnięcia edytorskie, np.:

- błędy interpunkcyjne w cytowaniu literatury: *zdanie_kropka_spacja_[nr pozycji]* zamiast *zdanie_ spacja_[nr pozycji]_kropka*;
- inne oznaczenie wątków w tekście na stronie 71 (A i B) oraz na rysunku 4.1 (#1 i #2);
- błędne sformułowanie *przemysł zbrojny* zamiast *zbrojeniowy* na stronie 89;
- niepoprawna forma *złącz* zamiast *złączy* na stronie 91 i dalszych;
- błędna numeracja rysunku 8.11 zamiast 6.11 na stronie 138;
- na rysunkach 6.12 – 6.16 na stronach 147 – 149 lepsza moim zdaniem byłaby kolejność następcza: *sygnał czujnika nacisku, prąd zasilania, prędkość obrotowa, położenie kątowe*.

Uwagi o charakterze ogólnym i zauważone błędy edycyjne w żadnym stopniu nie obniżają mojej pozytywnej oceny całości rozprawy a tym samym nie powodują konieczności jej zmian ani uzupełnień.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Mgr inż. Przemysław Strzelczyk wykazał się bardzo szeroką ogólną wiedzą w zakresie systemów oprogramowania pośredniczącego a szczególnie dotyczącą warstwy komunikacyjnej i jej funkcji kontrolnych w zakresie konfiguracji i podstawowych zasad bezpieczeństwa systemu sterowania.

Zadanie naukowe określone w tytule i tezach rozprawy zostało jasno sformułowane a następnie poprawnie rozwiązane przy użyciu właściwej metodyki oraz potwierdzone na drodze licznych badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykonanych za pomocą nowoczesnych narzędzi informatycznych, pomiarowych i sprzętowych. Tym samym postawione w rozprawie cele zostały osiągnięte a teza udowodniona.

Dokonania Doktoranta przedstawione w rozprawie uważam za oryginalne i stanowiące zauważalny wkład w rozwój wymiany informacji w rozproszonych układach sterowania. Autor rozprawy wykazał, że posiada niezbędną wiedzę w zakresie reprezentowanej dyscypliny oraz że ma duże predyspozycje do prowadzenia badań.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Przemysława Strzelczyka spełnia w całej rozciągłości wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika, dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych (Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych – Dz. U. z 2018 r., poz. 1818 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Przemysława Strzelczyka do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

