

Recenzja

rozprawy doktorskiej autorstwa mgra inż. Grzegorza Witkowskiego pt. *Badania rozproszonego systemu sterowania osprzętu jednonaczyniowej koparki hydraulicznej.*

I. Wstęp

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Grzegorza Witkowskiego pod podanym powyżej tytułem zawiera łącznie 191 stron, w tym:

- Spis treści – str. 5-6.
- Wykaz ważniejszych oznaczeń – str. 7.
- Treści związane z realizacją pracy zostały przedstawione w postaci 12 rozdziałów (str. 8-180). Większość rozdziałów podzielono na bardziej szczegółowe podrozdziały, obejmujące opisy poszczególnych analiz i działań wykonanych w ramach pracy. Rozdział 12 zawiera wnioski z przeprowadzonych prac.
- Rozdział 13 zawiera spis literatury.
- Na końcu zamieszczono streszczenie w języku polskim (rozdział 14, str. 188-189) i angielskim (rozdział 15, str. 190-191).

II. Charakterystyka pracy

Rozdział 1. Zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki realizowanej w ramach pracy. Autor uzasadnia tutaj podjęcie tematu pracy z jednej strony rosnącymi wymaganiami dotyczącymi precyzji wykonywania ruchów roboczych (Na współczesnym placu budowy wymagania dotyczące precyzji i dokładności prowadzonych prac wciąż rosną, co wiąże się z koniecznością poszukiwań nowych rozwiązań (...)), natomiast z drugiej strony bardzo ważnym zagadnieniem minimalizacji zużycia energii i zmniejszenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery (*Należy wspomnieć również o czynnikach ekonomicznych polegających (...) na minimalizowaniu zużycia energii oraz czynników ekologicznych związanych z emisją substancji szkodliwych (...)*). Autor konkluduje, że można to osiągnąć poprzez częściową lub całkowitą automatyzację pracy urządzenia.

Uwaga ogólna: moim zdaniem argumentacja autora jest słuszna, przy czym poza zwiększeniem precyzji można by również wskazać np. na możliwość zwiększenia szybkości wykonywania zadań (ruchów roboczych) przez system automatyczny w porównaniu do obsługi ręcznej.

G.Filo

Rozdział 2. Został zatytułowany "*Automatyzacja maszyn do robót ziemnych*". Na początku autor powtórnie przywołał korzyści wynikające z automatyzacji systemów maszyn roboczych. Następnie, w ramach podrozdziału 2.1 zostało podanych kilka konkretnych przykładów automatyzacji (Hitachi, Caterpillar, Liebherr).

Przywołane przykłady dotyczą koparek, czyli maszyn z którymi ściśle związana jest tematyka realizowanej pracy. Natomiast dotyczą one systemów, które były wprowadzane głównie w latach 70-tych i 80-tych XX wieku, stąd według mnie autor mógł zaprezentować również bardziej współczesne rozwiązania.

Uwagi edycyjne do rozdziału 2

W podrozdziale 2.2 brakuje akapitu wprowadzającego, bezpośrednio po tytule znajduje się rozpoczęcie sekcji 2.2.1.

Sekcje 2.2.1 – 2.2.3 zawierają cechy charakterystyczne i przykłady poszczególnych systemów maszyn roboczych, w tym kontroli silnika i układu hydraulicznego, zabezpieczeń, antykolizyjne, kontroli toru narzędzia.

W podpisie rysunku 2.7 znajduje się element 4 GPS. Jest to określenie bardzo ogólne, z rysunku wynika, że podpis powinien brzmieć "4. Antena GPS".

W podpisach rysunków 2.9 i 2.10 nie zostały podane odnośniki do źródła.

Rozdział 3. Dotyczy analizy rozproszonych systemów sterowania. Autor poruszył tutaj zagadnienia interdyscyplinarne, związane głównie z technologiami informatycznymi, w tym sieciami komputerowymi. W podrozdziale 3.1 została opisana ogólna struktura rozproszonego, rozległego systemu sterowania. Następnie, w podrozdziałach 3.2 i 3.3 przedstawiono odpowiednio cechy charakterystyczne oraz analizę możliwości i zasadności ich stosowania w układach maszyn roboczych. Autor wskazał na warstwową budowę tego typu systemów rozproszonych i scharakteryzował trzy główne warstwy.

Uwagi do rozdziału 3

W tekście na str. 39 występuje odwołanie do rysunku 18. Jest to prawdopodobnie omyłkowe odwołanie do rys. 3.6.

Rys.3.7 jest w języku angielskim.

Uwaga dotycząca struktury rozproszonego układu sterowania maszyn roboczych: w akapicie tekstu w dolnej części strony 39 autor pisze m.in.: "*Należy mieć na uwadze, że każdy obiekt w postaci maszyny roboczej winien posiadać własny węzeł procesowy (...)*". Natomiast na rys. 3.9 warstwa procesu dla wielu maszyn jest przedstawiona w postaci pojedynczego bloku. W mojej opinii bardziej szczegółowe przedstawienie składników warstwy procesu na rys. 3.9 mogłoby polepszyć użyteczność tego diagramu.

Rozdział 4. Zawiera cel i tezę pracy. W świetle uprzednio przeprowadzonych analiz, cel pracy został sformułowany jako: *opracowanie i zrealizowanie rozproszonego systemu sterowania eliminującego ograniczenia występujące w konwencjonalnych systemach.*

W mojej opinii cel pracy został określony w sposób jasny i zrozumiały z niewielką uwagą: cała praca (zresztą zgodnie z tytułem) dotyczy jednonaczyniowej koparki hydraulicznej, natomiast w celu pracy zadeklarowano "(...) zrealizowanie rozproszonego systemu

GTR

sterowania (...)" bez określenia dla jakiego urządzenia ma być przeznaczony ten system. Warto zauważyć, że nazwa pojawia się w tezie pracy, jednak również nie jest to odniesienie wprost do jednonaczyniowej koparki hydraulicznej, tylko "(...) *maszyny do robót ziemnych (...)*".

Rozdział 5. Opis stanowiska badawczego. Autor przedstawił schematy, zdjęcia, charakterystyki oraz parametry elementów stanowiska badawczego przygotowanego na rzecz realizacji pracy. Jest widoczne, że autor od początku realizacji pracy przykładą dużą wagę do badań laboratoryjnych. W mojej opinii jest to bardzo pozytywne, ponieważ rezultaty eksperymentów laboratoryjnych są powszechnie uznawane za bardziej wartościowe niż wyniki symulacji komputerowych.

Uwagi edycyjne do rozdziału 5

Z porównania tekstu w dolnej części strony 43 z rysunkami 5.1 i 5.2 wynika, że rysunki te powinny zostać zamienione miejscami;

Schematy na rys. 5.5, 5.10, 5.11 są zbyt mało pomniejszone, a przez to mało czytelne. Według mnie powinny być zdecydowanie powiększone;

Na rysunku 5.5 są oznaczenia elementów 1,2,3,4 których opisy nie pojawiają się w podpisie rysunku;

Na str. 49 pojawia się odsyłacz z numerem rysunku zapisanym w postaci liczby rzymskiej "*Wyspa zaworowa została przedstawiona na rysunku XXII*".

Rozdział 6. Budowa rozproszonego systemu sterowania. W rozdziale opisano elementy układu sterowania (stacje i panele operatorskie, sterownik, przetworniki A/C i C/A) oraz architekturę całego systemu z podziałem na warstwy zidentyfikowane wcześniej w rozdziale 3. Znajduje się tutaj również charakterystyka warstwy sieciowej oraz zaprojektowanego i wykonanego oprogramowania.

Rozdział 7. Zawiera opis modelu dynamiki osprzętu koparki. Model składa się z układu liniowego w postaci połączonego członu całkującego i oscylacyjnego sformułowanego dla każdego napędu (siłowników wysięgnika, ramienia i łyżki) oraz elementu nieliniowego w postaci strefy nieczułości za pomocą której uwzględniono przekrycie zaworu proporcjonalnego. Autor wykonał linearyzację modelu każdego elementu w otoczeniu wybranych punktów pracy. Domknięcie modelu stanowi opracowana przez autora i przedstawiona w rozdziale 10 procedura rozwiązania odwrotnego i prostego zadania kinematyki dla rozważanego osprzętu koparki.

Uwaga edycyjna

Przebiegi na wykresach rys. 7.7-7.9 są bardzo zbliżone. Według mnie, zamiast przedstawiać osobno odpowiedź obiektu i modelu (po prawej), ciekawsze byłoby pokazanie powiększenia wykresów przemieszczeń w pobliżu wartości krańcowych.

Rozdział 8 i 9. Synteza, strojenie i eksperyment z regulatorami FLC. Rozdziały te zawierają elementy teorii zbiorów rozmytych, w tym pojęcia, zbiory, funkcje

przynależności, operatory, reguły, struktura typowego modelu rozmytego. W dalszej części przedstawiono trzy podstawowe etapy rozmytego przetwarzania sygnałów, czyli rozmywanie, wnioskowanie i wyostrozanie oraz cechy i wytyczne do projektowania regulatora rozmytego (FLC). Następnie autor przeprowadził syntezę rozmytych regulatorów do pozycjonowania poszczególnych siłowników: wysięgnika, ramienia i łyżki osprzętu koparki. Jako podstawę struktury regulatora przyjęto rozmyte wersje regulatorów PI (nazwane FPI). Przyjęto podział zakresu każdego parametru wejściowego i wyjściowego na 7 przedziałów rozmytych, wybrano rozmyte operatory MIN i MAX oraz metodę wyostrozania COA. W kolejnym etapie przeprowadzono proces strojenia, przy założeniu podstawowej metody modyfikacji współczynników skalujących. Na końcu wykonano badania symulacyjne i eksperymenty stanowiskowe obejmujące odpowiedź na skok jednostkowy, zdolność do kompensacji krótkotrwałych zakłóceń oraz odpowiedzi na bardziej złożone wymuszenie (narastanie liniowe, sygnał harmoniczny, prostokątny). We wnioskach z prac autor podkreślił prawidłowe działanie regulatorów FPI oraz wysoki stopień zgodności wyników symulacji i eksperymentów laboratoryjnych.

Uwagi edycyjne do rozdziałów 8, 9

Na rys. 8.8 brakuje zaznaczonych ostrych sygnałów wejściowych do bloku *Fuzyfikacji*.

Rys. 8.14 na stronie 100 wg mnie jest mało przydatny, nie wyjaśnia sposobu wyznaczania wartości ostrej metodą COA.

Str. 112 i 114. Dwukrotnie występuje punkt "*Regulator rozmyty FPI dla układu regulacji położenia siłownika ramienia osprzętu*", natomiast brakuje "*(...) siłownika łyżki osprzętu*". Poza tym, dla wszystkich trzech członów zastosowano identyczne oznaczenia e , Δe i Δr , co może być nieco mylące. Myślę, że lepszym rozwiązaniem byłoby np. użycie indeksów jasno określających każdy człon.

Na rys.9-15 – 9.23 różnice odpowiedzi modelu i układu są słabo widoczne. Uważam, że mogłoby pomóc powiększenie kluczowych obszarów, jak zrobiono np. na rys. 11.18

Rozdział 10. Zawiera opis autorskich sposobów sterowania osprzętem, w tym rozwiązania prostego i odwrotnego zadania kinematyki dla układu osprzętu oraz dwie metody planowania trajektorii z uwzględnieniem korekcji.

Nie mam uwag merytorycznych do treści zamieszczonej w tym rozdziale. Z punktu widzenia edycyjnego uważam, że nieco niefortunne było użycie przez autora małego "L" do oznaczenia długości, ponieważ wizualnie, zwłaszcza przy czcionce bezszeryfowej, małe "L" wygląda identycznie jak wielkie "I". Pojawiają się także drobne błędy, np. oznaczenie długości na str. 144 wygląda jak: "(...) długość odcinka LI (...)", a w przywołanym wzorze 10.18 jest " l_L ".

Rozdział 11. Przedstawia wyniki badań laboratoryjnych z zastosowaniem opisanych w rozdziale 10 procedur wyznaczania trajektorii. Rozpoczęto od testowania ruchu narzędzia po linii prostej, między punktem początkowym i końcowym przy wykorzystaniu interpolacji liniowej z różnymi prędkościami z zakresu 10-50 mm/s. Największe błędy pozycjonowania nie przekroczyły 6mm, co zostało uznane za wynik w pełni akceptowalny.

Drugi eksperyment dotyczył odwzorowania bardziej złożonego ruchu roboczego między czterema punktami wyznaczającymi trzy odcinki składowe, w dwóch wariantach: ze stałym kątem przyłożenia narzędzia oraz z korekcją polegającą na dostosowaniu kąta przyłożenia narzędzia w celu uzyskania styczności do realizowanego profilu i uniknięcia kolizji. W ramach trzeciego eksperymentu zrealizowano trajektorię opisaną za pomocą interpolacji trzech punktów węzłowych wielomianem 3 stopnia.

Rozdział 12. Wnioski końcowe. Autor deklaruje, iż założony cel pracy został w pełni osiągnięty. Podkreśla wykonane zadania oraz korzyści, które wynikają z zastosowania opracowanego układu, w tym użycia systemu rozproszonego oraz logiki rozmytej. Uważam, że bardzo ważne jest odwołanie się autora do standardu Industry 4.0, w który zdecydowanie wpisuje się tematyka zrealizowana w ramach pracy.

Rozdział 13. Literatura. Wykaz literatury jest obszerny, zawiera 113 pozycji. Tematyka przywoływanych publikacji jest zgodna z zakresem realizowanej pracy. Moja uwaga (zgodnie z uwagą do rozdziału 2) dotyczy czasu publikacji. Wśród 113 pozycji, najnowszy artykuł jest z roku 2016 ([6]). Poza tym, pojawia się 6 pozycji z roku 2015, a pozostałe są starsze. W mojej opinii byłoby możliwe znalezienie również nowszych publikacji w zakresie tematu pracy.

III. Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

(1) Uwaga dotycząca analizy literatury. W sekcji 2.2.4 (str. 19-26) przeprowadzono analizę literaturową dotyczącą zagadnień automatyzacji maszyn roboczych. W części pierwszej zostały przedstawione prace prowadzone w polskich ośrodkach naukowych, natomiast część druga dotyczy publikacji z ośrodków zagranicznych. Na początku drugiej części autor zaznacza: *"By przedstawić aktualny stan badań, zaprezentowano prace opublikowane po 2000r."*. W mojej opinii przywołane publikacje w obu częściach są adekwatne, wartościowe, ściśle związane z tematyką pracy i tytułem podrozdziału. Natomiast pewną uwagę krytyczną można sformułować analizując daty publikacji. Publikacje z części pierwszej (polskie) są z lat 1995 – 2013, natomiast z części drugiej – z lat 2002 – 2015. Stąd, postawione przez autora ograniczenie dla części drugiej jest spełnione, natomiast z pewnością można by również znaleźć adekwatne publikacje z ostatnich 6 lat, dzięki czemu analiza byłaby pełniejsza i bardziej aktualna.

(2) Uwaga dyskusyjna dotycząca opisu budowy rozproszonego systemu sterowania: w mojej opinii podrozdziały dotyczące sprzętu (6.1-6.4) są przedstawione szczegółowo, natomiast te dotyczące budowanego oprogramowania (6.5-6.6) opisano dosyć pobieżnie. Zostało pokazanych jedynie kilka okienek (paneli) aplikacji z krótkimi opisami. Uważam, że zwłaszcza modułowi do symulacji można było poświęcić więcej uwagi, chociażby ze względu na fakt, iż w dalszej części pracy następuje porównanie wyników symulacji i eksperymentów laboratoryjnych.

G.F.Ł.

(3) Uwaga dyskusyjna dotycząca protokołów sieciowych: autor zdecydował się na równoczesne wykorzystanie obu najbardziej popularnych protokołów komunikacyjnych warstwy 4 ISO/OSI, czyli TCP i UDP. Jak powszechnie wiadomo, ze względu na specyfikę działania, protokół TCP jest bardziej bezpieczny, natomiast UDP jest szybszy (ponieważ nie wymaga potwierżeń). Natomiast w kontekście zasadności użycia obu tych protokołów równocześnie, w pracy (str. 62) zaznaczono, że podział sieci spowodował "zdecydowane obniżenie opóźnień transmisji". Czy zostały przeprowadzone testy wydajnościowe, które w sposób ilościowy pozwoliłyby na oszacowanie zysków z użycia UDP, ewentualnie testy, które wykazały, że sam protokół TCP był zbyt mało wydajny w tym konkretnym systemie?

(4) Uwaga dyskusyjna dotycząca nazewnictwa: według mnie nazwa podrozdziału 6.5 została dobrana dosyć niefortunnie. "Inżynieria oprogramowania" to gałąź IT zajmująca się technikami projektowania oprogramowania. Uważam, że tutaj lepiej pasowałoby np. "Środowiska programowania i modelowania", zwłaszcza, że w końcowej części jest mowa o środowisku modelowania 3D i analiz wytrzymałościowych DSJ Simulia SolidWorks.

(5) Uwaga dyskusyjna dotycząca formułowania funkcjonalnego modelu napędów (str. 76-77): jakie były powody i uzasadnienie przyjęcia przez autora podziału zakresu przemieszczenia każdego członu roboczego (siłownika) akurat na trzy odcinki elementarne i wyznaczenia trzech punktów pracy każdego z nich?

(6) Uwaga dyskusyjna dotycząca przedstawionej wartości ciśnienia zasilania: na str. 80 zadeklarowano "Badania prowadzono przy ciśnieniu zasilania 15 MPa". Jak wiadomo, ciśnienie w układzie hydraulicznym jest parametrem zależnym, wynikającym z równowagi sił związanych m.in. z obciążeniem i stratami. Proszę autora o uściślenie, co dokładnie miał na myśli pisząc o wartości ciśnienia zasilania.

(7) Uwaga dyskusyjna dotycząca dokładności modelu: na str. 83 i 84 zapisano odpowiednio: "Analizując przebieg sygnałów (...) można było stwierdzić wystarczającą zgodność modelu z obiektem" oraz "Wyniki (...) wskazują na dostatecznie dobrą zgodność przyjętych modeli obiektów z obiektami rzeczywistymi.". Czy zgodność stwierdzano tylko wizualnie, na podstawie przebiegów, czy np. wyznaczano wartości współczynników korelacji odpowiedzi obiektu i modelu?

(8) Pytanie dyskusyjne: na str. 94, 96, 99 itd. autor wielokrotnie używa słowa **interferencja** zamiast powszechnie używanego spolszczenia **inferencja** (od ang. *inference* – wnioskowanie, wnioskować). Czy jest to zamierzone słowo, czy pomyłka?

(9) Pytanie dyskusyjne dotyczące założonej struktury FPI: krytycy układów w logice rozmytej często wskazują na brak wypracowanych jasnych procedur doboru i strojenia

QBit

parametrów, zwłaszcza w kontekście ich dużej liczby i różnorodności. W związku z powyższym, mam następujące pytania:

- (a) Jakie były przesłanki do użycia operatorów MIN i MAX? Ich główną wadą jest całkowite pomijanie wpływu jednego ze zbiorów, np. suma $\text{MAX}(0.1, 0.9)=0.9$ oraz $\text{MAX}(0.9, 0.8)=0.9$.
- (b) Jakie były przesłanki do podziału przestrzeni rozważań wszystkich parametrów wejściowych i wyjściowych na dokładnie 7 zbiorów rozmytych?
- (c) Jaki był powód rozmieszczenia części zbiorów rozmytych w przybliżeniu równomiernie w ramach przestrzeni rozważań (jak np. rys. 8.24, 8.25, 8.26), a innych nierównomiernie (np. rys. 8.29, 8.30, 8.32)?

(10) Pytanie dyskusyjne dotyczące wielomianowej interpolacji trajektorii: autor deklaruje interpolację trzech punktów węzłowych wielomianem 3 stopnia. W tym przypadku jest to odwzorowanie niejednoznaczne, ponieważ liczba punktów węzłowych jest mniejsza niż (stopień_wielomianu+1). Jakie było dodatkowe kryterium, które pozwoliło na wykonanie jednoznacznej interpolacji?

(11) Pytanie dyskusyjne dotyczące wniosków z badań odtwarzania trajektorii (str. 178): autor przedstawia wyniki badań, które porównuje z regulacją PID, np. "Podczas realizacji trajektorii (...) i zastosowaniu regulatorów rozmytych, uzyskano największe odchyłki (...) wynoszące odpowiednio 5.72mm i 2.2mm dla regulacji rozmytej wobec odchyłek 15mm oraz 10mm dla regulacji PID". Jaka była dokładna struktura i nastawy regulatora PID użytego do badań porównawczych? W pracy nie znaleziono tych danych.

IV. Drobne błędy edycyjne

Dostrzeżone literówki, błędy interpunkcyjne, stylistyczne i ortograficzne (numer linii podany od góry: g, od dołu: d):

str.	linia	jest	powinno być
8	5g	głównie	głównie
8	16g	minimalizowaniu zużycie	minimalizowaniu zużycia
8	17g	czynników ekologicznych	czynnikach ekologicznych
11	2d	układ jezdny	układu jezdnego
12	22-23g	dwukrotnie powtórzone słowo "często"	
13	8d	obniża	obniżają
15	7d	wbudowanych	wbudowane
18	1d	podwodna	podwodny
21	5d	wyeksportowany	wyeksportowane
25	5d	sterującej pracą	sterującej pracą
26	5d	łączeni	łączenie
27	5g	do zanurzeniu	do zanurzenia
27	8g	ich odtworzeniu	ich odtworzenia (lub odtwarzania)

33	6g	<i>brak punktora</i>	
33	7d	takiego sygnały	takiego sygnału
36	2g	analogi	analogii
36	5g	maszyny roboczych	maszyny roboczej
37	8g	systemów?.	systemów?
37	11d	rozwiązać	rozwiązań
43	2g	powinien wyć	powinien być
43	9g	badań polowym	badań polowych
45	4g	skład się	składa się
45	7g	z zintegrowanym	ze zintegrowanym
49	Rys.5.10	chdraulicznego (ortograf.)	hydraulicznego
58	15g	styl: <i>Pozwala to jednocześnie na możliwość łatwej przebudowy (...)</i>	
63	16g	musza być	muszą być
65	2g	procedurą ... aplikacje	procedurę ... aplikację
68	14d	zaawansowaną symulacje	zaawansowane symulacje
69	14g	właściwego kąta przyłożenia	właściwego kąta przyłożenia
69	19g, 5d	różne wersje zapisu w pracy: Teach in, Teach-in, Teach- in, Teach -in	
71	14d	a również	jak również
71	6d	tworzenia stacji	tworzenie stacji
75	1g	przedstawiony został	przedstawione zostały
75	2g	opracowania model	opracowania modelu
81	2g	wynosiły odpowiedni	wynosiły odpowiednio
83	6d	Przeprowadzone eksperyment	Przeprowadzone eksperymenty
84	8d	Pewną wadą	Pewną wadą
84	1d	otrzymanie zbiorów	otrzymanie zbioru
85	2d	Definicją zbioru	Definicję zbioru
92	10d	zrozumień	zrozumieć
96	13g	[11,]	[11]
102	13d	charakterystyki wejściowo- wyjściową	charakterystykę wejściowo-wyjściową
118	2d	łyżki osprzęt	łyżki osprzętu
147	7g	należały zdefiniować	należało zdefiniować
147	16g	[37, 47,]	[37,47]
151	6d	styl: <i>należy uwzględnić w systemie sterowania obecność algorytmów ...</i>	
154	6g	Rzeczywisty przebieg	Rzeczywisty przebieg
167	2d	nie powodował już	nie powodowało już
175	5g	rysunku XX	rysunku 11.37
178	11g	negatywne konsekwencję	negatywne konsekwencje
178	12g	zadanych, usuwają	zadanych, które usuwają
178	20g	ograniczeniami sprzętowych	ograniczeniami sprzętowymi
179	9g	większe	zwiększenie <i>albo</i> większej
179	12g	przyjętą funkcję	przyjętą funkcję
179	19g	komunikacje i współpracy	komunikację i współpracę

V. Ocena pracy

Układy sterowania, w tym dedykowane dla maszyn roboczych, podlegają obecnie szybkiemu rozwojowi, który z jednej strony jest związany z koniecznością realizacji coraz szybszych i bardziej precyzyjnych ruchów roboczych, a z drugiej z restrykcyjnymi wymaganiami dotyczącymi minimalizacji zużycia energii oraz ograniczenia niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne. Procesowi temu sprzyja postęp technologiczny, w tym rozwój układów mikroprocesorowych pozwalających na realizację zadań sterowania z szybkością i dokładnością nieosiągalną dla nawet bardzo doświadczonego operatora ludzkiego. Jednakże, całkowite wyeliminowanie czynnika ludzkiego z wielu różnych względów jest obecnie bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Zamiast tego, pojawiają się koncepcje zwiększenia wygody oraz możliwości operatora, na przykład poprzez zapewnienie mu dostępu zdalnego do wielu różnych urządzeń w systemie rozproszonym. Tematyka realizowana w ramach recenzowanej pracy wpisuje się w te trendy. Dotyczy ona zaprojektowania, wykonania oraz przeprowadzenia badań rozproszonego systemu sterowania dedykowanego dla osprzętu typowej jednonacyniowej koparki hydraulicznej z wykorzystaniem algorytmów logiki rozmytej. Głównymi elementami wykonawczymi są trzy siłowniki, które realizują ruchy robocze poszczególnych członów osprzętu koparki za pośrednictwem 4-drogowych, 3-położeniowych proporcjonalnych rozdzielaczy zasilanych pompą o zmiennej wydajności. Użycie zaworów proporcjonalnych pozwoliło na zastosowanie zaawansowanych algorytmów sterowania bazujących na sztucznej inteligencji. Obecnie w badaniach nad układami sterowania automatycznego można zaobserwować stosowanie trzech głównych elementów sztucznej inteligencji: sieci neuronowych, logiki rozmytej oraz systemów ekspertowych. Należy wziąć pod uwagę, że wymienione techniki nie są i nie powinny być używane we wszystkich możliwych układach sterowania. Jeżeli obiekt sterowany ma charakterystykę zbliżoną do liniowej, wtedy bardzo dobrze sprawdzają się standardowe sterowniki rodzaju PID, które występują zarówno w wersji analogowej jak też cyfrowej. Autor pracy zdecydował się na zastosowanie sterowania z wykorzystaniem logiki rozmytej. W mojej opinii jest to podejście poprawne, biorąc pod uwagę liczne nieliniowości występujące w układach mechaniczno-hydraulicznych.

W ramach pracy zostały przeprowadzone zarówno badania symulacyjne, jak również eksperymenty laboratoryjne. Symulacje wymagały zbudowania modeli, w których autor wykorzystał linearyzację wokół kilku wybranych punktów pracy oraz uwzględnił pewne nieliniowości. Do badań laboratoryjnych wykorzystano stanowisko w postaci osprzętu koparki K-111, autorskie systemy: sterowania i rozproszonej komunikacji sieciowej oraz samodzielnie wykonane aplikacje do planowania trajektorii, symulacji i wizualizacji. Przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne dotyczące dokładności prowadzenia narzędzia po trajektorii definiowanej z wykorzystaniem interpolacji liniowej i wielomianowej oraz trajektorii definiowanej techniką Tech-in. Wyniki wskazują, że postawiona teza pracy została dowiedziona, wyeliminowano niektóre ograniczenia systemów konwencjonalnych, w tym: umożliwiono sterowanie i nadzór nad wieloma



maszynami, uzyskano możliwość współdzielenia danych (np. planowanych trajektorii ruchów roboczych), łatwej korekty nastaw regulatorów oraz zredukowano błędy sterowania przez zastosowanie algorytmów logiki rozmytej.

W przedstawionej recenzji zamieściłem szereg uwag o charakterze krytycznym i dyskusyjnym. Moim celem nie było jednak podważanie celu pracy ani metodyki jej realizacji, a raczej chęć doprecyzowania określonych szczegółów i zwrócenia uwagi na złożoność podjętej tematyki. W tekście pracy znalazłem również wiele drobnych literówek, błędów stylistycznych i interpunkcyjnych, które mogą świadczyć o pewnym niedopracowaniu edycyjnym, lecz nie wpływają znacząco na ocenę merytoryczną. W pełni natomiast doceniam wysiłek doktoranta w zakresie podjętego zagadnienia badania rozproszonego systemu sterowania osprzętu koparki, podkreślając, że praca jest nowatorska, złożona oraz w pewnym zakresie ma charakter multidyscyplinarny. Pomimo, że została ona zrealizowana w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna (co jest bezsporne ze względu na fakt, iż głównym obiektem fizycznym jest osprzęt koparki hydraulicznej), to autor musiał dodatkowo wykazać się rozległą wiedzą i umiejętnościami z różnych dziedzin, jak automatyka i robotyka oraz informatyka.

W aspekcie formalnej oceny przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej uważam, że praca jest kompletna. Zawiera podstawy teoretyczne, analizę merytoryczną, opis procesu modelowania, projektowania, dostrajania i budowy prototypów sterowników, charakterystykę stanowiska badawczego wraz z elementami pomiarowymi, koncepcję i wykonanie architektury systemu, konfigurację infrastruktury sieciowej dla systemu rozproszonego oraz plan i wyniki badań zarówno symulacyjnych, jak też laboratoryjnych. Uzyskane wyniki potwierdziły sformułowaną tezę pracy.

VI. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Grzegorza Witkowskiego jest zatytułowana *Badania rozproszonego systemu sterowania osprzętu jednonaczyniowej koparki hydraulicznej*. Po jej przeczytaniu, przeanalizowaniu oraz wskazaniu zarówno mocnych jak też słabszych stron jednoznacznie stwierdzam, że cel pracy został zrealizowany. Stąd, praca **spełnia** wymagania ustawy o stopniach naukowych i **może być** dopuszczona do publicznej obrony. Przedstawione uwagi dyskusyjne i krytyczne traktuję jako inspirację dla autora do dalszego samorozwoju i pogłębiania wiedzy.

Grzegorz Fiko