

26. 09. 2023

Wpłynęło dnia

Zarejestrowano pod nr

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Pietrucha

zatytułowanej

„Testowanie wybranych funkcji jazdy autonomicznej samochodu w warunkach laboratoryjnych na przykładzie stanowiska dla czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire”

Recenzja została opracowana na zlecenie z dnia 6 lipca 2023 r. wystawione przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo - Hutniczej zgodnie z uchwałą tej Rady z dnia 6 lipca 2023 r.

Recenzję wykonano zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Rozprawa mgra inż. Michała Pietrucha zatytułowana „Testowanie wybranych funkcji jazdy autonomicznej samochodu w warunkach laboratoryjnych na przykładzie stanowiska dla czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire” została opublikowana na Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie w 2023 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Andrzej Młyniec, prof. AGH, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Andrzej Wetula. Praca została wykonana jako doktorat wdrożeniowy na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i w przedsiębiorstwie Merit Poland Sp. z o.o.

Rozprawa jest napisana w języku polskim. Dzieło liczy 184 strony, w tym 160 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego podziękowaniami, dwoma streszczeniami (po angielsku i po polsku), spisem treści, indeksem skrótów oraz wykazem publikacji autora. Główna część rozprawy zawiera 7 rozdziałów oraz wykaz 381 pozycji literatury. Objętość rozprawy jest dość duża jak na tego typu opracowania w dziedzinie nauk technicznych – głównie z powodu bardzo szerokiej analizy literatury.

W rozdziale pierwszym autor opisał poziomy automatyzacji jazdy dla samochodów poruszających się w ruchu drogowym oraz wskazał na powiązanie tych funkcji z poziomem bezpieczeństwa jazdy.

W rozdziale 2 autor przedstawił cel i zakres pracy. Sformułowana jest w tym rozdziale również teza oraz plan pracy. Jako główny cel pracy określił zbadanie możliwości stworzenia za pomocą obecnie dostępnych technologii laboratoryjnego stanowiska testowego, które byłoby w stanie zasymulować wiernie świat zewnętrzny, aby w pełni przetestować i zwalidować funkcje jazdy autonomicznej kompletnego samochodu.

W rozdziale 3 przedstawiony jest przegląd czujników i systemów samochodu związanych z autonomią jazdy i funkcjami autonomicznego sterowania pojazdem ze

szczególnym uwzględnieniem zasad działania wszystkich czujników oraz częstotliwości ich wykorzystywania w pojazdach.

W rozdziale 4 przeprowadzono przegląd systemów testowania czujników które mogłyby być zastosowane w automatyzacji samochodów. W szczególności skupiono się na ich testowaniu systemach symulacji działania HIL (Hardware In the Loop). W przypadku gdy dla danego typu czujnika brak jest dostępnych komercyjnie systemów testowania autor umieszczał w tym rozdziale krótkie akapity mówiące o jego propozycjach, dotyczących zasad działania hipotetycznych systemów testowania takiego czujnika w środowisku symulującym scenariusz rzeczywistej jazdy.

W rozdziale 5 opisane są metody i dostępne stanowiska testowe do testowania wielu czujników jak i całego samochodu w systemie, w którym samochód jako integralna całość poddawany jest wirtualnym jazdom testowym (VIL – Vehicle In the Loop). W rozdziale tym autor zamieszcza również swoje autorskie pomysły, jak taki system mógłby być rozbudowany, aby testowany był cały samochód.

W rozdziale 6 opisane są badania doświadczalne zmierzające do weryfikacji dokładności czujnika kąta kierownicy na stanowisku zaprojektowanym i zbudowanym przez autora. Badania są przeprowadzone dla 3 kolejnych generacji czujnika. Autor opisuje dość pobieżnie konstrukcję stanowiska i schematy realizacji poszczególnych testów. Przeprowadza analizę wyników o oparciu o ustalone przez siebie kryteria i formułuje wnioski.

W rozdziale 7 zatytułowanym „Wnioski i dalsze kierunki prac” autor podsumowuje przeprowadzoną wcześniej analizę i odnosi się do tezy jak i celu pracy, uzasadniając dlaczego uważa, że teza została udowodniona a cel osiągnięty. Wskazuje również na to, jakie dalsze działania, badania i projekty powinny być zrealizowane aby otrzymać kompletne stanowisko testowe samochodu autonomicznego do testów symulacyjnych.

Struktura pracy nie jest typowa dla tego rodzaju opracowań i bardzo utrudnia jej ocenę. Bezpośrednio po wstępie znajduje się teza i cel pracy, a dopiero po nich następuje analiza literatury obejmująca ponad połowę pracy, przemieszana z wnioskami autora. Powoduje to, że trudno wychwycić część będącą wkładem własnym autora. Dodatkowo wiele istotnych informacji, dotyczących zwłaszcza tego, jak autor interpretuje postawioną na samym początku tezę, znajduje się dopiero na końcu pracy, w ostatnim rozdziale.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Autor przeprowadził bardzo gruntowną analizę piśmiennictwa dotyczącego systemów sensorycznych stosowanych w samochodach o różnym stopniu autonomii. Również bardzo dobrze przeanalizował dostępne systemy testowania większości z tych czujników. Do mankamentów analizy literatury należy zaliczyć brak odniesienia do podstaw analizy czujnika jako elementu automatyki oraz do podawanych przez normy i poradniki typowym metod badania czujników położenia i definicji badanych parametrów.

3. Ocena celu i tezy pracy, metod badawczych i wyników badań

W drugim rozdziale autor sformułował cel i tezę pracy. Jako cel pracy określił „zbadać możliwości stworzenia za pomocą obecnie dostępnych technologii laboratoryjnego stanowiska testowego, które byłoby w stanie zasymulować wiernie świat zewnętrzny, aby w pełni przetestować i zwalidować funkcje jazdy autonomicznej kompletnego samochodu”, natomiast teza odpowiadała uzyskaniu pozytywnej odpowiedzi w sformułowanym w celu problemie: „Możliwe jest zbudowanie stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej”.

Tak postawiony problem jest na pewno bardzo istotny z punktu widzenia aktualnego rozwoju samochodów i wprowadzania kolejnych poziomów ich automatyzacji. Opracowanie takiego systemu jest na pewno bardzo pożądanym etapem we wprowadzaniu na rynek nowych rozwiązań, zwłaszcza, że testowanie ich od razu w rzeczywistych warunkach pracy może generować niebezpieczeństwo dla osób testujących i znajdujących się w otoczeniu testowanego samochodu jak i generować znaczne koszty w przypadku nieprawidłowego działania.

Niefortunnym wydaje się jednak tak ogólne sformułowanie tezy – w jednej pracy doktorskiej nie da się opracować całego takiego systemu. Stąd też autor w kolejnym akapicie ogranicza zakres pracy do weryfikacji tezy jedynie przez przegląd istniejących rozwiązań i sprawdzenie ich kompletności w kontekście analizowanego stanowiska. Takie zadanie ma niewątpliwie również swoją wartość – jednakże bardziej pod kątem przeglądowym a nie naukowym - nie zawiera tworzenia nowej wiedzy.

Podobny problem można zauważyć analizując postawione przez autora wymagania dla stanowiska testowego. W szczególności problem pojawia się z wymaganiem piątym: *„Stanowisko testowe musi być wyposażone w możliwość bezprzewodowej stymulacji głównych czujników używanych do jazdy autonomicznej ...”*. W trakcie opisu w rozdziale 3 autor wykazuje, że czujniki IMU (Inertial Motion Unit), na które składają się trzyosiowy żyroskop i trzyosiowy akcelerometr wykonane w technologii MEMS są jednymi z podstawowych czujników wykorzystywanych zarówno w lokalizacji samochodu jako wejście do filtra Kalmana, jak i w systemach autonomicznej kontroli poślizgu, jak ABS czy elektroniczna kontrola stabilności ESC (ang. Electronic Stability Control). Z kolei w rozdziale 4.5 stwierdza *„Niestety do testów IMU nie ma urządzeń elektronicznych, będących go w stanie przetestować bezkontaktowo.”*, czym przeczy postawionej tezie. Dopiero w rozdziale 7, w podsumowaniu, stwierdza, że *„czujnik IMU może zostać pominięty podczas stymulacji i nie będzie czynnikiem blokującym stworzenie środowiska testowego do badania funkcji jazdy autonomicznej”* gdyż nie jest czujnikiem głównym a pomocniczym. Powołuje się przy tym na istniejące projekty badawcze nie podając jednak żadnej konkretnej literatury. Bardzo bym prosił, aby doktorant odniósł się do tej kwestii w trakcie obrony i udowodnił, że faktycznie wszystkie funkcje autonomiczne będą działały poprawnie bez stymulowania czujników IMU lub zaproponował pewne modyfikacje tezy pozwalające na lepsze odzwierciedlenie rezultatów przeprowadzonej przez niego analizy.

Jako uzupełnienie do przeprowadzonej analizy literaturowej doktorant pokusił się o zaproponowanie koncepcji budowy stanowisk testowych dla tych czujników, dla których nie znalazł dostępnych komercyjnie systemów testowych – przykładowo kamer termowizyjnych. Takie podejście należy uznać za mocno dyskusyjne, gdyż przedstawienie samej koncepcji stanowiska testowego nie oznacza udowodnienia możliwości jego zbudowania.

Podsumowując ocenę tej części pracy uważam, że zastosowana metoda badawcza polegająca na analizie literatury i proponowaniu niesprawdzonych własnych rozwiązań jest mocno dyskusyjna i rzadko praktykowana w doktoratach z zakresu nauk technicznych, ale w kontekście postawionego celu pracy akceptowalna. Osiągnięte wyniki badań literaturowych uważam za ważne w kontekście zgromadzenia tych informacji w jednym opracowaniu, ale ze swojej natury nie są to wyniki nowe.

Kolejnym istotnym działaniem doktoranta, zmierzającym do udowodnienia tezy było zbudowanie stanowiska, na którym testowane były czujniki położenia kierownicy przy pomocy wirtualnych jazd testowych. Działania te zostały opisane w rozdziale 6. Niewątpliwym sukcesem tego działania było udowodnienie, że można stworzyć układ symulacji ruchu w

którym jednym z elementów będzie system planowania trajektorii w oprogramowaniu symulacyjnym a innym elementem będzie testowany element hardware'u - w tym przypadku czujnik położenia kierownicy. Do osiągnięć tego rozdziału można zaliczyć wykazanie, jak rozdzielczość czujnika i okres próbkowania wpływają na sposób realizacji trajektorii podczas wirtualnych jazd testowych. Podjęta została również próba oszacowania błędów wprowadzanych przez czujnik kąta kierownicy. Zdaniem recenzenta w tym rozdziale doktorant wprowadził zbyt daleko idące uproszczenie utożsamiając kąt żądany przez układ symulacyjny (CarMaker) z rzeczywistym kątem kierownicy. W rzeczywistości są to dwa różne kąty różniące się uchybem sterowania silnikiem krokowym. W rozdziale 6.2.8 doktorant uzasadnił pominięcie tego uchybu sterowania częstotliwością działania pętli sterowania i małym krokiem (stosowany był napęd z krokiem 1.8° podzielonym na 200 mikrokroków). Jest to zdecydowanie niewystarczające uzasadnienie, gdyż uchyb ten zależy od ustalonych w sterowniku współczynników regulatora PID (w rozdziale 6.2.3 wspomniane jest, że sterownik pracuje w sprzężeniu zwrotnym) oraz momentu napędowego i momentów bezwładności układu. Prosiłbym doktoranta, aby przedstawił analizę pętli sterowania tym silnikiem oraz stałej czasowej układu nadążnego.

Pomimo wykazanych powyżej uchybień uważam, że tematyka pracy jest istotna z punktu widzenia dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, cel pracy (przy założeniu uzyskania dostatecznych wyjaśnień od doktoranta w trakcie obrony) został osiągnięty a teza pracy udowodniona.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że doktorat jest realizowany jako doktorat wdrożeniowy a prowadzone badania są wykorzystywane w procesie projektowania i badania rzeczywistych produktów wykorzystywanych w przemyśle samochodowym.

Potwierdzeniem wartości naukowej pracy doktoranta jest opublikowanie jej wyników w trzech publikacjach naukowych, w tym dwóch wysoko punktowanych.

Do najistotniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

1. Zebranie w jednym opracowaniu analizy budowy i zasady działania wszystkich układów sensorycznych stosowanych w pojazdach samochodowych w celu wprowadzenia w nich różnych poziomów automatyzacji (opracowanie to z powodzeniem mogłoby być pozycją książkową wykorzystywaną w dydaktyce).
2. Wykazanie na podstawie badań literaturowych, że dla większości z tych układów sensorycznych (poza IMU) oraz dla układów wykonawczych samochodu (napęd i układ kierowniczy) możliwe jest zbudowanie systemu stymulującego te układy w taki sposób, by można było wprowadzić samochód do systemu „wirtualnej rzeczywistości” i testować jego zachowanie z wykorzystaniem wirtualnych jazd testowych.
3. Zbudowanie stanowiska testowego pozwalającego w oparciu o symulowane zachowanie całego samochodu testować poszczególne elementy jego systemów sensorycznych (w tym przypadku czujnika położenia kąтового kierownicy) i analizować wpływ własności tego systemu sensorycznego (tu: dokładności, okresu próbkowania i rozdzielczości) na zachowanie całego pojazdu.

4. Ocena edycyjnej i formalnej strony rozprawy

Rozprawa została napisana poprawnie pod kątem edycyjnym i formalnym. Pewien niedosyt budzi brak zastosowania równań do opisu zachowania układu pomiarowego i do wyznaczenia spodziewanych uchybów sterowania nadążnego, jak też do porównania uzyskanych wyników pomiarów z ich spodziewanymi teoretycznie wartościami. Autor mógł się

pokusić o głębszą analizę zjawisk zachodzących w zbudowanym układzie pomiarowym jak też i w samym czujniku.

5. Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne

W trakcie lektury pracy zauważono, poza wcześniej wymienionymi, dość niewielką liczbę uchybień formalnych czy kwestii dyskusyjnych, przedstawionych poniżej. Nie mają one jednak wpływu na ocenę pracy.

- Str. 45 – w. 8 od dołu – jest: „dwóch obciążonych kół” – prawdopodobnie chodziło o tylne.
- Str. 48, w. 13 od góry – „szerokość i wysokość obiektu” – prawdopodobnie chodziło o położenia i wymiary kątowe.
- Str. 66, w. 7 od góry – „Ta częstotliwość definiuje maksymalny zakres pomiarowy lidarów”. Gdyby tak było to zakres lidarów 20kHz by wynosił 7,5 km – a tak nie jest. Zasięg jest definiowany przez czułość i zdolność do odróżnienia sygnału odbitego od szumu, a częstotliwość przez czas resetowania stanu diody odbiorczej.
- Str. 86, w. 16 – „okres ramki” – prawdopodobnie chodziło o długość ramki.
- Str. 79 i dalsze – cały rozdział 3 zawiera bardzo dużo informacji nieistotnych z punktu widzenia rozprawy, przykładowo opis poszczególnych ramek w rozdziale 3.6 nie wnosi nic do procesu dochodzenia do celu rozprawy czy udowadniania jej tezy.
- Str. 111 w. 20 – „dokładność/precyzja/rozdzielczość” – te terminy wielokrotnie pojawiają się w pracy, ale autor nigdzie nie przytoczył ich definicji podawanych np. w normach i używa ich w sposób dość losowy.
- Str. 123, ostatni wiersz „Silnikami prądu przemiennego mogą być silniki indukcyjne lub silniki z magnesami trwałymi” – nie do końca zgadzam się z nomenklaturą.
- Str. 133, rozdział 6.2.1. Wybór slalomu z pachołkami ustawionymi co 18 m i prędkością zadaną 55 km/h jest arbitralną decyzją autora. Czy istnieją jakieś standardowe testy przeznaczone do analizy zachowania samochodu? Wcześniej wspomniano „test łosia” – czy to procedura ustandardowiona i jeżeli tak to dlaczego jej nie wykorzystano?
- Str. 135, rozdział 6.2.4 – określenie dokładności sterowania silnikiem jako długości pojedynczego mikrokroku jest niepoprawne – sam producent mówi o dokładności +/- 5% pojedynczego kroku, czyli o rząd wielkości gorszej.
- Str. 135, Autor w rozdziale 2 wyznacza sobie za jeden z celów stworzenie stanowiska do badania czujników kąta kierownicy, które ma stanowić dowód poprawności koncepcji testów technologii SbW. W opisie założeń do tych testów mówi, że testowany ma być kompletny samochód bez ingerencji w strukturę pojazdu. Natomiast w rozdziale 6.2.5. buduje stanowisko z wymontowanym czujnikiem, bez typowych oporów i bezwładności rzeczywistego układu kierowniczego czy nawet samej kolumny kierownicy. Jak pogodzić tę sprzeczność? Czy to stanowisko pozwala na uzyskanie faktycznie „proof of concept”?
- Str. 140, rozdział 6.2.8 Autor stwierdza, że opóźnienia układu nadążnego jakim jest napędzany silnikiem czujnik są pomijalnie małe nie przedstawiając żadnych obliczeń na poparcie tej tezy. Zgodnie z wcześniejszą sugestią prosiłbym o stosowane obliczenia potwierdzające to podejście. Dlaczego autor do analizy nie wykorzystał danych z enkodera znajdującego się na silniku? To pozwoliłoby zweryfikować które opóźnienia sygnału pochodzą od układu nadążnego sterowania silnikiem a które od czujnika położenia kierownicy.
- Str. 142. – w opisie do równań powinno być X_j – kąt zmierzony.

- Str. 145, rozdział 6.4.1. W rozdziale tym całkowicie pominięto wyznaczenie opóźnienia pomiędzy przebiegami zadany i uzyskany z czujnika (stwierdzono tylko, że to opóźnienie jest). Podobnie nie przeanalizowano widocznej na pierwszy rzut oka korelacji pomiędzy błędem pomiaru a przyspieszeniami. Przeprowadzenie takiej analizy znacznie wzbogaciłoby wiedzę o źródłach niedokładności.
- Str. 148 w. 12 – „Wartości podsumowane w Tab. 7 świadczą o tym, że poziom błędów SAS II jest dwukrotnie większy niż SAS I” – raczej odwrotnie
- Str. 149 Tab.7. – dlaczego do oceny jakości sterowania samochodem użyto tylko jednego parametru „liczba przewróconych pachotków”, który w dodatku przyjmuje wartości całkowite do 0 do 10, zamiast znaleźć jakąś miarę pozwalającą na ocenę sterowania w sposób bardziej ciągły?
- Str. 150. W. 9 - autor napisał „dla okresu wynoszącego 150 ms zaczynają się niewielkie rozbieżności, gdzie widać, że dokładność kąta ma niewielkie znaczenie”. Czy w związku z brakiem monotoniczności tej zależności można rozróżnić ten wpływ od czynników losowych? W jaki sposób doktorant to rozróżnia?

6. Podsumowanie

Podsumowując powyższą recenzję, z uwagi na fakt, że:

1. rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, jakim jest przetestowanie możliwości badania wpływu parametrów (tu: dokładność i częstotliwość próbkowania) układu sensorycznego samochodu (tu: czujnika położenia kąтового kierownicy) na sposób realizacji zadanej trajektorii samochodu w testach symulacyjnych z wykorzystaniem symulacyjnych jazd testowych oraz rozprawa zawiera również opis zastosowania uzyskanych wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej,
 2. postawiona teza pracy została udowodniona w stopniu wystarczającym i maksymalnym dla takiego, jak w pracy, jej sformułowania, a cel pracy został zrealizowany,
 3. doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo – Hutniczej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Leszek Podsekdowski