

Prof. dr hab. inż. Jerzy Kwaśnikowski  
Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu  
Poznań, ul. T. Parnickiego 3  
e-mail: [jerzy.kwasnikowski@put.poznan.pl](mailto:jerzy.kwasnikowski@put.poznan.pl)  
[jerzy.kwasnikowski@wsb.wroclaw.pl](mailto:jerzy.kwasnikowski@wsb.wroclaw.pl)  
tel. 505 793 489

Poznań, 14.06. 2019 r.



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Wawrzyńca Wychowańskiego**  
**p. t. „Niezależny inercyjny układ pomiaru zmian prędkości jako pętla sprzężenia  
zwrotnego w sterowaniu pociągiem”**

Podstawa opracowania: pismo Pana Prodziekana Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, Prof. dra hab. inż. Krzysztofa Zboińskiego.

### 1. Tematyka rozprawy

W recenzowanej rozprawie Autor rozważa teoretyczne (badawcze) oraz aplikacyjne (ruchowe) problemy związane z modelowaniem ruchu pojazdów szynowych, m.in. identyfikacji położenia i prędkości pojazdu – sposobów ich wykorzystania w predykcji trajektorii  $v(s)$ , szczególnie w fazach hamowania, też wg wymagań i procedur interoperacyjności transportu szynowego w UE, opracowaniem modelu fizycznego i matematycznego pojazdu szynowego i ich wykorzystaniu w procedurach programowych i sprzętowych, wdrażanych i eksperymentalnie sprawdzonych w metrze warszawskim.

### 2. Uwagi o tematyce i informacje ogólne o rozprawie

Praca dotyczy gałęzi transportu szynowego, przeżywającego renesans rozwoju.

Generowane przez transport znaczne koszty społeczne, szczególnie koszty zewnętrzne, wskazują na zalety (lądowego) transportu szynowego – małe jednostkowe zużycie energii, duże zdolności przewozowe, duże bezpieczeństwo ruchu i inne. Zalety te są niepodważalne, chociaż dość słabo znane i popularyzowane, niezbyt doceniane oraz uwzględniane przy podejmowaniu wielu decyzji w rozwoju transportu.

Toteż recenzowana rozprawa, związana z badaniami i rozwojem transportu szynowego ma duże znaczenie gospodarcze i ekologiczne a tym samym też prospołeczne.

Rozprawa wykonana jest pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Marianny Jacyny jako promotor oraz dra inż. Sławomira Jasińskiego jako promotora pomocniczego, ma 275

stron A4, składa się z kolejno: streszczeń w językach polskim i angielskim, wykazu ważniejszych terminów, oznaczeń i skrótów, wstępu oraz 10 numerowanych rozdziałów, podsumowania i wniosków, też odnoszących się do kierunków dalszych badań, wykazu materiałów źródłowych zawierającego 173 pozycji (8 stron) w językach polskim i angielskim. Pracę zamykają spisy rysunków (8 stron), tabel (2 strony) oraz 48 załączników (ze spisem 50 stron).

### 3. Charakterystyka rozprawy i problemy badawcze

Rozprawę doktorską autor przedstawia jako jeden z wyników realizacji projektu realizowanego przez Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej wspólnie z firmą Rail-Mil Computers, przy współfinansowaniu przez NCBiR w ramach programu operacyjnego UE inteligentny rozwój, na lata 2014-2020.

Jako genezę przedstawiono względy poznawcze, w tym możliwości poszerzenia wiedzy powiązanej z tematyką realizowanego projektu oraz względy praktyczne związane z możliwością implementacji autorskich rozwiązań w architekturze rzeczywistego, przewidzianego do komercyjnej eksploatacji systemu automatycznego prowadzenia pojazdów szynowych klasy CBTC (*Communications Based Train Control*), typu rmCBTC.

W tym systemie wykorzystano ciągłą, dwukierunkową, bezprzewodową transmisję danych pomiędzy urządzeniami stacjonarnymi (w torze) a pojazdowymi. Wyznaczenie pozycji pojazdu szynowego oraz określenie prędkości jazdy w danym punkcie drogi ma znaczenie krytyczne zarówno dla bezpieczeństwa realizowanego procesu jak i jego wydajności.

Po wstępie (**r. 1**) autor przedstawia identyfikację problemu badawczego (**r. 2**), w tym m.in. założenia ogólne (krzywe hamowania w układzie prędkości i drogi, tryby nadzoru nad prędkością pojazdu szynowego, niedokładność podsystemu pojazdu odometru (drogomierza), czynniki powodujące niedokładność wyznaczenia lokalizacji) dalej klasyfikację błędów wprowadzanych przez pojazdowe odometry oraz ich kompensację; fazy jazdy pojazdu szynowego pomiędzy kolejnymi punktami zatrzymania. Opisuje też pojazdowe czujniki tachometryczne oraz omawia problematykę rozprawy w literaturze współczesnej.

Cel, teza rozprawy: „*Wykorzystanie układów pomiarowych opartych o IMU, jako pętli zwrotnej sterowania pociągiem w systemie automatycznego prowadzenia pociągu klasy*

*CBTC pozwala na skrócenie czasu następstwa pociągów przy zachowaniu poziomu bezpieczeństwa realizowanego procesu transportowego na obszarze objętym systemem*” oraz zakres przedstawione są w **rozd. 3**.

Cel główny, określony „...dla jednolitego systemu automatycznego prowadzenia pociągu klasy CBTC, typu rmCBTC”, został zdefiniowany w etapach, jako: „...a) opracowanie i implementację sprzętową (b) –programową) układów pomiarowych opartych o inercyjne układy pomiarowe wykonane w technologii MEMS (ang. Micro-electromechanical systems); c) wyznaczenie kryteriów oceny dla wpływu zastosowania układów pomiarowych opartych o inercyjne układy pomiarowe w pętli zwrotnej sterowania pociągami; d) walidację i weryfikację implementacji sprzętowej; e) walidację i weryfikację implementacji programowej.”

Tezę pracy, cele główne i pomocnicze można określić jako postawione prawidłowo, ze znajomością analizowanego obszaru, uwzględniające zarówno stan obecny jak i (z)realizowane zamierzenia autora.

W następnym rozdziale (**r. 4**) przedstawiono przegląd systemów automatycznego prowadzenia pojazdów szynowych, w tym cechy charakterystyczne wybranych rozwiązań; wybrane aspekty sterowalności pojazdów metra (seria 81, Alstom Metropolis 98B, Siemens Inspiro). Wykonano też badania eksperymentalne podsystemu pojazdowego odometru z wykorzystaniem eksperymentalnych kart pomiarowych zawierających inercyjne układy pomiarowe wykonane w technologii MEMS, na torze prób STP Kabaty Metra Warszawskiego, z wykorzystaniem pojazdu typu ALSTOM METROPOLIS 98B. Eksperymentalne obejmowały każdorazowo przeprowadzenie sześciu prób według autorskiego programu badań. Interesujące zestawienie mierzonych wielkości oraz opis urządzeń We/Wy jest na rys. 9.9 (str. 184).

Opracowanie fizycznego i matematycznego modelu pojazdu szynowego oraz **dobór** komponentów aktywnych systemu pomiarowego przedstawiono w następnym (**r.5**) rozdziale. W modelu matematycznym pojazd (pociąg?) traktowany jest jako bryła sztywna o masie skupionej. Postać modelu oparta jest na analogii z modelowaniem samolotu, co w odniesieniu do pojazdów szynowych jest nowatorskie. Komponenty aktywne systemu pomiarowego dobrano w technologii mikro-elektromechanicznej MEMS

Algorytmy działania i filtracji zakłóceń, rozpoznanie których ma istotny wpływ na sterowany aktywnie ruch pojazdu, szczególnie na bezpieczeństwo ruchu, zawarto

w **rozdz. 6**. Te autorskie procedury bazują na metodzie ARMA (*ang. Auto Regression Moving Average (procedury wykorzystywane głównie w ekonometrii)*). Innowacyjność proponowanych rozwiązań polega na próbie wykorzystania narzędzi odmiennych niż wykorzystywanych standardowo, co autor - słusznie – ocenia jako kierunek słuszny i wart dalszej weryfikacji.

Metody projektowania, w tym narzędzia wykorzystywane w projektowaniu, powiązanie z układem sterowania pojazdu szynowego, przedstawiono w **rozdz. 7**.

Opisano wykorzystane narzędzia programowe (MENTOR GRAPHICS, MATLAB, ERTMS Solutions - ERTMS FORMAL SPECS i wiele innych) oraz zdefiniowano interfejsy urządzeń części pojazdowej systemu automatycznego prowadzenia pojazdów.

**W rozdz. 8** przedstawiono autorską implementację inercyjnych układów pomiarowych w systemie automatycznego prowadzenia pociągu, w tym implementację sprzętową i programową oraz ich implementację w systemie mCBTC, na przykładzie implementacji do eksploatowanego w Metrze Warszawskim pojazdu ALSTOM METROPOLIS 98B. Zaprojektowano i zbudowano eksperymentalne karty pomiarowe oraz kasetę pomiarową. Wymagało to opracowania eksperymentalnych krat pomiarowych zawierających te układy oraz ich fizyczne wykonanie i instalację na pojeździe. W tym celu zdefiniowano interfejsy zewnętrzne do systemu automatycznego prowadzenia pociągu w ujęciu szczegółowym dla specyficznej instalacji na pojeździe ALSTOM METROPOLIS 98B.

Zaprezentowano też kierunek dalszego rozwoju systemu pomiarowego, który jest rozwiązaniem innowacyjnym w skali światowych rozwiązań w zakresie podsystemu pojazdowego odometru. Opisano kierunek rozwoju implementacji sprzętowej oraz programowej inercyjnych układów pomiarowych w podsystemie pojazdowego odometru finalnej architektury systemu.

Walidację i weryfikację zastosowania inercyjnych układów pomiarowych, w tym kryteria oceny wpływu zastosowania inercyjnych układów pomiarowych, badania eksperymentalne (założenia dla badań eksperymentalnych, charakterystykę toru do badań eksperymentalnych, instalację urządzeń pomiarowych na pojeździe, opis prób przeprowadzonych w ramach badań eksperymentalnych), wreszcie omówienie wyników badań eksperymentalnych zawiera **rozdz. 9**.

Przedstawiono kryteria oceny wpływu zastosowania układów inercyjnych oraz zaproponowano autorski program badań eksperymentalnych, wraz ze szczegółowym opisem wartości mierzonych i sposobu analizy wyników. Dla badań eksperymentalnych opisano zasady wykonania sześciu prób mających na celu wykazanie zasadności wykorzystania inercyjnych układów pomiarowych w podsystemie pojazdowego odometru przez wzgląd na cechy charakterystyczne pozostałych (nieinercyjnych) pojazdowych czujników tachometrycznych. Przedstawiono też wyniki z przeprowadzonych dwu dni badań eksperymentalnych

**Rozdz. 10** to dyskusja wyników i wnioski, w tym dyskusja wyników z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, wnioski z rozprawy oraz kierunki dalszych badań. Do najważniejszych wniosków należy potwierdzenie osiągnięcia przyjętych celów oraz zasadność postawionej tezy badawczej.

Istotnym ze względu na realizowany równoległe z pracami autora projekt systemu rmCBTC, wspólnie Rail-Mil z Wydziałem Transportu Politechniki Warszawskiej, jest przedstawiony opis kierunku dalszych badań które stanowią rozszerzenie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i wpisują się w równoległe z rozprawą realizowany proces T&C (ang. Test and Commissioning) rzeczywistego systemu.

Stanowi to wielce prawdopodobnym wdrożenie efektów pracy do rzeczywistego systemu eksploatacji.

#### **4. Główne wady pracy to:**

- obszerna tematyka, obejmująca zbyt duży zakres badań, utrudniająca jasne i przejrzyste przedstawienie celu zasadniczego,
- możliwe trudności w precyzyjnym sterowaniu ruchem pociągu spowodowane modelowaniem matematycznym, w tym traktowaniem pojazdu jako bryły sztywnej o masie skupionej – proszę o wyjaśnienie tego podczas obrony,
- niezręczne używanie, np. na str. 26 i dalszych - pojęcia „...w przestrzeni prędkości i drogi...” – są to dwa wymiary – a przestrzeń (euklidesowa) jest 3-wymiarowa,
- str. 186 i dalsze, rys. 9.10 i dalsze, próby P1 do P6, trajektorie  $v(s)$  - odcięte drogi  $s$  – są chyba w metrach – nie kilometrach ?
- drobne błędy edycyjne i stylistyczne, co do których rozmawiałem z doktorantem, a których nie ma sensu tu wymieniać.





## 5. PODSUMOWANIE

Autor recenzowanej dysertacji zrealizował w niej:

- istotne poszerzenie dotychczas posiadanej wiedzy w zakresie wybranych, innowacyjnych aspektów sterowalności pojazdów szynowych, w wyniku badań własnych, z uwzględnieniem osiągnięć światowych,
- potwierdzenie zasadności zastosowania w jednolitym systemie klasy CBTC automatycznego prowadzenia pociągu układów pomiarowych wykorzystujących IMU (ang. Inertial Measurement Unit), jako elementu pętli zwrotnej w procesie sterowania, powodowanego m.in. wprowadzeniem w architekturę systemu informacji otrzymywanych z redundantnych układów pomiarowych wykorzystujących IMU,
- skuteczną implementację układów pomiarowych bazujących na inercyjnych układach pomiarowych jednolitego, przewidzianego do wdrożenia w warunkach rzeczywistej eksploatacji oraz wykorzystania komercyjnego, systemu automatycznego prowadzenia pociągu klasy CBTC, typu: mCBTC.

## 6. Konkluzja

Praca mieści się w obszarze badań właściwym dla dyscypliny naukowej transport (obecnie inżynieria lądowa i transport).

Doktorant samodzielnie przygotował recenzowaną dysertację, która stanowi oryginalne rozwiązanie omawianych problemów naukowych.

Wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w obszarze nauk technicznych w dyscyplinie transport – w odniesieniu do transportu kolejowego oraz modelowania systemów transportowych. Ponadto przygotował procedury wdrożenia opracowanego systemu do eksploatacji.

W konkluzji stwierdzam więc, że mgr inż. Wawrzyniec Wychowański spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora, a przedstawiona mi do recenzji rozprawa p. t. „**Niezależny inercyjny układ pomiaru zmian prędkości jako pętla sprzężenia zwrotnego w sterowaniu pociągami**”, spełnia kryteria stawiane rozprawie doktorskiej zawarte w ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych.

Wnioskuje o dopuszczenie kandydata do publicznej obrony, a w przypadku pozytywnego przebiegu tej obrony - o nadanie mgr inż. Wawrzyńcowi Wychowańskiemu stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej transport (obecnie inżynieria lądowa i transport).

Wnioskuje też do Wysokiej Rady o wyróżnienie pracy doktorskiej, ze względu na jej oryginalność i innowacyjność.



(Jerzy Kwaśnikowski)