

## **Mikroprocesorowy system przeciwpoślizgowy dla trakcyjnych pojazdów szynowych spełniający wymagania unijnych Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności**

Nadmierny poślizg podczas rozruchu lub hamowania trakcyjnego pojazdu szynowego powoduje znaczne obniżenie skuteczności rozruchu lub hamowania (pogorszenie warunków bezpieczeństwa) oraz może prowadzić do poważnego uszkodzenia kół lub uszkodzenia szyn (wzrost kosztów eksploatacji i pogorszenie komfortu pasażerów). Z tego powodu nowoczesne pojazdy trakcyjne wyposażane są w układy przeciwpoślizgowe mające na celu wykrywanie rozwijającego się poślizgu i jego likwidację. Ze względu na silną nieliniowość obiektu regulacji, w nowoczesnych układach przeciwpoślizgowych nie stosuje się klasycznych regulatorów liniowych, ale regulatory nieliniowe wykorzystujące wiedzę ekspercką oraz metody sztucznej inteligencji – zwłaszcza logikę rozmytą. Projektowanie i strojenie tego typu regulatorów wymaga zastosowania symulatora pojazdu, uwzględniającego rzeczywiste zjawiska zachodzące podczas procesu poślizgu. Dodatkowo układy przeciwpoślizgowe stosowane w pojazdach wykorzystywanych w ruchu międzynarodowym muszą spełniać wymagania unijnych Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności. Z powyższych względów w ramach niniejszego projektu podjęto prace badawcze obejmujące opracowanie, wykonanie i badania symulacyjne układu przeciwpoślizgowego dla rozruchu i hamowania pojazdów trakcyjnych. Ze względu na interdyscyplinarność projektu stworzono zespół specjalistów naukowo-badawczych reprezentujących różne dziedziny (mechanika, pneumatyka, elektrotechnika, elektronika, automatyka, informatyka).

Podczas realizacji projektu zrealizowano szereg zadań naukowo-badawczych i inżynierskich, a mianowicie wykonano:

- analizę literatury w zakresie urządzeń przeciwpoślizgowych oraz zjawisk zachodzących podczas poślizgu,
- opracowano i wykonano stanowisko do badań czujników prędkości oraz dokonano na podstawie badań wyboru czujników do dalszych prac nad układem przeciwpoślizgowym,
- na podstawie przeprowadzonych analiz zakłóceń sygnału prędkości, rozeznaczonych cyfrowych metod ich filtrowania oraz wykonanych badań symulacyjnych opracowano algorytm wyznaczania prędkości referencyjnej pojazdu do dalszych badań symulacyjnych układu przeciwpoślizgowego,
- w celu zrealizowania symulatora do badań układów przeciwpoślizgowych pojazdów opracowano i zrealizowano nieliniowy model pojazdu trakcyjnego w zakresie napędu i hamowania oraz symulator układu przeciwpoślizgowego; modele te uwzględniały wszystkie istotne zjawiska zachodzące podczas procesu poślizgu kół,
- na podstawie przeanalizowanych obowiązujących dokumentów normatywnych opracowano program prób i badań układu przeciwpoślizgowego,
- opracowano dokumentację na podstawie której wykonano model użytkowy układu przeciwpoślizgowego; w skład układu wchodziły pneumatyczne zawory upustowe oraz nowo zaprojektowany sterownik mikroprocesorowy dla pojazdu trakcyjnego cztero- i sześć-osowego,
- opracowano algorytmy do prowadzenia diagnostyki układu przeciwpoślizgowego na pojeździe oraz algorytmy sterowania układem przeciwpoślizgowym z wykorzystaniem technologii logiki rozmytej,
- wykonano stanowisko laboratoryjne do badań modelu użytkowego układu przeciwpoślizgowego,

- opracowano nowe oprogramowanie komputerowe do akwizycji danych diagnostycznych z układu przeciwpoślizgowego podczas badań, który znajdzie również zastosowanie diagnostyczne układu przeciwpoślizgowego zabudowanego na pojeździe,
- wykonano badania laboratoryjne w zakresie: realizowanych przez sterownik zaimplementowanych funkcji, funkcjonowania sterownika w niskich i wysokich temperaturach (w komorze klimatycznej), kompatybilności elektromagnetycznej i odporności na zakłócenia sterownika oraz funkcjonowania i doboru stałych czasowych pneumatycznych zaworów upustowych,
- na podstawie wyników z badań opracowano kompletną dokumentację konstrukcyjną układu przeciwpoślizgowego dla lokomotyw cztero- i sześćosiowych oraz dla zespołów trakcyjnych posiadających maksimum sześć osi.

Na bazie uzyskanych wyników w ramach realizacji niniejszego projektu, wdrożono do produkcji w Polsce układy przeciwpoślizgowe dla nowych i modernizowanych pojazdów trakcyjnych (modernizowana lokomotywa cztero-osiowa EU-07m i nowy zespół trakcyjny typu 33WE).

W ramach projektu ukazały się następujące publikacje w czasopismach recenzowanych:  
**"Symulation Based Design and Tests of Wheel Slide Protection Systems for Rail Vehicles", Grażyna Barna" w Applications of Systems Science", Academic Publishing House EXIT, Warsaw 2010, str. 271-280**

Publikacja materiałów z konferencji "XVII International Conference on Systems Science", 14-16 październik Wrocław 2010.

W artykule przedstawiono zjawisko poślizgu kół podczas hamowania i omówiono jego negatywne skutki. Omówiono sposób zapobiegania temu zjawisku przez zastosowanie układów przeciwpoślizgowych. Przedstawiono schemat układu przeciwpoślizgowego dla pojazdu cztero-osiowego. Przedstawiono zasadę działania układu. Krótko opisano matematyczny model hamowanego pojazdu szynowego. Szczególny nacisk położono na krzywą przyczepności, zwłaszcza na odzyskiwanie przyczepności podczas kontrolowanego poślizgu. Przedstawiono właściwości hamowanego pojazdu szynowego jako obiektu regulacji. Uzasadniono potrzebę stosowania symulatora hamowanego pojazdu szynowego i przedstawiono kilka wariantów stanowiska symulacyjnego do badań układów przeciwpoślizgowych. Opisano program badań przedstawiony w karcie UIC 541-05 i normie EN 15595. Zdefiniowano współczynniki i kryteria umożliwiające porównanie różnych algorytmów sterowania. Opisano różne zastosowania symulatora i przedstawiono wstępne wyniki symulacji.

**"Układ przeciwpoślizgowy przy hamowaniu dla szynowych pojazdów trakcyjnych", Maksymilian Cierniewski, Marian Kaluba, Grażyna Barna; Pojazdy Szynowe, 2/2011, str. 30-33.**

W artykule zawarto materiał z prezentacji na XIX Konferencji Naukowej "Pojazdy Szynowe", Targanice, 15-17 września 2010. Na konferencji przedstawiono budowę i zasadę działania układu przeciwpoślizgowego wykorzystującego opracowany i wykonany w IPS Tabor sterownik 88ZE-01. Przedstawiono budowę sterownika oraz jego opis funkcjonalny. Zaprezentowano wstępne wyniki działania sterownika. Omówiono propozycje dalszych prac nad układem przeciwpoślizgowym.

**„Badania poligonowe układu przeciwpoślizgowego na zmodernizowanej lokomotywie typu EU07A”, Cierniewski M., Kaluba Marian., Pojazdy Szynowe 3/2012 str. 45-49**

W artykule przedstawiono wyniki prób poligonowych układu przeciwpoślizgowego opracowanego w ramach projektu rozwojowego N R10 0046 06/2009 i zabudowanego na zmoderni-

zowanej lokomotywie EU07A. Lokomotywa przeszła z wynikiem pozytywnym badania typu i jest aktualnie w eksploatacji obserwowanej.

Inne formy upowszechniania i popularyzacji wyników:

**"Simulation Based Design of Fuzzy Wheel Slide Protection Controller for Rail Vehicles", Grażyna Barna, MMAR`2010 (15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics), 23-26 sierpień Międzyzdroje 2010**

Na konferencji przedstawiono metodę projektowania bazy reguł sterowników rozmytych układów przeciwpoślizgowych dla pojazdów szynowych. W tej metodzie wykorzystywane są wyniki symulacji działania dwóch sterowników odniesienia, z których oba wykorzystują sygnały niedostępne podczas normalnej eksploatacji układów, tj. współczynnik przyczepności oraz rzeczywistą prędkość postępową pojazdu. Przeprowadzono symulacje z wykorzystaniem modelu hamowanego pojazdu szynowego oraz sterowników zaimplementowanych w środowisku Matlab Simulink®. Zaproponowana metoda umożliwia automatyzację procesu projektowania rozmytych sterowników układów przeciwpoślizgowych.

**"Układ przeciwpoślizgowy przy hamowaniu dla szynowych pojazdów trakcyjnych", Maksymilian Cierniewski, Marian Kaluba, Grażyna Barna; XIX Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Targanice, 15-17 września 2010 (materiały konferencyjne Tom I)**

Na konferencji przedstawiono budowę i zasadę działania układu przeciwpoślizgowego wykorzystującego opracowany i wykonany w IPS Tabor sterownik 88ZE-01. Przedstawiono budowę sterownika oraz jego opis funkcjonalny. Zaprezentowano wstępne wyniki działania sterownika. Omówiono propozycje dalszych prac nad układem przeciwpoślizgowym.

**"Simulation Based Design and Tests of Wheel Slide Protection Systems for Rail Vehicles", Grażyna Barna, "XVII International Conference on Systems Science", 14-16 październik Wrocław 2010**

Na konferencji przedstawiono zjawisko poślizgu kół podczas hamowania i omówiono jego negatywne skutki. Omówiono sposób zapobiegania temu zjawisku przez zastosowanie układów przeciwpoślizgowych. Przedstawiono schemat układu przeciwpoślizgowego dla pojazdu cztero-osowego. Przedstawiono zasadę działania układu. Krótko opisano matematyczny model hamowanego pojazdu szynowego. Szczególny nacisk położono na krzywą przyczepności, zwłaszcza na odzyskiwanie przyczepności podczas kontrolowanego poślizgu. Przedstawiono właściwości hamowanego pojazdu szynowego jako obiektu regulacji. Uzasadniono potrzebę stosowania symulatora hamowanego pojazdu szynowego i przedstawiono kilka wariantów stanowiska symulacyjnego do badań układów przeciwpoślizgowych. Opisano program badań przedstawiony w karcie UIC 541-05 i normie EN 15595. Zdefiniowano współczynniki i kryteria umożliwiające porównanie różnych algorytmów sterowania. Opisano różne zastosowania symulatora i przedstawiono wstępne wyniki symulacji.

**"Theoretical Analysis of Wheel Slide Protection Controllers for Rail Vehicles", Grażyna Barna, MMAR`2011 (16th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics), 22-25 sierpień Międzyzdroje 2011**

Przedmiotem prezentacji i artykułu jest analiza teoretyczna sterowników układów przeciwpoślizgowych przy hamowaniu. W artykule przedstawiono zasadę działania sterowników układów przeciwpoślizgowych dla pojazdów szynowych oraz problemy związane z ich projektowaniem. Następnie porównano strukturę sterownika układu przeciwpoślizgowego z klasyczną strukturą układu regulacji. Porównano różne typy sterowników układów przeciwpoślizgowych

i omówiono ich wady oraz zalety. Przedstawiono wnioski dotyczące wyboru struktury oraz parametrów sterowników. Zaproponowano dalsze kierunki prac mających na celu rozwój skutecznych sterowników układów przeciwpoślizgowych

**"Control System of Wheel Slide Protection Devices for Rail Vehicles Meeting the Requirements of European Normative Documents", Grażyna Barna, XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: QSET (Quality Safety Ecology in Transport) 2011. 15-17 czerwiec, Niepołomice**

Przedmiotem prezentacji i artykułu są wymagania europejskich dokumentów normatywnych dotyczące systemu sterowania urządzeń wykrywania i likwidacji poślizgu dla pojazdów szynowych.

**"Matlab Simulink® Model of a Braked Rail Vehicle and Its Applications", Grażyna Barna, w "Technology and Engineering Applications of Simulink", InTech, 2012.**

Przedmiotem rozdziału jest przedstawienie modelu symulacyjnego hamowanego pojazdu szynowego, zaimplementowanego w środowisku Matlab Simulink® oraz jego zastosowań, obejmujących zarówno projektowanie jak i badania układów wykrywania i likwidacji poślizgu przy hamowaniu.

## **Syntetyczny opis uzyskanych wyników w formie oferty dla przedsiębiorstw**

Projekt rozwojowy Nr N R 10 00 46 06

pt.: "Mikroprocesorowy system przeciwpoślizgowy dla trakcyjnych pojazdów szynowych spełniający wymagania unijnych Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności"

Instytut Pojazdów Szynowych "TABOR" w Poznaniu

Na podstawie wykonanej analizy wymaganych parametrów czujników prędkości dla projektowanego układu przeciwpoślizgowego ustalono typy czujników, które mogłyby znaleźć zastosowanie w taborze kolejowym. Dokonano zakupu tych czujników i na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku badawczym, dokonano ich przebadania wg opracowanego programu badań. W oparciu o uzyskane wyniki wytypowano rodzaj czujnika do stosowania w układach przeciwpoślizgowych pojazdów trakcyjnych.

W oparciu o rozeznanie literaturowe i analizy uzyskanych wyników badań związanych z pomiarami prędkości przeprowadzanych dotychczas przez IPS "TABOR" na lokomotywach, opracowano algorytm wyznaczania prędkości referencyjnej niezbędnej do budowania układów przeciwpoślizgowych, pod kątem maksymalnej odporności sygnałów prędkości na występujące w trakcji zakłócenia elektryczne, elektromagnetyczne i zakłócenia związane z zabudową mechaniczną czujników. Na podstawie przeprowadzonych prób symulacyjnych różnych algorytmów filtrowania cyfrowego przyjęto do realizacji wybraną metodę filtrowania sygnałów prędkości.

Dokonano przeglądu i analizy europejskich dokumentów normatywnych dotyczących układów przeciwpoślizgowych, w tym szczególnie unijnych wymagań Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności. W celu zrealizowania badań symulacyjnych działania układu przeciwpoślizgowego (budowanego przez IPS "TABOR" w ramach niniejszego projektu), opracowano model matematyczny pojazdu i układu przeciwpoślizgowego dla fazy rozruchu i hamowania. W modelach tych zastosowano modelowanie części pneumatycznej, elektrycznej oraz mechanicznej ze szczególnym uwzględnieniem aktualnej wiedzy w zakresie opisu zjawiska dynamicznie zmiennej przyczepności koło-szyna. Na bazie opracowanych modeli matematycz-

nych zbudowano i uruchomiono symulator w środowisku Matlab/Simulink<sup>®</sup>, umożliwiającą wszechstronne badania symulacyjne opracowanego układu przeciwpoślizgowego, z możliwością doboru parametrów regulacyjnych części pneumatycznej układu jak również doboru kryteriów działania algorytmu regulatora mikroprocesorowego sterownika przeciwpoślizgowego. W wyniku przeprowadzonych wielu symulacji zweryfikowano przyjęte do realizacji algorytmu działania budowanego układu przeciwpoślizgowego oraz dokonano wstępnego doboru systemu kryteriów wykrywania i likwidacji poślizgów zestawów kołowych w trakcyjnych pojazdach szynowych.

Równolegle opracowano program prób i badań układu przeciwpoślizgowego zabudowanego na pojeździe, w oparciu o wymagania dla układów przeciwpoślizgowych zawartych między innymi w dokumentach europejskich takich jak: Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności ("Lokomotywy i wagony pasażerskie RST"; Wersja 2.0; listopad 2008; Transeuropejski System Kolei Konwencjonalnych – Podsystem Tabor Kolejowy), przepisy UIC (Karta UIC 541-05; Hamulec. Przepisy dotyczące budowy różnych części hamulca. Urządzenie przeciwpoślizgowe. Wydanie 2-gie; listopad 2005) oraz normie europejskiej (PN-EN 15595; Kolejnictwo-Hamowanie – Urządzenia przeciwpoślizgowe). Uzyskana wiedza posłużyła do prac projektowych nad modelami laboratoryjnym i użytkowym systemu przeciwpoślizgowego, a przede wszystkim do opracowania programów prób laboratoryjnych układów przeciwpoślizgowych i prób poligonowych nie objętych niniejszym projektem, a które będą przeprowadzane w przyszłości na pojeździe wyposażonym w opracowany układ przeciwpoślizgowy.

W kolejnym etapie realizacji projektu zaprojektowano i wykonano model użytkowy mikroprocesorowego układu przeciwpoślizgowego do badań w zakresie elementów pneumatycznych (przekładnik ciśnienia i zawory upustowe) i elektronicznych (mikroprocesorowy sterownik układu przeciwpoślizgowego wraz z czujnikami prędkości). Model użytkowy przebadano w zakresie realizowania przez sterownik zaimplementowanych funkcji, funkcjonowania sterownika w temperaturach od -30<sup>o</sup> do + 40<sup>o</sup>C w komorze klimatycznej, kompatybilności elektromagnetycznej i odporności na zakłócenia.

Wykonany i przebadany model układu przeciwpoślizgowego podłączono do wcześniej zbudowanego symulatora w środowisku Matlab/Simulink<sup>®</sup> w celu przeprowadzenia prób i badań symulacyjnych wykrywania i likwidacji poślizgów zestawów kołowych pojazdu. Na podstawie przeprowadzonych symulacji skorygowano i potwierdzono poprawność doboru kryteriów wykrywania i likwidacji poślizgów przy hamowaniu zaimplementowanych w sterowniku.

W dziedzinie wykrywania i likwidacji poślizgu przy rozruchu wykonano następujące prace. Opracowano model matematyczny pojazdu trakcyjnego z nowoczesnym, asynchronicznym układem napędowym oraz zbudowano jego symulator w środowisku Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Opracowano model matematyczny układu wykrywania i likwidacji poślizgu podczas rozruchu i zbudowano jego symulator w środowisku Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Opracowano programy prób i badań układu wykrywania i likwidacji poślizgu podczas rozruchu. W oparciu o opracowany program przeprowadzono badania symulacyjne działania opracowanego układu wykrywania i likwidacji poślizgu podczas rozruchu. Projekt nie obejmował realizacji sprzętowej układu napędowego wraz z jego sterownikiem dlatego też badania zostały przeprowadzone na symulatorze.

W wyniku przeprowadzonych prac opracowano dokumentację konstrukcyjną układów przeciwpoślizgowych dla:

- lokomotywy 4-osiowej (4 zawory upustowe, transmisja CAN2.0A dla realizacji funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu i rozruchu)
- lokomotywy 6-osiowej (6 zaworów upustowych, transmisja CAN2.0A dla realizacji funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu i rozruchu)
- lokomotywa 6-osiowa, (4 zawory upustowe, transmisja CAN2.0A dla realizacji funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu i rozruchu)
- lokomotywy 4-osiowej z hamulcem elektrodynamicznym (4 zawory upustowe, transmisja RS-232 dla realizacji funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu)

- lokomotywy manewrowej 2-osiowej (2 zawory upustowe, komunikacja przy pomocy sygnałów sprzętowych dla realizacji funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu)
- elektrycznego zespołu trakcyjnego 3 wózkowego, z hamulcem elektrodynamicznym, (6 zaworów upustowych, transmisja CAN2.0A, realizacja funkcji przeciwpoślizgowej przy hamowaniu i wspomaganie przy "rozruchu pod górę")

Opracowany według niniejszego projektu rozwojowego układ przeciwpoślizgowy został wdrożony (zabudowany na pojazdach szynowych, przebadany i oddany do eksploatacji) na następujących pojazdach:

- lokomotywa EU07A (1 szt. układów przeciwpoślizgowych dla lokomotywy 4-osiowej z hamulcem elektrodynamicznym) w zakresie układu wykrywania i likwidacji poślizgu przy hamowaniu i rozruchu
- zespół trakcyjny 33WE dla WKD (28 szt. układów przeciwpoślizgowych dla 3 wózkowych zespołów trakcyjnych)
- lokomotywa manewrowa 2-osiowa dla Metra Warszawa (1 szt. układu przeciwpoślizgowego).

Wyniki projektu zostały tym samym wdrożone w praktyce. Potwierdza to pełną praktyczną przydatność prowadzonych prac naukowo-badawczych w ramach projektu.

Wykonane przez IPS TABOR wyżej wymienione prace obejmujące wdrożenie do produkcji, przeprowadzenie badań (z wynikiem pozytywnym) na w/w pojazdach i przekazanie opracowanych układów przeciwpoślizgowych do eksploatacji wykraczają poza zakres projektu (jest to już przemysłowe wykorzystanie wyników projektu).

W oparciu o uzyskane wyniki realizowanego projektu możliwe jest wykonanie układu przeciwpoślizgowego zgodnego z aktualnymi wymaganiami unijnych Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności dla dowolnego kolejowego pojazdu trakcyjnego.