

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Modelowanie, symulacja i badania wrażliwości samochodowego układu automatycznego sterowania ze względu na luz i tarcie

Dariusz Żardecki¹, Mirosław Gidlewski^{1,2}, Jerzy Jackowski¹, Marek Jaśkiewicz³, Leszek Jemioł⁴

¹Instytut Pojazdów i Transportu, Wojskowa Akademia Techniczna

²Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Motoryzacji

³Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu, Politechnika Świętokrzyska

⁴Katedra Pojazdów Samochodowych, Uniwersytet Radomski

email: dariusz.zardecki@wat.edu.pl, miroslaw.gidlewski@wat.edu.pl, jerzy.jackowski@wat.edu.pl,
m.jaskiewicz@tu.kielce.pl, leszek.jemiol@urad.edu.pl

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono badania dotyczące wpływu luzu i tarcia w układzie kierowniczym samochodu na automatycznie sterowany proces zmiany pasa ruchu. Opracowany wcześniej algorytm sterownika został oparty na bardzo uproszczonych modelach referencyjnych dynamiki samochodu bez uwzględnienia nieliniowości układu kierowniczego. Szeroko zakrojone badania symulacyjne opracowanego algorytmu sterownika dwuosowego samochodu ciężarowego przeprowadzono w bardzo szerokim zakresie zmian warunków drogowych i eksploatacyjnych. Wyniki badań potwierdziły zalety opracowanego sterownika. Badania przedstawione w artykule skupiają się na niepublikowanym dotychczas obszarze analiz dotyczących wrażliwości sterownika zmiany pasa ruchu na luz i tarcie występujące w układzie kierowniczym sterowanego pojazdu. W tym celu stosowany dotychczas model dynamiki wirtualnego samochodu ciężarowego został uzupełniony o elementy opisujące w możliwie najprostszy sposób luz i tarcie w członie wykonawczym mechanizmu kierowniczego oraz w mechanizmie zwrotniczym. Analiza wyników takich badań pozwoliła odpowiedzieć na ważne pytanie, czy samochody autonomiczne po długotrwałym użytkowaniu, czyli zużyte mechanicznie, będą wystarczająco bezpieczne dla użytkowników.

SŁOWA KLUCZOWE: systemy sterowania pojazdem, autonomia procesu zmiany pasa ruchu, luz i tarcie, symulacja, analiza wrażliwości

1. Wprowadzenie

Autonomia samochodów jest jednym z głównych trendów rozwoju współczesnego przemysłu motoryzacyjnego [1,2]. Na rynku pojawia się coraz więcej pojazdów wyposażonych w liczne mechatroniczne systemy sterowania. Systemy te składają się z elementów elektronicznych, a także elementów mechanicznych. Elementy elektroniczne oparte na technologii cyfrowej można traktować jako niezmiennie w trakcie eksploatacji. Takie elementy albo działają prawidłowo, albo są całkowicie zepsute. Z drugiej strony elementy mechaniczne mogą powoli zmieniać swoje właściwości na skutek zużycia podczas długotrwałej eksploatacji. Dotyczy to przede wszystkim właściwości tribologicznych związanych z luzem oraz tarcie. Doskonale funkcjonujący układ sterowania ruchem „nowego” pojazdu może z czasem ulec pogorszeniu na skutek zmian wartości luzu i tarcia w mechanizmach sterujących. Jest to ciekawy wątek analiz, który nie jest odnotowywany w publikacjach.

Poznanie wrażliwości układów sterowania ruchem pojazdu na luzy i tarcie w układzie kierowniczym wydaje się istotne z operacyjnego punktu widzenia. Warto podkreślić, że tego typu analizy można przeprowadzić wyłącznie metodami symulacyjnymi opartymi na modelowaniu matematycznym. Trudno sobie wyobrazić sytuację, w której w trakcie kolejnych eksperymentów prowadzonych na rzeczywistym obiekcie, jego urządzenie sterujące będzie sukcesywnie coraz bardziej uszkodzone mechanicznie (coraz mniej precyzyjne). Modelowanie i symulacja układów działających z luzem i tarcie są dość trudne ze względu na nieliniowość i zmienną strukturę

układów wielocłonowych. Jednak analiza dynamiki tzw. układów niegładkich jest z naukowego punktu widzenia bardzo atrakcyjna.

2. Metodyka badań

W poprzednich publikacjach, m.in. [3] autorzy przedstawili prace projektowe i badawcze nad sterownikiem układu kierowniczego z autonomicznym procesem zmiany pasa ruchu przez samochód. Synteza algorytmów sterownika została przeprowadzona z sukcesem. Opracowany algorytm sterownika został pomyślnie poddany testom symulacyjnym w odniesieniu do wirtualnego samochodu ciężarowego traktowanego jako przestrzenny (3D) i dyskretny (MBS) model pojazdu wyposażonego w aktywny układ kierowniczy, jednak nie uwzględniający luzu i tarcia suchego. Badania te obejmowały szeroki zakres zmian warunków drogowych i eksploatacyjnych, a nawet występowanie opóźnień i zakłóceń sygnałów.

Nadszedł czas na rozszerzenie zakresu badań o wrażliwość sterownika na występowanie luzów i tarcia suchego w układzie kierowniczym pojazdu. Badania takie powinny pomóc odpowiedzieć na ważne pytanie, czy samochody autonomiczne po długotrwałym użytkowaniu, czyli zużyte mechanicznie, ale wyposażone w wydajną elektronikę, będą wystarczająco bezpieczne dla użytkowników. W związku z powyższym dotychczas stosowany model dynamiki wirtualnego samochodu ciężarowego został uzupełniony o elementy opisujące w możliwie najprostszy sposób luz i tarcie w układzie kierowniczym. Do modelowania nieliniowości luzu i tarcia

wykorzystano przedziałami-liniowe odwzorowania luz(...) i tar(...) oraz ich zaskakująco prosty aparat matematyczny.

Badania symulacyjne prowadzono dla wielu zbiorów danych (m.in. dla różnych prędkości jazdy i dla różnych obciążeń samochodu ciężarowego, oraz dla różnych rodzajów i stanów nawierzchni jezdni). W badaniach tych zmieniano wartości luzu: w mechanizmie kierowniczym $ff=0\div 10^\circ$ i w mechanizmie zwrotniczym $\Delta\delta_1=0\div 0,15^\circ$, a także momentu tarcia w połączeniu sworznień-zwrotnica $M_T=0\div 200Nm$.

Zmiana pasa ruchu była realizowana przez ten sam sterownik zaprojektowany na podstawie modelu referencyjnego w tych samych warunków pracy niezależnie od tego czy uwzględniano luzy i tarcie w układzie kierowniczym, czy też nie. W badaniach nie uwzględniono zakłóceń w sygnałach pomiarowych. Samochód miał za zadanie zmianę pasa ruchu na możliwie najkrótszej drodze w warunkach ruchu zbliżonych do granicznych.

W testach mających na celu ocenę wrażliwości sterownika na luz i tarcie w układzie kierowniczym przeprowadzono dla każdego przypadku dwie symulacje: jedną w oparciu o model nominalny (Model 1 – bez luzu i tarcia w układzie kierowniczym) i drugą opartą na modelu uwzględniającym różne wartości luzów i tarcia w układzie kierowniczym (Model 2). Na podstawie wyników tych symulacji wprowadzono wskaźniki numeryczne W_X jako miary względnej wrażliwości sterownika:

$$W_X = 100 \frac{\int_0^T (x_1(t) - x_2(t))^2 dt}{\int_0^T (x_1(t))^2 dt}$$

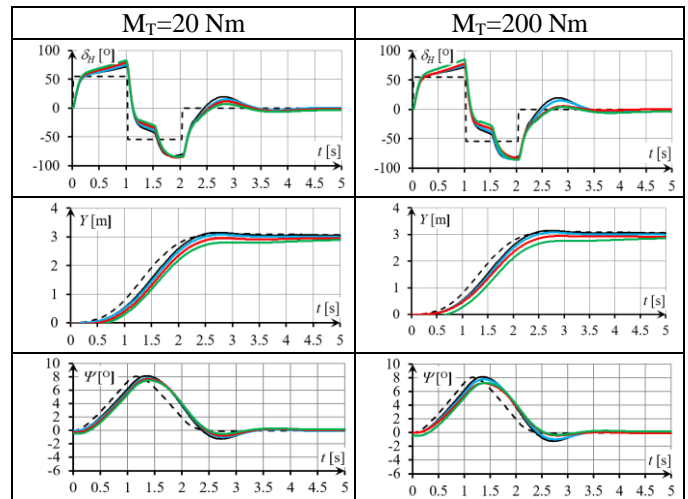
gdzie:

$x_1(t)$, $x_2(t)$ – sygnały wyjściowe z Modelu 1 i z Modelu 2.
 Jako sygnały wyjściowe rejestrowano i analizowano: kąt obrotu koła kierownicy δ_H , przemieszczenie poprzeczne środka masy samochodu Y i kąt odchylenia samochodu Ψ .

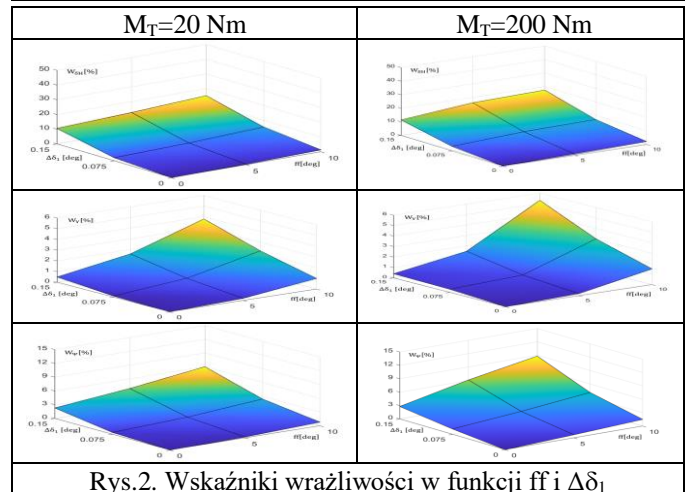
3. Wyniki badań symulacyjnych

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych pokazano na poniższych rysunkach. Modele symulacyjne pokazują zmianę pasa ruchu przez samochód ciężarowy w pełni obciążony poruszający się z prędkością 70 km/h po mokrej drodze asfaltowej. Na rys. 1 pokazano przebiegi kąta obrotu koła kierownicy δ_H , przemieszczenia poprzecznego Y i kąta odchylenia Ψ (linia czarna – $ff = 0^\circ$, $\Delta\delta_1=0^\circ$, linia niebieska - $ff = 5^\circ$, $\Delta\delta_1=0^\circ$, linia czerwona - $ff = 5^\circ$, $\Delta\delta_1=0,075^\circ$, linia zielona - $ff = 5^\circ$, $\Delta\delta_1=0,15^\circ$). Przebiegi analizowanych wielkości pokazują, że sterownik we wszystkich rozważanych przypadkach zrealizował zadanie zmiany pasa ruchu. Oczywiście wraz ze wzrostem parametrów luzu/tarcia rosły także różnice pomiędzy obliczonymi przebiegami. Można zauważyć, że efekt wystąpienia luzu w układzie kierowniczym jest ważniejszy niż efekt tarcia. Luz w układzie kierowniczym zauważalnie pogarsza przebiegi opisujące proces zmiany pasa ruchu natomiast efekty działania tarcia są niewielkie. Jednakże przy wysokich wartościach momentu tarcia M_T obserwuje się drgania kół kierowanych.

Z wykresów wskaźników wrażliwości sterownika (rys. 2) wynika, że wpływ zmian wartości luzów w układzie kierowniczym jest dość regularny. Oczywiście wskaźniki wrażliwości rosną szybciej, gdy tarcie ma większe wartości.



Rys.1. Porównanie przebiegów dla różnych luzów i różnych parametrów tarcia suchego (Linia przerywana – przebiegi odniesienia. Linie ciągłe – przebiegi z działaniem regulatorów)



Rys.2. Wskaźniki wrażliwości w funkcji ff i $\Delta\delta_1$

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania dotyczące analizy wrażliwości sterownika zmiany pasa ruchu na luz i tarcie suche (kinetyczne i statyczne) w układzie kierowniczym, pominięte w konstrukcji sterownika.

Wpływ luzów w układzie kierowniczym jest dość wyraźny. Wraz z ich wzrostem zaobserwowano wzrost różnic w przebiegach rozważanych wielkości.

Wpływ tarcia na przebieg zmiany pasa ruchu jest stosunkowo niewielki, jednak przy dużych wartościach tarcia może być przyczyną drgań skrętnych kół.

Ogólnie jednak testy symulacyjne wykazały, że system kontroli zmiany pasa ruchu działa dobrze nawet przy pewnym stopniu mechanicznego zużycia układu kierowniczego.

Praca była wspomagana z Uczelnianego Grantu Badawczego UGB 709/2024 .

Literatura

- [1] Wu, X.; Qiao, B.; and Su, Ch., *Trajectory Planning with Time-Variant Safety Margin for Autonomous Vehicle Lane Change*. Applied Sciences, 10 (5), 2020.
- [2] Parekh, D. i inni, *Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges*. Electronics, 11(14), 2022.
- [3] Gidlewski, M.; Jackowski, J.; Jemioł, L.; Żardecki, D., *Sensitivity of a vehicle lane change control system to disturbances and measurement signal errors – Modeling and numerical investigations*. Mechanical Systems and Signal Processing, 147, 2021.