



Wstępne studium problematyki sterowania w samochodach 4WS

JAKUB FARYŃSKI¹, ANDRZEJ DĘBOWSKI², DARIUSZ ŻARDECKI²

Wojskowa Akademia Techniczna, ¹Szkoła Doktorska,

²Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
jakub.farynski@wat.edu.pl, andrzej.debowski@wat.edu.pl, dariusz.zardecki@wat.edu.pl

Abstrakt. Artykuł ma charakter przeglądowy i skupia się na problematyce sterowania samochodami 4WS (z czterema kołami skrętnymi). Przedstawiono najważniejsze idee dotyczące sterowania w pojazdach czterokołowych, rozwój historyczny, stan dzisiejszy i perspektywy konstrukcji samochodów 4WS. Omówiono w ujęciu systemowym całokształt zagadnień teoretycznych dotyczących sterowania kierunkiem ruchu pojazdu (w tym kwestie związane z modelowaniem matematycznym i badaniami symulacyjnymi ruchu pojazdu, kwestie syntezy i analizy algorytmów sterowania 4WS). Prezentowane studium oparte jest na dość bogatym przeglądzie literaturowym dotyczącym samochodów 4WS oraz na przemysłeniach kształtujących koncepcję rozprawy doktorskiej poświęconej algorytmom sterowania w samochodach 4WS. **Słowa kluczowe:** inżynieria mechaniczna, studium literaturowe, samochody 4WS, przegląd zagadnień, sterowanie kierunkiem ruchu pojazdu 4-kołowego

DOI: 10.5604/01.3001.0015.3835

1. Wprowadzenie

Układ kierowniczy (UK) stanowi fundamentalny podzespół każdego pojazdu kołowego operującego na drodze poprzez sterowane skręty kół jezdnych osadzonych w zwrotnicach. Klasyczne i najczęściej spotykane w samochodach UK dotyczą struktury 2WS (2 *Wheel Steering* — kierowanie dwoma kołami), w której obrót kierownicy skutkuje skrętem sprzężonych mechanicznie dwóch kół przednich. Konstruktorzy samochodów od dawna pracowali także nad rozwiązaniami UK w strukturze 4WS (4 *Wheel Steering* — kierowanie czterema kołami), w których skręty dotyczą nie tylko kół przednich, lecz także tylnych [13], [51] i [71].

Jak wiadomo z teorii i praktyki, kierowanie poprzez skręt kół tylnych ułatwia manewrowanie wolno przemieszczającym się pojazdem (np. wózkiem widłowym) na niewielkiej przestrzeni. Niestety przy większych prędkościach typowych dla ruchu drogowego, gdy zaczyna się liczyć znoszenie opon, takie kierowanie jest ekstremalnie trudne z uwagi na wyjątkową wówczas nadsterowność pojazdu i grożącą niestabilnością ruchu. Dlatego też pierwsze (jeszcze w okresie międzywojennym) zastosowania samochodowe struktury 4WS dotyczyły tylko wolno jeżdżących pojazdów ciężarowych (np. Nash Quad) i terenowych (np. Mercedes 170 VL). W pojazdach tych mechanizm UK powodował skręt kół tylnych w kierunku przeciwnym do skrętu kół przednich, co zapewniało przy małej prędkości znaczące zmniejszenie promienia skrętu, a więc zwiększenie zwrotności.

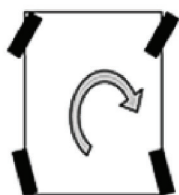
Tymczasem badania prowadzone w wielu ośrodkach dotyczące bezpieczeństwa czynnego i kierowalności samochodów jadących z wysokimi prędkościami wskazywały, że korzystne dla stabilizacji ich zaburzanego ruchu byłoby niewielkie odchylenie kół tylnych zgodne z kierunkiem skrętu kół przednich. Ten postulat podsterowności (sprzeczny z koncepcją skręcania kół tylnych poprawiającego zwrotność pojazdu i zwiększającego jego nadsterowność) stał się przyczynkiem opracowań mechanizmów samostabilizujących jako elementów zawieszenia kół tylnych. Takie pasywne mechanizmy bazujące na układach elastokinematycznych i wielowahaczowych pojawiły się na początku lat osiemdziesiątych w samochodach osobowych wyższej klasy (np. mechanizm Weissach w Porsche 928).

Warto nadmienić, że już pod koniec lat osiemdziesiątych wprowadzono aktywne mechanizmy samostabilizujące wyposażone w siłowniki korygujące położenie kątowe kół tylnych podczas pokonywania zakrętów z dużą prędkością (np. układ HICAS — *High Capacity Actively Controlled Suspension* w samochodzie Nissan Skyline). Koncepcja aktywnych stabilizatorów jako elementów układu zawieszenia (a nie UK z kołami osadzonymi w zwrotnicach) jest nadal rozwijana i stosowana w wielu najnowszych konstrukcjach. Reprezentatywny jest tu układ AGCS (*Active Geometry Control Suspension*) stosowany w samochodzie Hyundai Sonata. W układzie tym dwuramienna dźwignia osadzona obrotowo i poruszana z elektrycznego siłownika powoduje odpowiednie przemieszczanie się wahaczy i tym samym zbieżną regulację ustawienia kąтового tylnych kół.

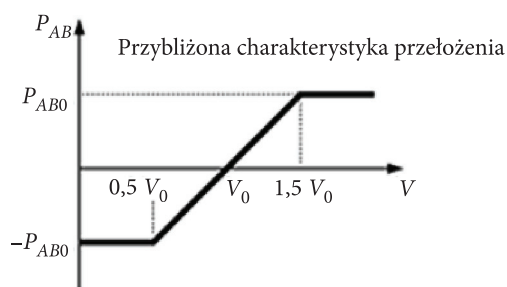
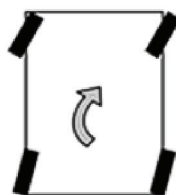
Układy kierownicze o strukturze 4WS w samochodach osobowych, a więc poruszających się w szerokim zakresie prędkości, są rozwijane od wczesnych lat osiemdziesiątych, gdy opracowano specjalne dość skomplikowane mechanizmy dostosowujące sterowanie skrętem kół tylnych do prędkości jazdy. Zgodnie z ogólną ideą sterowania 4WS pokazaną na rysunku nr 1 przy niewielkich prędkościach jazdy (np. podczas manewrowania na parkingu) kierunek skrętu kół tylnych jest przeciwny do kierunku skrętu kół przednich, natomiast przy dużych prędkościach kierunki skrętu kół przednich i tylnych są zgodne. Powiązanie kąta skrętu kół tylnych z kątem skrętu kół przednich wynika z przyjętej (tu uproszczonej przez aproksymację

przedziałami liniową) charakterystyki uzależniającej przełożenie od prędkości jazdy. Przy pewnej charakterystycznej prędkości V_0 (dobrej do danego pojazdu i jak się okazuje różnej w poszczególnych rozwiązaniach) skręt tylnych kół jest zerowy. W ten sposób idea UK w strukturze 4WS wychodzi naprzeciw postulatowi bezpieczeństwa czynnego (pewna podsterowność i stabilizacja podczas jazdy szosowej) i komfortu kierowania (pewna nadsterowność i ułatwione manewrowanie na parkingu).

Wzmacnianie intensywności skrętu



Oslabianie intensywności skrętu



Rys. 1. Idea sterowania skrętem kół tylnych w strukturze 4WS. Oznaczenia: P_{AB} — przełożenie (stosunek kąta skrętu kół tylnych do kąta skrętu kół przednich), V — prędkość pojazdu

W latach osiemdziesiątych powstało (głównie w firmach japońskich) wiele konstrukcji samochodów osobowych, w których zastosowano w praktyce ideę struktury 4WS. W latach dziewięćdziesiątych można było zaobserwować pewien zastój w rozwoju 4WS spowodowany popularnością efektywnych systemów mechanicznych podnoszących komfort i bezpieczeństwo czynne samochodu kierowanego w strukturze 2WS (np. EPS — *Electric Power Steering* oraz ESP — *Electronic Stability Program*). W ostatnim dwudziestoleciu, wraz z wprowadzeniem zaawansowanych technik sterowania (sterowniki cyfrowe realizujące *by-wire* skomplikowane algorytmy sterowania oparte na pomiarach ruchu), widoczny jest ponowny wzrost zainteresowania ideą 4WS. W wielu ośrodkach badawczych trwają poszukiwania coraz doskonalszych algorytmów sterowania 4WS, co ma swoje odbicie zarówno w nowo produkowanych „skomputeryzowanych” samochodach, jak i w licznych opracowaniach naukowych.

KARTA DANYCH LITERATUROWYCH KIEROWALNOŚĆ SAMOCHODU – BAZA NR 1				
INDEKS: 1		IS_N: 1		
Autor	Nazwisko i imię	Tytuł naukowy	Firma/Organizacja	Kraj
1.	Wang Danwei		Nanyang Technological University	Singapur
2.	Qj Feng		Nanyang Technological University	Singapur
3.	-	-	-	-
TYTUŁ ORYGINALNY: Trajectory Planning for a Four-Wheel-Steering Vehicle				
TYTUŁ TŁUMACZONY: Planowanie trajektorii dla pojazdu z napędem na cztery koła				
RODZAJ ŹRÓDŁA: 1. Książka. 2. Skrypt 3. Pr. H/Mon. 4. Pr. Dr. 5. Pr Mgr. 6. Oprac. 7. Frag. Rozdz. 8. Proj dok. 9. Dokument. 10. Artykul. 11. Referat. Nr: 10				
NAZWA ŹRÓDŁA: Conference Paper in Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation - February 2001			NR/ROZDZ.: WYDAWCA: Nanyang Technological University KRAJ: Singapur	ROK: 2001
JĘZYK: 1. Polski. 2. Angielski. 3. Niemiecki. 4. Francuski. 5. Rosyjski. 6. Inny. Nr: 2				
STRONY: 7	L. RYS.: 8	L. TAB.: -	L. ZAL.: -	L. BIBLIOGR.: 12
DOSTĘP: 1. Mam tekst. 2. Mam notatki. 3. Mam plik pdf/docx. 4. Biblioteka: Nr: 3				
CHARAKTERYSTYKA PRACY [słowa kluczowe]: 1. B. przydatna 2. Przeglądowa 3. Dyd./Zapozn. 4. Relacjonująca 5. Nowatorska 6. B. szczegół. 7. Tylko kiero. 8. Kie.+Ham./Nap. 9. Bezp./Wypad. 10. Teoria/Def. 11. Normy/Regul 12. Bad. Drogowe 13. Bad. Stanow. 14. Modelowanie 15. Bad. Analit. 16. Oblicz. Komp. 17. Urz./Met pom. 18. Obróbka pom. 19. Identyfikac. 20. Symulacja. 21. M. obl./Algor. 22. Statystyka 23. Met stochas. 24. Met. Widm.-sp. 25. Optymalizacja 26. Software 27. An. Stan. Ust. 28. An. St. Przeż. 29. An. Stabiln. 30. An. Ster.-obs. 31. An. Wrażliw. 33. Wymusz. Los. 34. Chaos 35. Drgania/Rez. 36. Proc. Dynam. 37. Pro. Powolne 38. Luz 39. Tarcie 40. Luz+Tarcie 41. Ch-ki łaman 42. Sp. an. Niel. 43. System KPD 44. Kierowca/St. 45. Pojazd 46. Podzespoły 47. Droga/Wiatr 48. Obiekt konk. 49. Opis obiekt 50. Dane liczb 51. Wyniki pom. 52. Wyniki obl. 53. War. Danych 54. War modeli 55. Spec. Grafik 56. Porównania 57. Wnioski Nr: 2, 14, 15, 31, 50, 52 i 57.				
CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU(ÓW) KIEROWCA/STEROWNIK: 1. Człowiek 2. Gen./Odtw. 3. C. komputer 4. Cruise lok. 5. Akt nawigacja Nr: - POJAZD: 1. 2-osioły 2. Wieloosiowy 3. Z naczepą 4. Zestaw 5. Przyczepa 6. Sam. Osobowy 7. S. cięż/Aut. 8. Inny pojazd: Nr: 6 PODZESPOŁY: 1. Opona/koło 2. Klasyczne 3. Spec. konstr. 4. Gąsienica 5. Płoza 6. Zaw. Przodu 7. Proste zal. 8. Pr. Niezależ. 9. Złoż. mech. 10. Aktywne 11. Zaw. Tyłu 12. Ukł. kierow. 13. Klasyczny 14. Ze wspomag. 15. 4WS 16. Do przyczep 17. Ukł. hamulc. 18. ABS 19. ESP 20. Ukł. napęd. 21. Na przód 22. Na tył 23. 4WD 24. Specjalny 25. Integracja ukł. sterowania 26. Inny specjal: Nr: 15 DROGA/WIATR: 1. Prosta 2. Okrąg 3. łuk/zakręt 4. Z przeszkod. 5. Z ruchem ul. 6. Jezdnia OK 7. Nierówna 8. Mokra/słiska 9. Grząska 10. Niejednorodna 11. Płaska 12. Pod górę 13. W dół 14. Przechyłona 15. Wiatr Nr: -				
MODEL(e) OBIEKTU(ÓW) (uzupełnienie inf): 1. Schem. mech. 2. Schem. blok. 3. Graf 4. Model mat. 5. Model log. 6. Wyprowadzon. 7. Podany 8. Analizowany 9. Zidentyfikowany 10. Nadane par. 11. Systemu KPD 12. Kierowcy/St 13. Pojazdu 14. Podzespołu 15. Drogi/Wiatr 16. Opony-jezdni. 17. Zawieszenia 18. Ukł. kier. 19. Ukł. hamulc. 20. Ukł. napęd 21. 2D 22. 2,5D 23. 3D 24. L. węzłów: ... 25. L. mas: ... 26. Logika rozm. 27. Sieć neuron. 28. Liniovy 29. Lin.-nielin. 30. Nieliniowy 31. Rocardowski 32. Niesym. L-p 33. Poślizgi 34. Więzy niech. 35. Trygonometr. 36. Równ. Częstk. 37. Równ. Stanu 38. Równ. Ruchu 39. Równ. Węzłów 40. Wektory/Mac 41. R. op/Transm 42. Charaktery 43. Funkcjonały 44. Wskaźn./Kryt. 45. Pl. Faz/Topo 46. Zal. czasowe 47. Zal. widmowe 48. Zal. od par 49. Zal. od zmie. 50. Zal. probab. 51. Inne: Nr: 4, 6 i 38				
WYMUSZENIA I WARUNKI RUCHU: 1. W-ki ruchu częściowo ustalone 2. Skręt kół 3. Hamowanie 4. Rozpedzanie 5. Wiatr 6. Od drogi 7. Wym. w ukł. otw 8. Wym. w-kami początkowymi 9. Imp 10. Skok 11. Stałe 12. Okr. 13. Harm. 14. Los. 15. Z badań 16. Inne: 17. Ster. w ukł. Zamk. 18. Stabil. Przy zakł. 19. Nadążanie 20. Manewry 21. We. w zakr. 22. Wy. z zakr. 23. Zm. pasa 24. Omijanie 25. Ślalom 26. Inne: Nr: 20				

Rys. 2. Karta danych literaturowych obejmująca jeden rekord danych z przykładowym wypełnieniem

Tematyka algorytmów 4WS stała się też przedmiotem powstającej w WAT pracy doktorskiej, a ten artykuł podsumowuje jej wstępny etap.

W celu ułatwienia studium literaturowego opracowano dość obszerną bazę danych literaturowych. Już wstępne analizy bibliograficzne wskazywały na bardzo dużą liczbę publikacji odnoszących się do zagadnień związanych ze sterowaniem samochodami 4WS. W związku z tym zdecydowano, by ograniczyć je do prac ściśle naukowych oraz do artykułów przeglądowych. Bibliografia przedstawiona w artykule obejmuje ważniejsze pozycje z tej bazy. Przykładowy rekord danych dla jednej pozycji literaturowej przedstawiony jest na rysunku nr 2.

Zazwyczaj częstym problemem jest odpowiednie uporządkowanie analizowanej literatury, aby móc potem określić, jakie zagadnienie lub zagadnienia były omawiane w poszczególnych pozycjach książkowych. Stąd pomysł na utworzenie pewnej koncepcji bazy wiedzy, którą jest karta literaturowa.

2. Rozwój konstrukcji samochodów 4WS [13, 51, 71]

Pierwsze patenty dotyczące sterowania 4WS zostały zgłoszone przez inżynierów Hondy pod koniec lat siedemdziesiątych. W 1981 roku stworzono prototyp oparty na podzespołach Hondy Accord, który posiadał sprzężone mechanicznie przedni i tylny mechanizm kierowniczy. Przy prędkościach niższych niż 40 km/h oraz kącie obrotu kierownicy większym niż 240 stopni występował skręt tylnych kół przeciwie do skrętu kół przednich. Tylne koła miały możliwość skrętu o 5 stopni, gdy kąt skrętu kół przednich osiągał 35 stopni. Przy prędkościach większych niż 40 km/h i skręcie koła kierownicy mniejszym niż 240 stopni tylne koła skręcały w tę samą stronę co koła przednie. Skręt kół tylnych był dziesięciokrotnie mniejszy niż kół przednich. Było to realizowane całkowicie mechanicznie w układzie przenoszącym sterowanie z przodu na tył (mechanizm z wałem i przekładnią planetarną). Debiut mechanicznego systemu 4WS opracowanego w firmie Honda miał miejsce w 1987 roku w pojeździe Prelude. Dzięki 4WS promień zawracania pojazdu został zmniejszony o około 10%, a stabilność pojazdu wzrosła. Mankamentem mechanicznego układu 4WS były odczuwalne zaburzenia w płynności działania jego mechanizmów. Dlatego mechaniczna wersja 4WS nie cieszyła się uznaniem użytkowników. W następnych generacjach samochodu Honda Prelude pojawiły się już elementy mechatroniczne, które znacząco usprawniły działanie układu 4WS. W modelach nowszych generacji (z roku 1991 i 1997) wprowadzono sterowanie komputerowe i silnik elektryczny zamiast wału i przekładni planetarnej. Ten system był już podobny do „nowoczesnych” skomputeryzowanych systemów 4WS. Warto zaznaczyć, że sterowanie w układzie 4WS firma Honda oferowała na życzenie także w innych produkowanych modelach.

Prace nad podobnymi układami 4WS zostały też podjęte prawie równolegle przez inne firmy japońskie, które opatentowały własne wersje rozwiązań. Pomysł twórców Mazdy zaprezentowano już w 1984 roku w koncepcyjnej wersji modelu MX. W porównaniu z projektem Hondy ten układ był nie tylko mechanicznym układem, lecz także posiadał elementy elektroniczne i hydrauliczne. W pojeździe znajdowały się czujniki prędkości i skrętu kół. W tym przypadku wał od przedniego do tylnego mechanizmu kierowniczego przenosił jedynie informację o kącie skrętu kierownicy do siłownika hydraulicznego sterowanego elektronicznie. Przy małych prędkościach koła tylne skręcane były przeciwnie do przednich, a przy dużych odwrotnie. To rozwiązanie wprowadzono m.in. w modelach MX6 z roku 1991. Także Mitsubishi zaprezentowało już w 1987 roku podobnie wyposażonego Galanta VR-4. W tym przypadku nie było mechanicznego połączenia między przednim i tylnym mechanizmem kierowniczym, a rozwiązanie miało charakter elektrohydrauliczny. Toyota pracowała nad 4WS nieco dłużej. Jej pierwsze rozwiązanie z 1989 roku było zbliżone do rozwiązania Mazdy. Natomiast w kolejnych modelach, np. w Celica Dual Mode 4WS, pojawiły się całkiem nowe możliwości dopasowywania sterowania w zależności od wybranego trybu działania (standardowego lub sportowego). Warto w tym miejscu zauważyć, że nie wszystkie firmy japońskie rozwijały koncepcję 4WS poprzez sterowanie skrętu tylnych kół osadzonych w zwrotnicach. Na przykład w firmie Nissan od 1988 roku bazowano na rozwiązaniach 2WS uzupełnionych o wspomniane w punkcie pierwszym układy zawieszenia HICAS zapewniające samostabilizację przy wysokich prędkościach.

Prace nad systemami 4WS prowadzone były także przez europejskich i amerykańskich producentów aut. Dotyczy to szczególnie ostatniego dwudziestolecia, gdy do pojazdów zaczęto wdrażać układy mechatroniczne umożliwiające nie tylko przenoszenie *by-wire* sterowania do tylnych kół, lecz także jego aktywne kształtowanie. Przykładem europejskim jest nowoczesny zintegrowany system 4Control opracowany przez firmę Renault dla samochodu Laguna GT, a następnie wdrożony do innych pojazdów tej marki. W Lagunie GT koła tylne skręcają się w ruchu przeciwnym do kół przednich do prędkości 60 km/h, a przy wyższych — w tym samym. Ich maksymalny kąt skrętu to 3,5 stopnia dla kierunku przeciwnego oraz 2 stopnie dla kierunku, który jest zgodny ze skrętem przednich kół. Dzięki temu rozwiązaniu średnica zawracania pojazdu nawet w wersji kombi niewiele odbiega od mniejszego modelu Clio i wynosi około 10,8 m. Jednocześnie układ ten powoduje zmniejszenie kąta obrotu koła kierownicy. Chcąc skręcić koła o jeden stopień bez stosowania systemu 4Control, trzeba obrócić koło kierownicy o 16 stopni, natomiast przy zastosowaniu tego układu należy obrócić koło kierownicy o 4 stopnie mniej, kiedy tylne koła są skręcane w przeciwnym kierunku w stosunku do kół przednich. Wpływa to na poprawienie czasu reakcji i zdecydowanie zwiększa precyzyjne działanie układu kierowniczego, zwłaszcza przy szybkim manewrowaniu. Należy zauważyć, że wprowadzenie w Lagunie GT sterowania 4WS wpłynęło na modyfikację jej systemu stabilizacji ESP. Moduł systemu identyfikuje sytuację, w której hamowanie pojazdu

odbywa się z różną przyczepnością kół. Odpowiednie dostosowanie przez sterownik skrętu kół tylnych pozwala utrzymać zadany tor jazdy przez kierującego pojazdem, co odbywa się automatycznie. Warto również dodać, że system ESP uruchamia się później niż w pojazdach bez 4WS. Poprawia to kierowność samochodu.

Reprezentatywnym przykładem 4WS na rynku amerykańskim jest system *Quadrateer* firmy Delhi Automotive (światowego lidera rozwiązań *by-wire*) zaproponowany w roku 2002 przede wszystkim do długich pick-upów firmy General Motors (np. GMC Sierra Denali).

Współczesne UK 4WS różnych producentów są technicznie zróżnicowane w szczegółach, ale koncepcyjnie podobne (tabela nr 1).

Charakterystyka 4WS u różnych producentów

TABELA 1

Marka i model	Prędkość V_0 [km/h]	Kąt obrotu kierownicy [°]	Kierunek skrętu kół tylnych względem skrętu kół przednich	Maksymalny kąt skrętu kół tylnych [°]
Honda Accord	≤ 40	> 240	Przeciwny	5
		< 240	Zgodny	10 razy mniej niż koła przednie
	> 40	> 240		
	< 240			
Mazda MX3	< 35	-	Przeciwny	5
	$= 35$		Brak skrętu kół tylnych	0
	> 35		Zgodny	5
Nissan 300 ZX	< 30		Przeciwny	7
	$= 30$		Brak skrętu	0
	> 30		Zgodny	7
BMW	< 30		Przeciwny	2,5
	[30, 50]		Brak skrętu kół tylnych	0
	> 50		Zgodny	7
Audi A8, Q7	< 50		Przeciwny	5
	[50, 80]	Brak skrętu kół tylnych	0	
	> 80	Zgodny	2	
Renault Laguna GT	< 60	Przeciwny	3,5	
	$= 60$	Brak skrętu kół tylnych	0	
	> 60	Zgodny	3,5	
Lexus	< 80	Przeciwny	3	
	$= 80$	Brak skrętu kół tylnych	0	
	> 80	Zgodny	1,5	
Porsche	< 50	Przeciwny	3	
	$= 50$	Brak skrętu kół tylnych	0	
	> 50	Zgodny	1,5	

Jak można zauważyć, praktycznie u każdego z producentów tak zwane położenie zerowe układu 4WS występuje przy innych prędkościach, a w przypadku BMW, Audi A8 oraz Q7 są to nawet przedziały prędkości. Warto też zwrócić uwagę, że Lexus jako jeden z nielicznych skręca koła tylne przeciwnie do kół przednich aż do 80 km/h, ale maksymalnie do trzech stopni, natomiast Nissan 300 ZX przechodzi na stabilizację jazdy już powyżej 30 km/h, ale koła skręcają się aż do siedmiu stopni, czyli jest to największe wychylenie wśród wszystkich przedstawionych producentów. Każdy przedstawiciel danej marki ma swoją koncepcję rozwiązania, co widać po zróżnicowaniu prędkości przy przechodzeniu z manewrowości pojazdu na jego stabilizację jazdy, przy czym u każdego z producentów kąty skrętów kół także są różne, bo sięgają od półtora stopnia skrętu aż do siedmiu.

W obecnych rozwiązaniach wszystkim zarządza *by-wire* sterownik cyfrowy, a siłownik (lub dwa siłowniki, oddzielne dla prawego i lewego tylnego koła, jak w Porsche) jest elektryczny. Sterowanie cyfrowe w systemach 4WS pozwala uwzględnić w pracy tylnego mechanizmu kierowniczego nie tylko prędkość i kąt obrotu kierownicy, lecz także np. prędkości obrotowe kół jezdnych, działanie ABS i ESP, przyspieszenia boczne, podłużne itp.

UK 4WS, ale już w wersji bardzo rozwiniętej i zintegrowanej z innymi systemami, spotykamy w szeregu, ale nie tylko w luksusowych samochodach (tabela nr 2).

TABELA 2

Wykaz samochodów osobowych 4WS

Marka	Modele
Audi	A8, Q7
Accura	RLX, TLX
BMW	7, 6, 5 Series
Cadillac	CT6
Chevrolet	Silverado
Efini	MS-9
Ferrari	GTC4Lusso, F12tdf
GMC	Sierra, Sierra Denali
Honda	Prelude, Accord, Ascot Innova
Infiniti	FX50 AWD, G35 Sedan / Coupe, J30t, M35, M45, Q45t
Lamborghini	Aventador S, Centenario, Urus, Huracán Evo
Lexus	GS, LC500
Mazda	626, 929, MX6, RX7, Eunos 800
Mercedes-Benz	Vito (model taxi)
Mitsubishi	Galant, 3000GT

cd. tab. 2

Nissan	Cefiro, 180 SX, 240SX, 300ZX, Laurel, Fuga, Silvia, Skyline GTS, GTR
Porche	911 GT3/Turbo/Spyder, Cayenne, Panamera
Renault	Espace, Laguna, GT, Megane GT/RS, Talisman
Rolls-Royce	Culliman
Subaru	Alcyone SVX JDM
Toyota	Aristo, Camry, Carina, Corona , Celica , Soarer
Volkswagen	Touareg

3. Przegląd teorii związanych ze sterowaniem 4WS

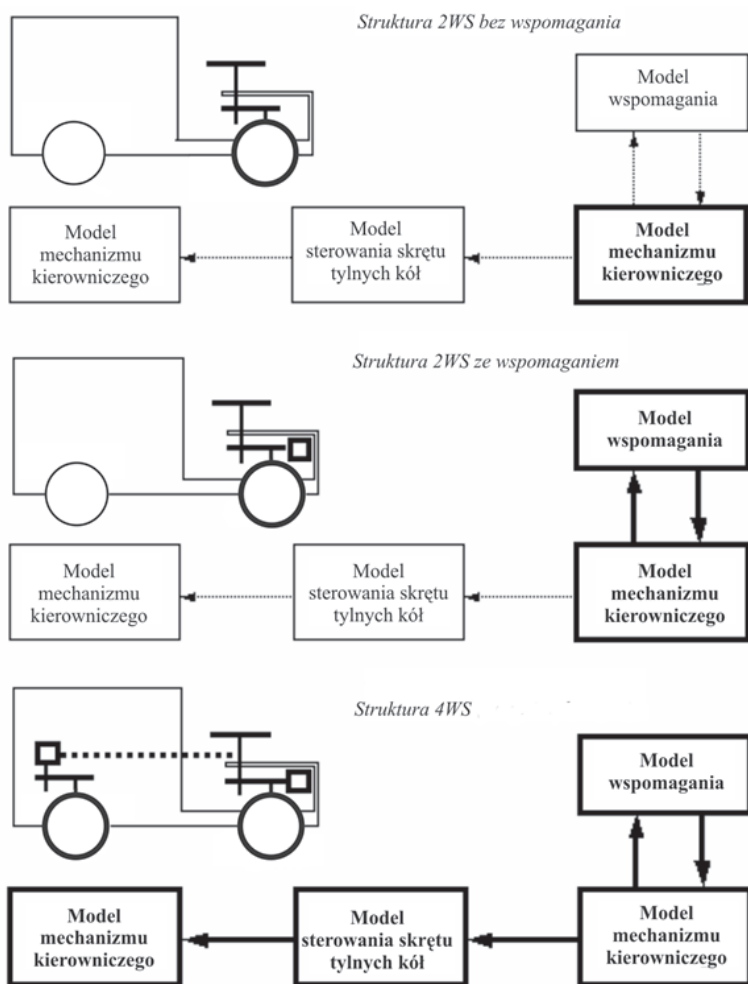
Rozwój techniki układów 4WS nie byłby możliwy bez dużego zaangażowania naukowców działających w obszarach mechaniki analitycznej, układów dynamicznych, teorii i techniki sterowania oraz mechatroniki. Taki wniosek nasuwa się z licznych artykułów i referatów konferencyjnych dotyczących pojazdów 4WS.

Początkowo uwaga badaczy koncentrowała się na zagadnieniach stricte podstawowych dotyczących idei 4WS. Zwrotność samochodu przy małych prędkościach to przede wszystkim problem konstrukcyjny związany z kinematyką i rozwiązywany w biurach projektowych. Dlatego w literaturze naukowej jest mało publikacji odnoszących się do tych kwestii. Wyjątkowymi przykładami są tu: praca [60], prezentująca dla struktur 4WS zależności kinematyczne analogiczne do znanych zależności Ackermana dla struktur 2WS, a także praca [32] opisująca projektowanie z wykorzystaniem formuł analitycznych oraz programów ADAMS i CATIA. Natomiast zagadnienia dynamiki ruchu samochodów 4WS przy dużych prędkościach i związane z tym problemy sterowania pojawiają się w wielu publikacjach.

Badając teorie dynamiki i sterowania pojazdów 4WS, poszukiwano na wstępie prac przeglądowych. O ile prac relacjonujących wąskie wycinki badań znajdziemy wiele, o tyle artykułów typu *state-of-the-art* lub *review* jest zaskakująco mało. Do tych prac zaliczyć należy szeroko cytowany artykuł [11], który ukazał się jednak już ponad 30 lat temu, a także niedawne publikacje [23] oraz [20] (praca ta dotyczy wprawdzie także samochodów 2WS, ale bardzo szeroko omawia nowoczesne koncepcje i techniki sterowania w aktywnych UK). Lektura prac przeglądowych potwierdza przekonanie o wielkim postępie w projektowaniu i badaniach pojazdów 4WS, jaki dokonał się w tym okresie.

W studium dynamiki pojazdów 4WS istotne są w pierwszej kolejności informacje wynikające ze standardowych „otwartych” testów kierowności (np. przy skokowym czy też sinusoidalnie zmiennym wymuszeniu obrotu kierownicy). Relacjonowane badania rzadko dotyczą eksperymentów na pojazdach rzeczywistych, np. [42].

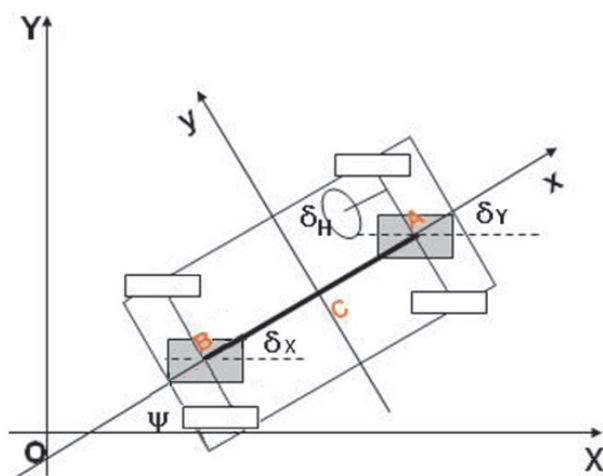
Większość publikacji odnosi się do badań symulacyjnych z wykorzystaniem modeli o znacznej złożoności, także nieliniowych, o wielu stopniach swobody i licznych parametrach. Przykładem są badania służące analizie procesu znoszenia w pojazdach 4WS [70] i ocenie wpływu rozwiązań tylnego wielowahaczowego zawieszenia na kierowność samochodu 4WS [43] i [44] czy też badania wykazujące znaczący wpływ luzu i tarcia w mechanizmach UK (także ze wspomaganiami) na trajektorię ruchu pojazdu kierowanego w strukturze 4WS [33] — rysunek nr 3.



Rys. 3. Koncepcja modelowania w badaniach porównawczych różnych struktur UK w testach otwartych

Badacze podejmowali także symulację testów „zamkniętych” (z kierowcą) z wykorzystaniem skomplikowanych modeli matematycznych samochodu 4WS, np. [52].

Równoległe z badaniami symulacyjnymi prowadzone były badania analityczne, także te dotyczące układu kierowca — pojazd 4WS — droga [16], [40] i [53] na modelach bardzo uproszczonych (liniowych, o dwóch stopniach swobody typu *bicycle*) z wykorzystaniem transmitancji, rachunku operatorowego i analizy częstotliwościowej. Takie badania mają też kontekst poszukiwań systemów automatycznego kierowania [5]. Należy podkreślić, że *bicycle model* traktuje kierowany pojazd czteroślowy jadący z ustaloną prędkością jako jednomasowy obiekt ruchomy na pneumatykach, w którym siły reakcji na styku koło - jezdnia odniesione są do punktów zastępczych położonych na osi wzdłużnej bryły nadwozia (idea ta pokazana na rysunku nr 4). W jego zapisie matematycznym występują zaledwie dwie zmienne wyrażające ruchy nadwozia (kątowe i liniowe) w płaszczyźnie drogi oraz siedem parametrów (masa i moment bezwładności pojazdu, rozstaw osi kół i położenie środka masy, prędkość jazdy, współczynniki odporności na znoszenie wynikające z charakterystyk opon i stanu drogi), co pozwala określić w analizach wpływ najważniejszych czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na przebiegi czasowe procesów sterowania i ich charakterystyki częstotliwościowe. Takie badania pozwoliły też wysnuć wnioski dotyczące wpływu charakterystyki przełożenia 4WS na opóźnienia fazowe w reakcjach przyspieszenia poprzecznego i szybkości odchylenia na nadsterowność i stabilność ruchu, a także sformułować postulaty odnośnie do wprowadzenia w układ sterowania skretem tylnych kół regulatorów polepszających własności dynamiki ruchów poprzecznych pojazdu, np. [4], [13], [17] i [38].



Rys. 4. Koncepcja modelowania układu 4WS na podstawie zastępczego *bicycle model*

Początkowo rozważano zastosowanie standardowych liniowych regulatorów ciągłych (nawet najprostszego regulatora P [44]) w różnych konfiguracjach wykonawczych i pomiarowych generujących uchyby regulacji. Wprowadzenie klasycznej regulacji opartej na liniowych regulatorach przeważnie polepszało dynamikę poprzeczną pojazdu 4WS [25], [28], [29], [40], [59], [63] i [67], choć nie zawsze [64], na co niewątpliwy wpływ miały właściwa konfiguracja i parametry regulatorów.

W latach następnych, gdy rozwinęły się metody „nowoczesnej teorii sterowania” (analiza sterowalności i obserwowalności, sterowanie optymalne, adaptacyjne, odporne, z samouczeniem) i stały się popularne nowe efektywne techniki sterowania (H_∞/μ Synthesis, LQR, SMC, FLC, NN), podjęto udane próby ich zastosowania także w syntezie i analizie układów sterowania 4WS. Warto przytoczyć najważniejsze informacje dotyczące stosowania tych nowych technik i przykłady ich wykorzystania w sterowaniu samochodów 4WS:

- Technika H_∞/μ -Synthesis dotyczy regulacji „odpornej” na zakłócenia i niepewność parametrów sterowanego obiektu liniowego MIMO (wielowymiarowego, czyli o wielu wejściach i wyjściach). Uzyskuje się to poprzez odpowiednią optymalizację charakterystyk częstotliwościowych (H_∞) standardowych regulatorów w strukturze MIMO z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania (μ Synthesis). Przykłady zastosowań: [7], [10], [14], [16], [20], [46] i [36];
- Technika LQR (*Linear-Quadratic Regulation*) dotyczy regulacji optymalnej obiektów liniowych (także niestacjonarnych) MIMO przy założonym całkowym wskaźniku jakości bazującym na formach kwadratowych zmiennych występujących w modelu. Technika LQR prowadzi do algorytmów regulatorów Kalmana w strukturze MIMO. W niektórych prostych przypadkach, gdy czas końcowy regulacji nie jest narzucony, regulatory te okazują się mieć formę standardowych regulatorów liniowych (np. PID). Przykłady zastosowań: [26], [55], [56], [57] i [58];
- Technika SMC (*Sliding Mode Control*) dotyczy tzw. sterowania ślizgowego obiektów nieliniowych poprzez zadawanie wymuszenia o nieciągłej postaci powodującego przełączenie struktury modelu ze sterowaniem i „ślizganie się” trajektorii ruchu wzdłuż trajektorii pożądanej. Przykłady zastosowań: [22] i [39];
- Technika FLC (*Fuzzy Logic Control*) dotyczy sterowania wykorzystującego dyskretny model heurystyczny zachowania się sterowanego obiektu oparty na tzw. logice rozmytej (nie Boole’owskiej dwustanowej typu „czarne – białe”, lecz wielostanowej z odcieniami szarości). Przykład zastosowań: [62] i [65];
- Technika NN (*Neural Network*) dotyczy sterowania bazującego na sieciach neuronowych. Przykład zastosowań: [54].

W syntezy algorytmów sterowania wykorzystuje się zazwyczaj proste modele matematyczne typu *bicycle model*, np. [25], [59] i [67], czasami jednak nieco rozbudowane, np. przez dodanie członów wyrażających wpływ przechyłów pojazdu na jego ruchy w płaszczyźnie drogi. W procedurze tworzenia algorytmu sterownika 4WS opisanej w pracach [26], [39] i [40] występują też uproszczone liniowe modele kierowcy.

Zadania sterowania opisywane w publikacjach dotyczą przede wszystkim zagadnień stabilizacji zaburzanego (np. przez wiatr) ruchu pojazdu jadącego po prostej drodze, np. [58] i [66]. W niektórych pracach omawia się sterowanie 4WS w jeździe po krętej drodze, np. [27], a także przy pojedynczej lub podwójnej zmianie pasa ruchu, np. [29], [30] i [39].

W badaniu układów sterowania pojazdów 4WS wykorzystuje się przede wszystkim symulację komputerową, a czasami także symulację HIL (*Hardware in the Loop*), gdzie sterownik steruje poprzez odpowiedni interfejs wirtualnym pojazdem, którego ruch jest symulowany, np. [68]. W standardowych badaniach symulacyjnych odzwierciedlających działanie sterowników 4WS występują modele o różnej skali złożoności [9], [14], [30], [34], [37], [47] i [64]. Interesujący przegląd stosowanych modeli przedstawiony jest w [18].

Autorzy rzadko zdradzają szczegóły zastosowanego oprogramowania. Można sądzić, że są to programy wykorzystujące uniwersalne narzędzia programistyczne, np. Matlab-Simulink, i standardowe procedury numeryczne. W niektórych pracach, np. [30] i [59], wzmiankuje się o stosowaniu oprogramowania ADAMS i DADS — do symulacji MBS — lub oprogramowania specjalistycznego ukierunkowanego na badania dynamiki ruchu pojazdów, np. BAMMS [18], CarSim [61]. Bardzo rzadko autorzy dzielą się informacjami, skąd zostały zaczerpnięte dane liczbowe do modeli symulacyjnych i jakie parametry numeryczne wykorzystano w procedurach obliczeniowych.

Zastosowanie nowoczesnych technik sterowania zbiegło się z rozwojem aktywnych UK, które dziś można już spotkać w różnych aplikacjach samochodowych, m.in. w systemie LKS (*Lane Keeping System*) wspomagającym kierowcę w utrzymaniu pasa jezdni. Taki system zastosowany do pojazdu 4WS opisywany jest na gruncie teoretycznym w pracy [50]. Rozwinięcie tej idei w kierunku pełnej automatyzacji kierowania samochodem w strukturze 4WS wymaga sterownika realizującego sterowanie predykcyjne (np. według koncepcji MPC — *Model Predictive Control* [16]) działającego w strukturze dwupoziomowej na podstawie pomiarów przebiegu zmiennych opisujących ruch rzeczywistego pojazdu. Wówczas w sterowniku na jego wyższym poziomie wyznaczone są on-line z prostego modelu referencyjnego sygnały zadane dla układów regulacji funkcjonujących na poziomie niższym i realizujących poprzez regulację nadążną generowanie sygnałów sterujących skrętem kół, np. [6] i [7]. Szczegółowy opis procedury tworzenia algorytmu sterowania MPC (ale dla pojazdów 2WS) przedstawiony jest w pracy [61].

Równolegle z rozwojem metod sterowania skrętem tylnych kół wielu badaczy podjęło temat sterowania 4WS, gdy sterowanie skrętem kół dokonuje się równolegle ze sterowaniem napędem/ hamowaniem tych kół. Przy tak rozszerzonym sterowaniu skupionym na problematyce znoszenia (zwanym często *DYC* — *Direct Yaw Control*) istnieje możliwość wpływania na ruch pojazdu 4WS w znacznie szerszym zakresie, także w trudnych warunkach współpracy kół ze śliską jezdnią. Informacje na temat *DYC* w strukturach 4WS znajdujemy np. w pracach [1], [2], [3], [12], [35], [41], [46], [47] i [49], także z elementami optymalizacji [45] oraz koncepcją rozprzęgnięcia [12]. Dalszym rozwinięciem sterowania kompleksowego jest powiązanie 4WS z układami ACS aktywnego zawieszenia [31].

Po zintegrowaniu działania oddzielnych sterowników 4WS, ESP, ABS i ACS w jednym systemie i powiązaniu sterowania poślizgiem kół z predykcją optymalnej trajektorii ruchu pojazdu uzyska się nową jakość sterowania, z perspektywą wykorzystania w samochodach autonomicznych.

4. Podsumowanie i wnioski

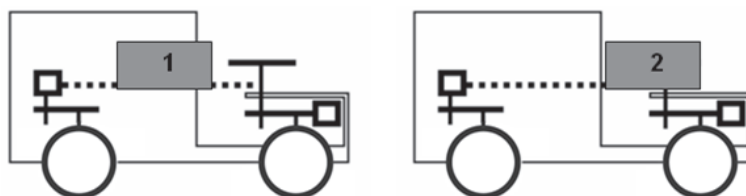
Przeprowadzone na podstawie materiałów literaturowych studium sterowania 4WS pozwala na stwierdzenie, że problematyka jest bardzo rozległa, wielowątkowa i bardzo atrakcyjna naukowo. Mimo prac badawczych wykonanych w różnych ośrodkach w okresie ostatnich czterdziestu lat, które zaowocowały licznymi publikacjami, można śmiało stwierdzić, że wiele ciekawych zagadnień związanych bezpośrednio ze sterowaniem 4WS jest dotąd słabo rozpoznanych albo wręcz niepodjętych.

Po pierwsze, takim zagadnieniem wydaje się aktywne sterowanie pojazdem 4WS podczas gwałtownych manewrów wykonywanych ze znacznymi prędkościami, a więc gdy dynamika ruchu jest pierwszoplanowa. Dotyczy to np. gwałtownej zmiany pasa ruchu, gdy przed szybko jadącym samochodem pojawia się nagle przeszkoda, hamowanie nie pozwala uniknąć zderzenia, a jedynym ratunkiem jest manewr omijania. Warto tu rozważyć różne algorytmy sterowania, mając na uwadze z jednej strony różne koncepcje sterownika 4WS, układu czujników oraz członów mechanicznych, z drugiej zaś odniesienia do różnych wariantów własności dynamiki samochodu wynikających z jego parametrów i charakterystyk. Dwie najważniejsze ogólne koncepcje algorytmów sterowania 4WS wyjaśnione są przez schematy blokowe na rysunku nr 5.

W obu proponowanych rozwiązaniach istotnym elementem jest model referencyjny dynamiki poprzecznej samochodu typu *bicycle model*. To na jego podstawie będą generowane potrzebne zmienne pomocnicze wykorzystywane dalej w aktywnym sterowaniu z pomiarami przebiegów zmiennych opisujących ruchy rzeczywistego pojazdu. Oczywiście dla funkcjonowania modelu referencyjnego niezbędna będzie identyfikacja jego parametrów.

Po drugie, takim zagadnieniem jest z pewnością wrażliwość aktywnego układu sterowania na błędy pomiarowe wynikające z szumów i offsetu mierzonych sygnałów oraz z opóźnień w ich przetwarzaniu procesorowym.

Po trzecie, takim zagadnieniem jest wrażliwość aktywnego układu sterowania na zużycie mechanizmów skrętu kół (luzy i tarcia).



Rys. 5. Ogólne koncepcje sterowania 4WS pojazdu z kierowcą oraz pojazdu autonomicznego: 1 — sterownik wyznacza skręt kół tylnych na podstawie pomiaru kąta obrotu kierownicy, 2 — sterownik wyznacza skręty kół przednich i tylnych (pojazd autonomiczny). Sterowniki wykorzystują pomiary sygnałów opisujących ruch samochodu (tego nie zaznaczono)

Przedstawione tu stwierdzenia dość wyraźnie pokazują kierunki dalszych prac związanych ze sterowaniem 4WS. Powinny one objąć:

- wyznaczenie algorytmów sterowania 4WS wykorzystujących model referencyjny typu *bicycle model* oraz zmienne opisujące ruch rzeczywistego pojazdu;
- opracowanie metod identyfikacji parametrów modelu referencyjnego;
- opracowanie wirtualnego modelu pojazdu 4WS sterowanego według przygotowanych algorytmów, uwzględniającego niedoskonałości pomiaru i przetwarzania sygnałów oraz funkcjonowania mechanizmów;
- opracowanie oprogramowania symulacyjnego umożliwiającego testowanie algorytmów sterowania oraz prowadzenie analizy ich wrażliwości (z uwagi na błędy w oszacowaniu parametrów modelu referencyjnego, na niedoskonałości sygnałów pomiarowych i ich przetwarzania oraz na wystąpienie luzów i nadmiernych tarć w modelach mechanizmu kierowniczego);
- przeprowadzenie rozległych badań symulacyjnych i analizy wrażliwości opracowanych algorytmów sterowania.

Tak opracowane algorytmy sterowania 4WS powinny stanowić atrakcyjną propozycję dla projektantów rzeczywistych sterowników. Powstałe przy tym opracowania znacząco wzbogacą wiedzę na temat dynamiki samochodów i sterowania nimi.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2021. Zatwierdzono do publikacji 7.05.2021.

Jakub Faryński <https://orcid.org/0000-0001-6515-0921>

Andrzej Dębowski <https://orcid.org/0000-0003-1446-4415>

Dariusz Żardecki <https://orcid.org/0000-0002-3934-2150>

LITERATURA

- [1] ABE M., OHKUBO N., KANO Y., *A Direct Yaw Moment Control for Improving Limit Performance of Vehicle Handling — Comparison and Cooperation with 4WS*, Vehicle System Dynamics, Supplement 25, 1996, 3-23.
- [2] ABE M., KANO Y., *Improvement of Vehicle Handling Safety with Vehicle Side-slip Control by Direct Yaw Moment*, Vehicle System Dynamics, Supplement 33, 1999, 665-679.
- [3] ABE M., *Vehicle dynamics and control for improving handling and active safety: from four-wheel steering to direct yaw moment control*, Proc. I.Mech.E Part K., vol. 215, 1999, 87-101.
- [4] AHRING E., MITSCHKE M., *Comparison of All-Wheel Steerings in the System Driver-Vehicle*, Vehicle System Dynamics, vol. 24, no. 4-5, 1995, 283-298.
- [5] ALLEN R.W., MYERS T.T., ROSENTHAL T.J., *Vehicle Stability Considerations with Automatic and Four Wheel Steering Systems*, SAE Papers 931979, 1993, 2191-2201.
- [6] ARIFF M.H.M., ZAMZURI H., NORDIN M.A.M., YAHYA W.J., MAZLAN S.A., RAHMAN M.A.A., *Control strategy for low speed and high speed four-wheel-active steering vehicle*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 8, 2015, 1516-1528.
- [7] CHU T.W., JONES R.P., WHITTAKER M.T., *A System Theoretic Analysis of Automotive Vehicle Dynamics and Control*, Vehicle System Dynamics, Supplement 37, 2002, 83-95.
- [8] EL HAJJAJI A., CIOCAN A., HAMAD D., *Four Wheel Steering Control by Fuzzy Approach*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 41, 2004, 141-156.
- [9] ESMAILZADEH E., VOSSOUGH I.G.R., GOODARZI A., *Dynamic Modeling and Analysis of a Four Motorized Wheels Electric Vehicle*, Vehicle System Dynamics, vol. 35, no. 3, 2001, 163-194.
- [10] FUJITA K., OHASHI K., FUKATANI K., KAMEI S., KAGAWA Y., MORI H., *Development of active rear steer system applying H^∞ - μ synthesis*, SAE Paper 981115, 1998.
- [11] FURUKAWA Y., YUHARA N., SANO S., TAKEDA H., MATSUSHITA Y., *A review of four-wheel steering studies from the viewpoint of vehicle dynamics and control*, Vehicle System Dynamics, vol. 18, 1989, 151-186.
- [12] HAC A., BODIE M.O., *Improvements in vehicle handling through integrated control of chassis systems*, International Journal of Vehicle Design, vol. 29, no. 1/2, 2002, 23-50.
- [13] HEROLD P., WALLBRECHER M., *All-Wheel Steering, [w:] Steering Handbook*, Ed. Harrer M., Pfeffer P., Springer, 2017.
- [14] HORIUCHI S., YUHARA N., TAKEI A., *Two Degree of Freedom/ H^∞ Controller Synthesis for Active Four Wheel Steering Vehicles*, Vehicle System Dynamic, Supplement 25, 1996, 275-292.
- [15] HORIUCHI S., YUHARA N., *An Analytical Approach to the Prediction of Handling Qualities of Vehicles with Advanced Steering Control System Using Multi-Input Driver Model*, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 122, 2000, 490-497.
- [16] HORIUCHI S., OKADA K., NONTOMI S., *Stochastic Robustness Analysis and Synthesis of Nonlinear Vehicle Controller*, Vehicle System Dynamic, Supplement 37, 2002, 183-196.
- [17] INOUE H., SUGASAWA F., *Comparison of Feedforward and Feedback Control for 4WS*, Vehicle System Dynamic, vol. 22, no. 5-6, 1993, 425-436.
- [18] JANSEN S.T.H., VAN OOSTEN J.J.M., *Development and Evaluation of Vehicle Simulation Models for a 4WS Application*, Vehicle System Dynamics, vol. 24, 1995, 343-363.
- [19] JIA Y., *Robust control with decoupling performance for steering and traction of 4WS vehicles under velocity-varying motion*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, no. 3, 2000, 554-569.

- [20] JIN X., YIN G., CHEN N., *Advanced Estimation Techniques for Vehicle System Dynamic State: A Survey*, Sensors, vol. 19, no. 19, 2019, <https://doi.org/10.3390/s19194289>.
- [21] JINLAI M., BOFU W., JIE C., *Comparisons of 4WS and Brake-FAS based on IMC for vehicle stability control*, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 25, no. 5, 2011, 1265-1277.
- [22] KAMINAGA M., HEDRICK J.K., *Adaptive Sliding Mode Control in the Presence of Saturating Tire Forces*, JSME International Journal, Series C, vol. 42, no. 2, 1999, 281-286.
- [23] KHUNT H.A., *A review paper on hydraulically actuated four wheel drive system*, International Journal of Creative Research Thoughts, vol. 6, no. 1, 2018, 1116-1123.
- [24] KIM H., *An On-line Learning Control of Unsupervised Neural Network for a Vehicle Four Wheel Steering System*, SAE Papers 960938, 1996, 133-139.
- [25] KORESAWA M., SHIMOSAKA H., *Study on a four wheel steering vehicle driven at an objective side slip angle*, JSAE Review, vol. 15, 1994, 45-51.
- [26] LEE A.Y., *Design of Stability Augmentation Systems for Automotive Vehicles*, Transactions of the ASME. Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, vol. 112, 1990, 489-495.
- [27] LEE A.Y., *A Preview Steering Autopilot Control Algorithm for Four-Wheel-Steering Passenger Vehicles*, Transactions of the ASME. Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, vol. 114, 1992, 401-408.
- [28] LEE A.Y., *Emulating the Lateral Dynamics of a Range of Vehicles using a Four-Wheel-Steering Vehicle*, SAE Technical Papers 950304, 1995, 121-132.
- [29] LEE A.Y., *Performance of Four-Wheel-Steering Vehicles in Lane Change Maneuvers*, SAE Technical Papers 950316, 1995, 107-119.
- [30] LEE S.H., LEE U.K., HA S.K., HAN C.S., *Four-Wheel Independent Steering (4WIS) System for Vehicle Handling Improvement by Active Rear Toe Control*, JSME International Journal, Series C, vol. 42, no. 4, 1999, 947-956.
- [31] LEE S.H., LEE U.K., HAN C.S., *Enhancement of vehicle handling characteristics by suspension kinematic control*, Proc. I.Mech.E. Part D, vol. 215, 2001, 197-216.
- [32] LOHITH K., SHANKAPAL S.R., GOWDA M.H.M., *Development of four wheel steering system for a car*, SASTech Journal, vol. 12, no. 1, 2013, 90-97.
- [33] LOZIA Z., ŽARDECKI D., *Dynamics of Steering System with Freeplay and Dry Friction — Comparative Simulation Investigation for 2WS and 4WS Vehicles*, SAE Paper 2005-01-1261, 2005.
- [34] LUGNER P., PLOCHL M., *Additional 4WS and Driver Interaction*, Vehicle System Dynamics, vol. 24, no. 8, 1995, 639-658.
- [35] LUGNER P., PLOCHL M., *Stability control of a passenger car by combined additional steering and unilateral braking*, Vehicle System Dynamics, vol. 24, no. 8, 2002, 639-658.
- [36] LV H.M., CHEN N., LI P., *Multi-objective H_∞ optimal control for four-wheel steering vehicle based on a yaw rate tracking*, Proc. I Mech. E. Part D. Journal of Automobile Engineering, 218(D10), 2004, 1117-1124.
- [37] METZ L.D., *Dynamics of Four-Wheel-Steer Off-Highway Vehicles*, SAE Papers 930765, 1993, 1193-1221.
- [38] MITSCHKE M., *Comparison of the stability of Front and Rear Wheel Steered Motor Vehicles*, Proc. of 6-th IAVSD Symposium, Berlin, 1979.
- [39] MOKHIAMAR O., ABE M., *Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness*, Proc. I. Mech.E Part D, vol. 216, 2002, 115-124.
- [40] NAGAI M., OHKI M., *Theoretical study on active four-wheel-steering system by virtual vehicle model following control*, International Journal of Vehicle Design, vol. 10, no. 1, 1989, 16-33.

- [41] NAGAI M., HIRANO Y., YAMANAKA S., *Integrated Robust Control of Active Rear Wheel Steering and Direct Yaw Moment Control*, Vehicle System Dynamics, Supplement 28, 1998, 416-421.
- [42] NAKAYA H., OGUCHI Y., *Characteristics of the four-wheel steering vehicle and its future prospects*, International Journal of Vehicle Design, vol. 8, no. 3, 1987, 314-325.
- [43] NALECZ A.G., BINDEMANN A.C., *Investigation into the stability of four wheel steering vehicles*, International Journal of Vehicle Design, vol. 9, no. 2, 1988, 159-178.
- [44] NALECZ A.G., BINDEMANN A.C., *Analysis of the Dynamic Response of Four Wheel Steering Vehicles at High Speed*, International Journal of Vehicle Design, vol. 9, no. 2, 1988, 179-202.
- [45] ONO E., HATTORI Y., MURAGISHI Y., KOIBUCHI K., *Vehicle dynamics integrated control for four-wheel-distributed steering and four-wheel-distributed traction/braking systems*, Vehicle System Dynamics, vol. 44, no. 2, 2006, 139-151.
- [46] PARK J.H., *H_∞ Direct Yaw — moment Control with Brakes for Robust Performance and Stability of Vehicles*, JSME International Journal, Series C, vol. 44, no. 2, 2001, 404-413.
- [47] PLOCHL M., LUGNER P., *Braking Behaviour of a 4-Wheel-Steered Automobile with an Antilock Braking System*, Vehicle System Dynamics, Supplement 25, 1996, 547-558.
- [48] PLOCHL M., LUGNER P., *A 3-level driver model and its application to driving simulations*, Vehicle System Dynamics, Supplement 33, 1999, 71-82.
- [49] PLOCHL M., LUGNER P., *Different actuation strategies for a yaw moment control of a passenger car*, Vehicle System Dynamics, Supplement 35, 2001, 85-100.
- [50] POSTALCIOGLU S., *Improvement of Four Wheel Steering System*, Journal of the Institute of Science and Technology, vol. 9, no. 4, 2019, 1876-1886.
- [51] OSSOWSKI A., *Samochody osobowe z czterema kołami sterowanymi*, Autotechnika Motoryzacyjna, 4, 1988, 12-17.
- [52] QU Q., ZU J.W., *Variable structure model following control of four-wheel-steering vehicle*, International Journal of Vehicle Design, vol. 37, no. 4, 2005, 291-310.
- [53] SENGER K.H., SCHWARTZ W., KORTUM W., *The influence of a four wheel steering system on the stability behaviour of a vehicle-driver system*, 10 IAVSD Symposium, Praha, 1987, 186-193.
- [54] SHIOTSUKA T., NAGAMATSU A., YOSHIDA K., NAGAOKA M., *Active Control of Drive Motion of Four Wheel Steering Car with Neural Network*, SAE Papers 940229, 1994, 79-92.
- [55] SIAHKAIROUDI V.N., NARAGHI M., *Time Delay Control of a 4WS Vehicle — A Comparison of Single and Dual Steering Control Strategies*, SAE Paper 2002-01-1589, 2002, 1-7.
- [56] SIAHKAIROUDI V.N., NARAGHI M., *Model Reference Tracking Control a 4WS Vehicle Using Single and Dual Steering Strategies*, SAE Paper 2002-01-1590, 2002, 1-11.
- [57] SIAHKAIROUDI V.N., NARAGHI M., *A Comparison between Zero Steady State Compensators and Optimal Control Regulators in a 4WS Vehicle*, SAE Paper 2002-01-1591, 2002, 1-7.
- [58] SMITH D.E., BENTON R.E., *Automated Emergency Four-Wheel-Steered Vehicle using Continuous Gain Equations*, Vehicle System Dynamics, vol. 26, 1996, 127-142.
- [59] SONG Y.G., YOON Y.S., *Feedback control of four wheel steering using time delay control*, International Journal of Vehicle Design, vol. 19, no. 3, 1998, 282-298.
- [60] SPENTZAS K., ALKHAZALI I., DEMIC M., *Kinematics of four-wheel-steering vehicles*, Forschung im Ingenieurwesen, vol. 66, 2001, 213-216.
- [61] SUN C., ZHANG X., XI L., TIAN Y., *Design of a Path-Tracking Steering Controller for Autonomous Vehicles*, Energies, vol. 11, 2018, 1-17.
- [62] SZOSLAND A., *Fuzzy logic approach to four-wheel steering of motor vehicle*, International Journal of Vehicle Design, vol. 24, no. 4, 2000, 350-359.

- [63] WANG Y.Q., NAGAI M., *Improvement of Vehicle Handling and Stability by an Integrated Four-Wheel-Steer and Yaw Moment Control System*, SAE Papers 945073, 1994, 173-182.
- [64] WILL A.B., ZAK S.H., *Modelling and Control of an Automated Vehicle*, Vehicle System Dynamics, vol. 27, 1997, 131-155.
- [65] VIKAS A., WILLUMEIT H.P., *Use of Fuzzy control Steering Concepts in Four Wheel Steered Vehicles*, SAE Papers 945037, 1994, 183-192.
- [66] YAKUB F., ABU A., SARIP S., MORI Y., *Study of Model Predictive Control for Path-Following Autonomous Ground Vehicle Control under Crosswind Effect*, Journal of Control Science and Engineering, vol. 2016, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/6752671>.
- [67] YANIV O., *Robustness to Speed of 4WS Vehicles for Yaw and Lateral Dynamics*, Vehicle System Dynamics, vol. 27, no. 4, 1997, 221-234.
- [68] YIN G.D., CHEN N., WANG J.X., WU L.Y., *A study on μ -synthesis control for four-wheel steering system to enhance vehicle lateral stability*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 133, no. 1, 2011, 1-6.
- [69] YIN G., CHEN N., LI P., *Improving Handling Stability Performance of Four Wheel Steering Vehicle via μ -Synthesis Robust Control*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, 2007, 2432-2439.
- [70] YU C.C., LIU T., *Full control modes of a four-wheeled vehicle with zero body-sideslip angle and zero body motions*, International Journal of Vehicle Design, vol. 38, no. 1, 2005, 79-95.
- [71] Strona internetowa: <https://autokult.pl/10564,4ws-cztery-kola-skretne-historia-i-dzialanie-japonskiego-wynalazku> [dostęp: 24.03.2021 r.].

J. FARYŃSKI, A. DĘBOWSKI, D. ŻARDECKI

Preliminary study on the issues of 4WS car control

Abstract. The article is an overview and it focuses on the control of 4WS cars (with four steered wheels). The most important ideas concerning the control of four-wheeled vehicles, the historical development, the present state and prospects for the construction of 4WS cars were presented. Theoretical issues related to the control of vehicle movement direction (including issues related to mathematical modelling and simulation studies of vehicle motion, synthesis and analysis of 4WS control algorithms) were discussed. The presented study is based on a fairly extensive literature review on 4WS cars and on thoughts that shaped the concept of the doctoral dissertation on control algorithms in 4WS cars.

Keywords: mechanical engineering, literature study, 4WS cars, review of issues related to the control of the direction of movement of a 4-wheel vehicle

DOI: 10.5604/01.3001.0015.3835

