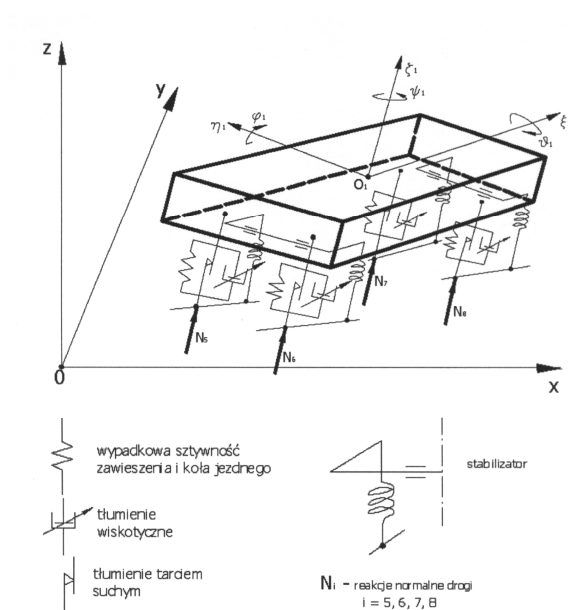


9. OPIS MODELU POJAZDU DWUOSIOWEGO WYKORZYSTYWANEGO W BADANIACH ZWROTNOŚCI, KIEROWALNOŚCI I STATECZNOŚCI RUCHU

9.1. Model fizyczny

W trakcie prac nad przedstawianą tematyką, autor wziął udział (jako konsultant), w badaniach nad oceną możliwości zwiększenia zwrotności dwuosowego samochodu ciężarowego. Badania te były prowadzone w ramach pracy dyplomowej Piotra Zdanowicza [102] na Wydziale Transportu PW. Stanowią one istotne uzupełnienie badań prowadzonych przez autora. Były to badania modelowe do, których wykorzystano zweryfikowany eksperymentalnie program symulacyjny pojazdu dwuosowego [56]. Model fizyczny pojazdu przedstawiono na rys. 72. Uwzględnia on podstawowe właściwości ciężarowych samochodów dwuosowych.



Rys. 72. Model fizyczny pojazdu dwuosowego [56]

Założono, że ruch odbywa się po idealnie równej, poziomej drodze. Bryła nadwozia oraz koła jezdne (poza własnościami promieniowymi) traktowane są jako ciała sztywne. Uwzględniono oddziaływanie stabilizatorów przechyłu bocznego. Pominęto tzw. „masy nieresorowane” pojazdu. Zawieszenie opisano siłami sprężystymi, tarcia suchego i tłumienia wiskotycznego. Bryła nadwozia posiada 6 stopni swobody (3 przemieszczenia wzdłuż osi układu $Oxyz$ oraz 3 obroty wokół osi układu $O_1\xi_1\eta_1\zeta_1$). Ruchowi obrotowemu każdego koła jezdnego odpowiada jeden stopień swobody. Przedstawiony model ma zatem 10 stopni swobody.

9.2. Obiekt badań

Do badań został wybrany samochód ciężarowy Star 1142 z nadwoziem skrzyniowym (rys. 73) w dwóch stanach – bez obciążenia i z ładunkiem zastępczym. Jest to pojazd dwuosiowy średniej ładowności, często spotykany na polskich drogach. Głównym powodem wyboru obiektu była konieczność posiadania znacznej liczby (ok. 300) parametrów pojazdu a takim dysponował autor pracy [56]. Dodatkowym argumentem przemawiającym za wyborem popularnego samochodu była jego dostępność, umożliwiającą ewentualne wykonanie badań eksperymentalnych weryfikujących wyniki przeprowadzonych symulacji.



Rys. 73. Drugi obiekt badań eksperymentalnych – dwuosiowy samochód ciężarowy

9.3. Weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego ruchu pojazdu w warunkach odpowiadających badaniom zwrotności pojazdów [102]

Model symulacyjny opisany w punkcie 9.1 był zweryfikowany eksperymentalnie [102] dla testów zalecanych przez ISO, z których większość dotyczyła ruchu z prędkością zbliżoną do 80 km/h [48, 53]. Badania zwrotności pojazdów są prowadzone dla prędkości nie większych niż 20 km/h.

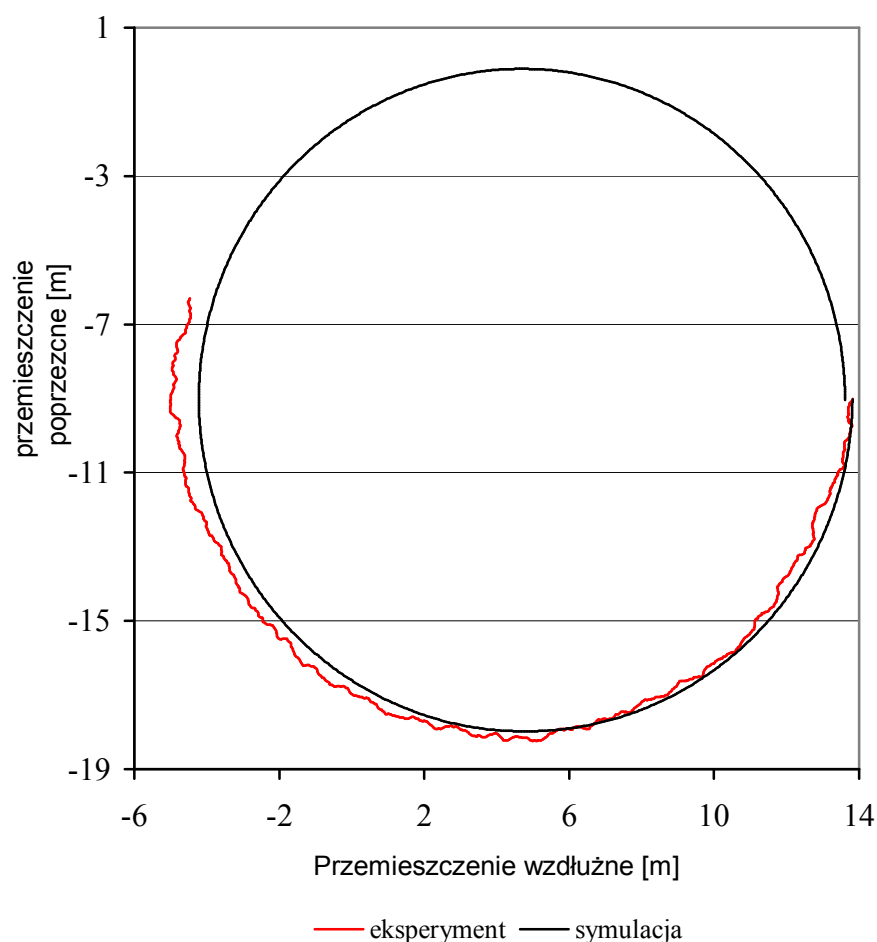
Częściowa weryfikacja eksperymentalna relacjonowana poniżej pozwoliła sprawdzić poprawność działania programu komputerowego w zakresie prędkości nieprzekraczających wspomnianych 20 km/h. Badania wykonano dzięki uprzejmości i współpracy zespołu badawczego z Politechniki Radomskiej (dr inż. Mirosława Gidlewskiego i współpracowników), Politechniki Krakowskiej (dr inż. Wiesława Pieniążka i współpracowników), Wojskowej Akademii Technicznej (mgr inż. Witolda Lutego i współpracowników). Zadawano jak największe kąty obrotu kierownicy, możliwe do zmierzenia bez zakłócania pracy urządzeń pomiarowych (ograniczenia wynikające z długości i usytuowania przewodów sygnałowych i zasilających czujniki pomiarowe). Rejestrowano prędkość wzdłużną i poprzeczną osi tylnej, prędkość kątową odchyłania pojazdu oraz kąt obrotu kierownicy. Wielkości te pozwoliły określić trajektorie ruchu środka masy pojazdu podczas badań drogowych.

W tabl. 10 przedstawiono porównanie wyników badań eksperymentalnych i odpowiadających mu symulacji. Przykładową postać rezultatów weryfikacji eksperymentalnej zamieszczono na rys. 74. Widoczna jest jakościowa i ilościowa zbieżność wyników symulacji i badań eksperymentalnych.

Tabl. 10.

Wyniki uzyskane podczas badań eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych oraz w trakcie odpowiadającej im symulacji [102]

Właściwości pró- by	Średni promień skrętu (m)		Różnica między eksperymentem i symulacją	
	eksperyment	symulacja	[m]	[%]
$V \sim 5$ km/h, bieg I; nie działa układ redukcji promie- nia	9,1	8,95	0,15	0,8



Rys. 74. Trajektoria ruchu środka masy pojazdu: samochód obciążony, nawierzchni sucha, prędkość jazdy $V \sim 5$ km/h, skręt w prawo, bieg I.
Nie działa układ redukcji promienia skrętu [102]

Z przeprowadzonych, w celu rozpoznania zagadnienia, około 200 symulacji, wybrano ostatecznie 27 przypadków, z czego 21 dotyczyło samochodu obciążonego, zaś 6 pojazdu nieobciążonego. Próby były wykonywane przy prędkościach jazdy $V \sim 10$ km/h i $V \sim 5$ km/h, przy czym większość prób dotyczyła mniejszej prędkości. Dokonano oceny układu redukcji promienia skrętu, wyko-

rzystując symulacje na dwóch rodzajach nawierzchni (suchej i mokrej), bez przyhamowywania kół oraz z przyhamowywaniem zarówno wewnętrznego koła tylnego jak i obydwu kół strony wewnętrznej pojazdu. Wyniki zestawiono w tabl. 11.

Poszukując większych możliwości poprawy zwrotności poprzez asymetryczne działanie układu napędowego i hamulcowego zaproponowano dodatkowe modyfikacje samochodu. Polegały one na wyposażeniu go w dwustopniowy reduktor o przełożeniu zwalniającym 2. Kolejnym etapem ingerencji w budowę pojazdu, którego dotyczyły dalsze symulacje było zastosowanie układu napędowego 4WD (napęd na cztery koła) z możliwością odłączenia napędu osi tylnej a więc w efekcie realizacją napędu na oś przednią. W celu przedstawienia i oceny alternatywnych sposobów poprawy zwrotności dwuosiowego samochodu ciężarowego wykonano również badania z zastosowaniem układu sterowania skrętem wszystkich kół (4WS).

Wśród 27 symulacji przedstawiono 7 prób dodatkowych. Pozwalają one ocenić zmianę zwrotności pojazdu, w którym zastosowano teoretyczną charakterystykę (Ackermanna) układu zwrotniczego. Ponadto umożliwiają szersze porównanie efektu redukcji promienia skrętu na dwóch rodzajach nawierzchni oraz różnych konfiguracjach układu napędowego przy podobnej wartości momentu hamującego. Dają także możliwość oceny zmiany zwrotności samochodu podczas manewru skrętu w lewo i w prawo.

9.4. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych. Określenie możliwości zwiększenia zwrotności pojazdu dwuosiowego

W tabl. 11 przedstawiono wykaz parametrów wybranych badań symulacyjnych wraz z wynikami w postaci wartości promienia skrętu [102].

Dokładnego porównania trzech przykładowych symulacji ruchu samochodu wyposażonego w układ redukcji promienia skrętu (próby 4, 10, 12 wg tabl. 11) z próbą dotyczącą ruchu pojazdu standardowego (symulacja 02 wg tabl. 11) dokonano na podstawie:

- układów sił w obszarze kontaktu kół z nawierzchnią
- czasowych przebiegów przyspieszenia poprzecznego środka masy pojazdu;
- kątów bocznego znoszenia poszczególnych kół samochodu;
- trajektorii ruchu środka masy pojazdu (np. rys. 74).

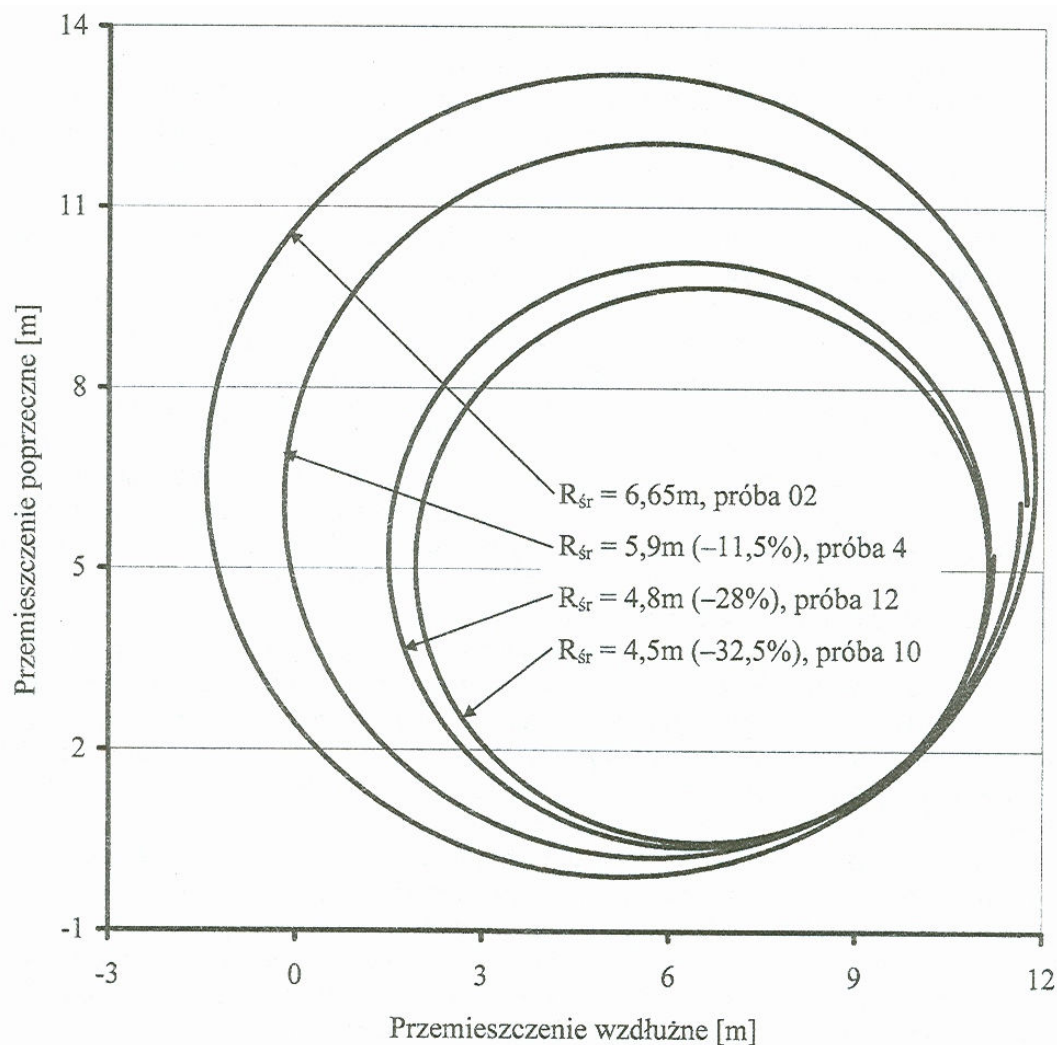
Wymienione wyżej cztery próby (02, 4, 10, 12) są dość charakterystyczne i obrazują w kolejności: wyniki dla pojazdu standardowego (próba 02), możliwość zwiększenia zwrotności pojazdu wyposażonego w asymetrycznie działający układ hamulcowy, bez dodatkowych modyfikacji (próba 4), maksymalny efekt redukcji promienia skrętu uzyskany podczas wszystkich symulacji (pojazd wyposażony w asymetrycznie działający układ hamulcowy, reduktor w układzie napędowym 4WD z odłączonym napędem tylnym; próba 10), możliwość zmniejszenia promienia skrętu po zastosowaniu układu 4WS w pojeździe standardowym (próba 12).

Zastosowanie układów redukcji promienia skrętu o różnych konfiguracjach w sposób znaczący wpływa na ruch badanego pojazdu. Zmianie ulegają wartości i znaki kątów bocznego znoszenia kół jezdnych, przyspieszenia poprzecznego, a w efekcie promienia skrętu. Jego redukcja sięga nawet wartości 32,5%, choć już wartość 11,5% ma znaczenie praktyczne.

Wyniki symulacji komputerowych wskazują, iż zmniejszenie promienia skrętu ograniczone jest wartościami sił napędowych i hamowania. Wiąże się to z ograniczeniem wynikającym z aktualnych wartości reakcji normalnych drogi (ograniczenie sił przyczepności). Nie można także przekroczyć maksymalnych możliwych wartości momentów napędowych. Z tego względu efekt redukcji promienia skrętu osiągnięty przez pojazd dodatkowo niezmodyfikowany ma poziom około 8% w przypadku samochodu nieobciążonego i 11,5% w przypadku pojazdu obciążonego.

Jednocześnie przy umiarkowanej asymetrii działania układu hamulcowego i napędowego większy efekt redukcji promienia skrętu można uzyskać na nawierzchni o dużej przyczepności. Dopiero przyłożenie znacznego momentu przyhamowującego stronę wewnętrzną pojazdu umożliwia osiągnięcie większej zwrotności na nawierzchni mokrej.

Możliwość dalszego zmniejszenia promienia skrętu wiąże się z wykonaniem dodatkowych modyfikacji pojazdu polegających na zmianie rodzaju napędu na układ 4WD z możliwością odłączenia napędu kół osi tylnej (około 10% – samochód nieobciążony i 23,5% – samochód obciążony). Inną zmianą może być wyposażenie samochodu w dwustopniowy reduktor o przełożeniu zwalniającym (redukcja promienia skrętu o około 21% – samochód z napędzanymi kołami osi tylnej oraz 32,5% – samochód z napędzanymi kołami osi przedniej; nr próby 10). Praktyczny efekt redukcji promienia skrętu dotyczący powyżej omawianego przypadku został zilustrowany na rys. 75.



Rys. 75. Efekt redukcji promienia skrętu dla omówionych w tekście przypadków

Alternatywnym rozwiązaniem zwiększającym zwrotność dwuosowego samochodu ciężarowego jest zastosowanie sterowania kątem skrętu wszystkich kół pojazdu (4WS). Układ ten zyskuje przewagę wówczas, gdy samochód jest nieobciążony (zmniejszenie promienia skrętu o około 30%). Ze względu na duży koszt modyfikacji pojazdu rozwiązanie to może być polecane w przypadku samochodów ciężarowych o znacznych wymiarach, przewożących ładunki o małej gęstości (ładunki przestrzenne).

Wyniki otrzymane w trakcie symulacji i badań eksperymentalnych samochodu dwuosiowego są bardzo zbliżone, co wskazuje na jakościową i ilościową poprawność modelu i programu symulacyjnego.

Dokonana analiza potwierdza duży wpływ asymetrycznego działania układu napędowego i hamulcowego na zwrotność dwuosiowego samochodu ciężarowego.