

Opory ruchu pojazdu oraz minimalizacja oporów toczenia

Michał Domek


1. Wstęp

Zawody SEM odbywają się od 1985 roku i są poligonem doświadczalnym dla nowych rozwiązań minimalizujących zużycie paliwa. Studenci oraz uczniowie szkół średnich z całego świata rywalizują o to, kto przejedzie jak największy dystans na jednym litrze paliwa. Młodzi konstruktorzy mogą w sposób praktyczny wykorzystać swoją wiedzę na temat konstruowania, obsługi i napraw zbudowanych przez siebie pojazdów. Uliczny tor zbudowany w Londynie ma długość 1 mili. Podczas mierzonego przejazdu należy pokonać 10 okrążeń w czasie poniżej 39 minut. Sporym wyzwaniem jest podjazd mierzący około 200 m; w ubiegłym roku duża część pojazdów posiadała za słaby układ napędowy, aby go pokonać. Zawody dzielą się na dwie główne kategorie: Prototype oraz Urban Concept. Pierwsza jest dość liberalna, jeżeli chodzi o regulamin i dopuszcza wiele konstrukcji. Minimalna waga kierowcy wynosi 50 kg. Pojazdy te są stosunkowo niskie i długie, a kierowca prowadzi w pozycji leżącej. W kategorii Urban Concept startują pojazdy przypominające małe samochody miejskie. Muszą one posiadać fotele, światła, wycieraczki oraz opony umożliwiające jazdę w deszczu. Aktualny europejski rekord wynosi 3410 km na ekwiwalencie jednego litra benzyny (kategoria Prototype).

Projekt poprawionej wersji pojazdu „Saw” na zawody Shell Eco-marathon w Londynie, która miała za zadanie pobić ubiegłoroczny wynik 133 km/l, wymagał zwrócenia szczególnej uwagi na opory ruchu, które występują podczas jazdy. Kluczem do osiągnięcia dobrego wyniku jest ograniczenie ich do minimum.

Po analizie profilu trasy, specyfiki zawodów oraz wyciągnięciu wniosków z ubiegłorocznej edycji należało poprawić zdolność bolidu do pokonania jak największego dystansu na wybiegu, ponieważ regulamin zezwala na wyłączenie silnika w czasie przejazdu. Prędkości uzyskiwane na trasie przeważnie nie przekraczają 50 km/h, więc opory aerodynamiczne mają dość mały wpływ na wynik. Najważniejsze jest zmniejszenie oporów toczenia oraz tarcia wewnętrznego w łożyskach kół oraz układzie napędowym. Praca ta skupia się na procesach projektowania i budowania części i podzespołów pojazdu, które miały wpływ na zmniejszenie oporów toczenia. Zmiany w stosunku do zeszłorocznej specyfikacji objęły całkowicie nowe przednie zwrotnice, układ kierowniczy, obręcze i opony. Pociągnęło to za sobą konieczność obliczenia na nowo wartości promienia zataczania, kompensacji Ackermana oraz ustawienia założonych wartości geometrii zawieszenia. Wartości te zostały dobrane na podstawie literatury i rozwiązań stosowanych

Streszczenie: Projektując pojazd na zawody Shell Eco Marathon, musieliśmy uwzględnić wszystkie elementy oporów ruchu występujących podczas jazdy, ponieważ odgrywają one kluczową rolę w uzyskaniu dobrego wyniku (przejechanie jak największego dystansu na ekwiwalencie 1 litra paliwa). Głównym tematem niniejszego opracowania było zaprojektowanie nowego układu kierowniczego (zwrotnice, drążki kierownicze) tak, aby zminimalizować opory toczenia poprzez zastosowanie nowych opon. Nowe osie, zwrotnice i koła pozwoliły zmniejszyć nieco rozstaw kół, co pociągnęło za sobą zmiany w całej geometrii przedniego zawieszenia. Zaprojektowanie nowych zwrotnic wymagało obliczeń kątów pochylenia koła, pochylenia zwrotnicy, wyprzedzenia zwrotnicy oraz kluczowego do uzyskania niskich oporów toczenia – promienia zataczania. Nowe elementy zostały zaprojektowane i sprawdzone wytrzymałościowo za pomocą metody MES, z wykorzystaniem oprogramowania SolidWorks. Dodatkowym kryterium było możliwie jak największe zmniejszenie masy układu zawieszenia przednich kół.

 **Abstract:** During development of our car for Shell Eco Marathon we had to take into account all of car motion resistances because they play a key role in achieving a good result (as many kilometers as possible at the equivalent of 1 liter of fuel). The main theme of this study was to design a new steering system which minimizes rolling resistance. New axles, struts and wheels helped us reduce the track width resulting in changes in the geometry of the front suspension. New parts required calculations of camber, caster, kingpin inclination angle, and the key to low rolling resistance: scrub radius. New elements have been designed and tested for strength using the MES method, using SolidWorks software. An additional criterion was used to reduce the weight of the front suspension as much as possible.

w przemyśle samochodowym oraz zoptymalizowane pod kątem minimalnych oporów toczenia. Dodatkowo zmienił się rozstaw kół oraz osi.

2. Opory ruchu

W pojazdach samochodowych występują następujące opory ruchu:

Opór aerodynamiczny

Oporem powietrza nazywa się składową równoległą do nawierzchni drogi z siły, jaką jest całkowity opór powietrza. Siła ta powstaje w wyniku różnicy ciśnień dynamicznych, działających na powierzchnię pojazdu. Składa się na nią:

- opór profilowy (ok. 58%), który zależy od kształtu przekroju podłużnego pojazdu;
- opór zakłóceń (ok. 14%) wywołany obecnością takich części pojazdu, jak: lusterka, klamki, wirujące koła, ozdoby i elementy podwozia;
- opór tarcia (ok. 10%);
- opór układu chłodzenia i wentylacji (ok. 10%);
- opór indukcyjny (ok. 8%) wywołany zawirowaniem strugi powietrza na bokach nadwozia.

Wielkość oporów powietrza zależy od powierzchni czołowej pojazdu, gęstości powietrza, współczynnika aerodynamicznego oraz kwadratu prędkości. Dla stałej gęstości powietrza (w warunkach normalnych) wzór przedstawia się następująco:

$$F_p = 0,047AC_x V^2 \quad (1)$$

gdzie:

F_p – siła oporów powietrza;

A – powierzchnia czołowa pojazdu [m^2];

C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego;

V – prędkość pojazdu [km/h].

Opór wzniesienia

Podczas pokonywania wzniesień na pojazd działa siła oporu wzniesienia; jest to nic innego jak składowa jego ciężaru zależna od nachylenia drogi.

$$F_w = G \times \sin \alpha \quad (2)$$

F_w – opór wzniesienia;

G – siła ciężkości pojazdu;

α – kąt nachylenia wzniesienia.

Siła bezwładności

Opory bezwładności są siłą przeciwdziałającą zmianie prędkości, z jaką porusza się w danej chwili pojazd. Występują one zarówno podczas przyspieszania, jak i hamowania.

$$F_b = m \times a \times \delta \quad (3)$$

F_b – siła bezwładności;

m – masa pojazdu [kg];

a – przyspieszenie;

δ – współczynnik mas zredukowanych.

Siła tarcia wewnętrzznego

Opory spowodowane współpracą części mechanicznych nazywamy oporami tarcia wewnętrznego. Na ich wielkość mają wpływ m.in. jakość stosowanego oleju, zużycie części silnika, pasowanie elementów.

Opory toczenia

Opory toczenia są siłą wynikającą z odkształcenia się współpracujących powierzchni kół jezdnych oraz podłoża, tarcia wewnętrznego występującego w ogumieniu oraz sił adhezyjnych między ogumieniem a nawierzchnią. Ich wielkość zależy przede wszystkim od rodzaju nawierzchni i ogumienia oraz masy pojazdu. Ponadto na ich wielkość mają wpływ wymiary kół napędowych, ciśnienie powietrza w ogumieniu i prędkość jazdy. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto, że masa pojazdu jest rozłożona równomiernie na wszystkie koła i podział ten nie zależy od przyspieszeń działających na pojazd. Siłę oporów toczenia dla dróg asfaltowych i betonowych obliczamy ze wzoru:

$$F_t = \frac{mg}{1000} (12 + 0,0006V^2) \quad (4)$$

F_t – siła oporów toczenia [N];

m – masa pojazdu [kg];

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2];

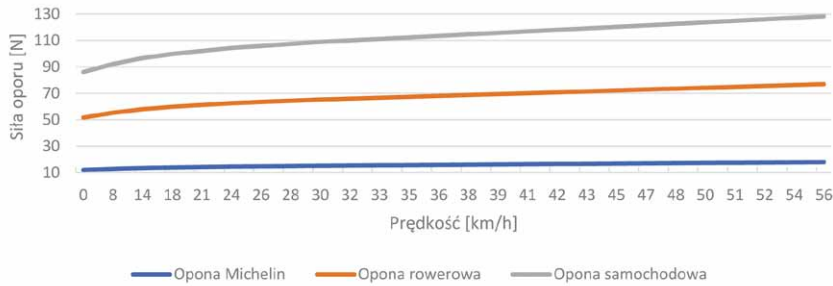
V – prędkość pojazdu [km/h].

Na rys. 1–4 zaprezentowane są wybrane opory ruchu pojazdu podczas pokonywania wzniesienia na torze, w czasie Shell Eco-marathon w Londynie. Podczas obliczeń założono, że pojazd stoi na początku wzniesienia i zaczyna podjazd od zerowej prędkości.

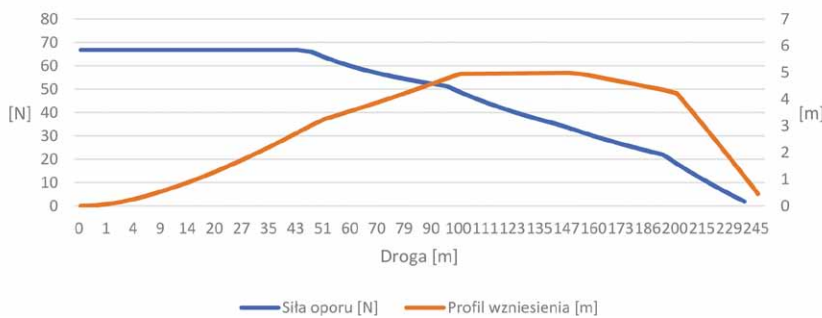
Tabela 1

Dane potrzebne do obliczeń	
Masa pojazdu z kierowcą	106 kg
Rozstaw kół przednich	570 mm
Różnica poziomów	5 m
C_x	0,3
Pow. czołowa	0,87 m^2
Promień dynamiczny koła rd	239 mm
Długość podjazdu	250 m

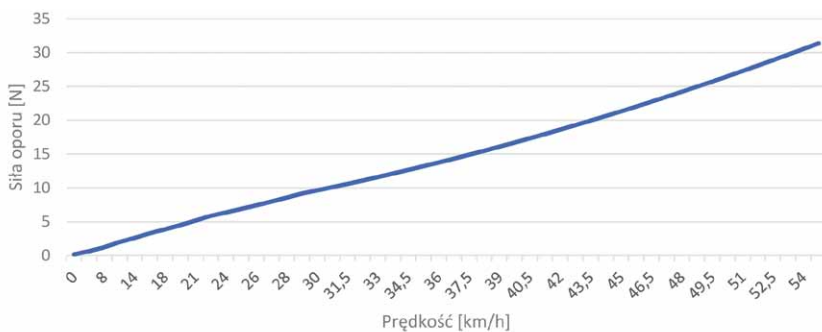
Jak łatwo zauważyć, największe wartości mają siły oporów wzniesienia oraz bezwładności działające podczas startu. Opory toczenia oraz powietrza, chociaż działają przez cały czas, mają o wiele mniejsze wartości. Na wielkość oporów bezwładności oraz wzniesienia (dla danego pochylenia drogi) ma wpływ masa pojazdu, stąd też dążenie do jej minimalizacji. Podkreślić przy tym należy, że na 10 okrążeń próby opory bezwładności i przyspieszenie pokazane jak na powyższym wykresie działają jedynie raz, po starcie pojazdu. Opory wzniesienia, pomimo dużej wartości, działają jedynie przez 15% drogi jednego okrążenia. Na wykresie oporów toczenia naniesiono porównanie opon firmy Michelin stosowanych w bolidzie do opon rowerowych (używanych w poprzednim roku) oraz samochodowych (pogładowo). Kluczowe znaczenie odgrywa masa pojazdu, ponieważ to od niej w głównej mierze zależą wartości tych oporów. W obliczeniach zastosowano profil trasy toru w Londynie, więc



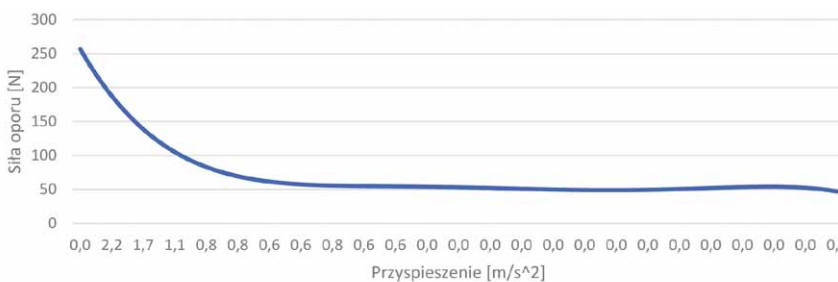
Rys. 1. Opory toczenia



Rys. 2. Opory wzniesienia i profil trasy



Rys. 3. Opory powietrza



Rys. 4. Siła bezwładności i przyspieszenie

mowa o tym konkretnym przypadku. Na innych torach wartości mogłyby się różnić.

Tabela 2. Opory toczenia opon

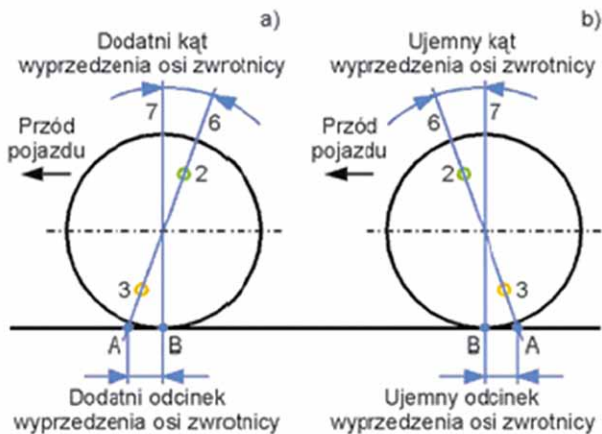
Opory toczenia opon	[N/kN]
Michelin (stosowane na SEM)	1,4
Rower szosowy	5–6
Samochód osobowy	8–12

3. Geometria w bolidzie SAW

Kąt pochylenia koła to bardzo istotny parametr w zawieszeniu. Prawidłowo dobrany pozwala oponie na kontakt z nawierzchnią możliwie największą powierzchnią. Zazwyczaj jego wartość wynosi około zera lub jest to niewielka wartość ujemna, do około 1 stopnia (górną część koła jest pochylona do wewnątrz). Ma to na celu poprawienie zachowania samochodu podczas pokonywania zakrętów. W samochodach sportowych można spotkać większe wartości, jednak niesie to ze sobą zwiększone zużycie opon („ścianianie” wewnętrznych krawędzi).

Kąt wyprzedzenia sworznia zwrotnicy (lub wyprzedzenia osi zwrotnicy) to parametr, z którego wielu kierowców nie zdaje sobie sprawy. Jest to kąt pomiędzy osią zwrotnicy a pionem, mierzony w płaszczyźnie symetrii pojazdu. Ma ona bardzo wyraźny wpływ na prowadzenie pojazdu. Dodatni kąt wyprzedzenia sworznia zwrotnicy powoduje powstanie momentu stabilizacyjnego od reakcji podłoża, co powoduje stabilizację przednich kół, szczególnie przy wysokich prędkościach. Innym aspektem takiego ustawienia jest dążenie kół do powrotu do położenia „na wprost”. Poprawia to stabilność na nierównościach oraz podczas wychodzenia z zakrętów. W samochodach spotykanych na ulicach zazwyczaj wartość waha się pomiędzy 1–10 stopni, w zależności od konstrukcji zawieszenia i rodzaju napędu.

Pierwszą rzeczą, od której zaczęto projektowanie nowego zawieszenia, był dobór opon. Zastosowano produkt firmy Michelin o rozmiarze 45/75R16. Opony te zaprojektowano specjalnie pod kątem pojazdów typu prototype. Ich konstrukcja jest zoptymalizowana pod kątem



Rys. 5. Kąt wyprzedzenia sworznia (osi) zwrotnicy

niskich oporów toczenia; wynoszą one według danych producenta 1,4 N/kN. Dla porównania wartość ta dla opon do samochodu osobowego o klasie oporów toczenia „A” wynosi <math><7,5\text{ N/kN}</math>. Główną przyczyną budowy nowego zawieszenia przedniego (oprócz redukcji masy), była niemożliwość zastosowania opon Michelin w starej konstrukcji. Parametry opony (średnica, szerokość) zbyt różniły się od ogumienia stosowanego wcześniej. Znając średnicę opony, dobrano kąt pochylenia zwrotnicy tak, aby promień zataczania był zerowy. Taka wartość minimalizuje opory podczas skręcania oraz redukuje zużycie opon. Należy zwrócić szczególną uwagę na ten parametr, ponieważ nie można go regulować.



Rys. 6. Prototyp zwrotnicy, widoczny dodatni promień zataczania

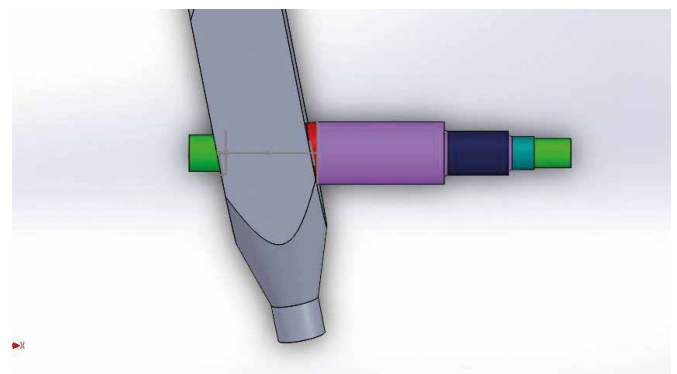
Ustalenie promienia zataczania zdecydowało tzw. kąt sumaryczny, czyli sumę kątów pochylenia zwrotnicy oraz pochylenia koła. Wartość ta zmalała w stosunku do ubiegłorocznej konstrukcji o 3 stopnie. Zmiana ta wynikała wyłącznie ze zmiany pochylenia zwrotnicy, ponieważ kąt pochylenia koła o wartości $-0,5$ stopnia musiał pozostać bez zmian. Wartość ta została dobrana na podstawie literatury oraz rozwiązań stosowanych w przemyśle samochodowym, w celu uzyskania możliwie małego kąta znoszenia kół przednich podczas pokonywania zakrętów. Aby zmniejszyć rozstaw kół, należało zwrotnicę ustawić bardziej pionowo, stąd zmiana w jej pochyleniu o 3 stopnie. Zmiana ta była możliwa dzięki mniejszej odległości między

środkiem zwrotnicy na wysokości osi koła a środkiem obręczy. Wymusiła ona również zastosowanie nowych piast oraz mocowania tarczy hamulcowej.

Kąt wyprzedzenia zwrotnicy ma wpływ między innymi na siłę, jaka jest potrzebna do poruszania kierownicą oraz poprawia stabilność podczas jazdy prosto. Nie należy jednak nadmiernie zwiększać tego parametru, ponieważ siła potrzebna do poruszania kierownicą może sprawiać trudności kierowcy. Na podstawie dostępnej w literaturze wiedzy ustaliliśmy wartość tego kąta na 12 stopni.

Promień zataczania wpływa bezpośrednio na długość ramienia działania poziomych sił wzdłużnych, działających na styku koła z nawierzchnią, a więc na wartość momentów skręcających, działających w osi zwrotnicy. Tym samym każda jego zmiana wpływa na pracę układu kierowniczego, czyli na zachowanie się samochodu na drodze. Im większe stają się wartości dodatnie, tym łatwiej tor ruchu zakłócany będzie po zderzeniu z nierównością drogi jednego z pary kierowanych kół, podczas podmuchów bocznego wiatru lub zmian poprzecznego pochylenia jezdnii. Przy ujemnych wartościach pojawia się i rośnie wraz z nimi tendencja do samoczynnej korekty skutków tych niekorzystnych zjawisk. Siły symetryczne (np. napędu lub hamowania) są w obu wypadkach proporcjonalne do wartości promienia zataczania, a więc jej zwiększenie powoduje wzrost obciążenia elementów układu kierowniczego. Ponadto zwiększenie wartości bezwzględnej promienia zataczania zwiększa opór skrętu kół, wynikający z przemieszczenia się środka obrotu koła względem środka skrętu pojazdu.

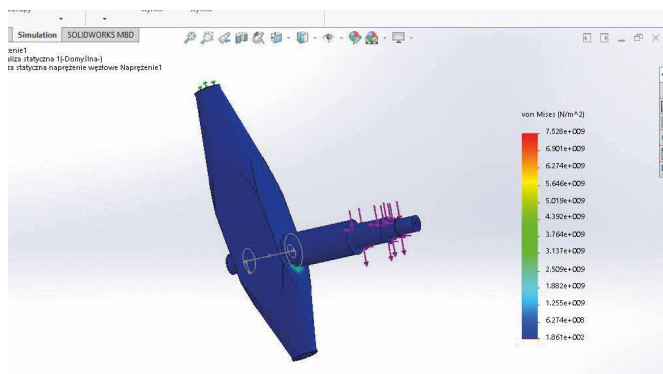
W pojazdach spotykanych na drogach wartości te są dobrane przez producenta na etapie projektowania samochodu. Tylko w niektórych przypadkach można je regulować. Najczęściej występuje jedynie regulacja kąta pochylenia koła.



Rys. 7. Model zwrotnicy z osią

Po zaprojektowaniu zwrotnicy została ona poddana badaniu wytrzymałości metodą elementów skończonych (MES), aby mieć pewność, że konstrukcja zawieszenia poradzi sobie z siłami działającymi podczas jazdy.

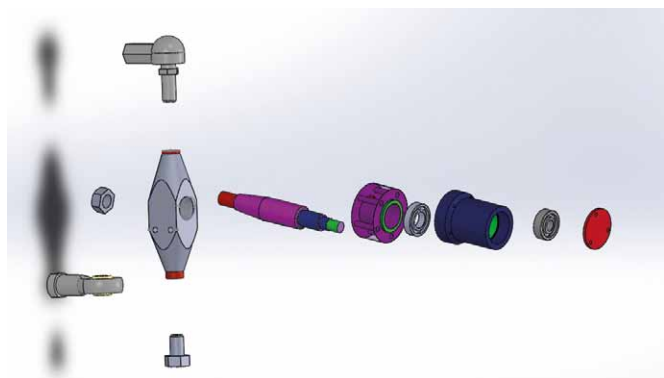
Następnie należało ustalić różnicę w skręcie kół, nazywaną kompensacją Ackermana. Aby koła podczas pokonywania zakrętu nie wpadały w poślizg, muszą być skręcone pod innym kątem. Gdyby koła skręcały się jednakowo, samochód byłby podsterowny (uślizg przodu) oraz zużycie opon byłoby przyspieszone. Prostym sposobem skonstruowania zawieszenia



Rys. 8. Badanie wytrzymałości zwrotnicy metodą MES



Rys. 9. Układ kierowniczy bolidu SAW na rok 2017



Rys. 10. Zwrotnica wraz z osią, łożyskami, adapterem tarczy hamulcowej i piastą koła

i układu kierowniczego tak, aby występowała różnica w kątach skrętu, jest zbudowanie trapezu kierowniczego – przedłużenie jego ramion powinno przecinać się na środku tylnej osi.

Tak zaprojektowane zawieszenie zostało wykonane i zamontowane w bolidzie SAW, który podczas zawodów Shell Eco-marathon w Londynie w roku 2017 uzyskał wynik

306 km/l. Nowe zwrotnice zostały zważone, masa nowej zwrotnicy z przegubami wynosi 230 g (stara wersja 450 g). Znaczącą rolę w poprawie wyniku (udało się poprawić ubiegłoroczny wynik o 130%) odegrał nowy układ kierowniczy oraz nowe koła. Dzięki tym rozwiązaniom udało się znacznie obniżyć opory toczenia. Plan na przyszłość to kolejne działania związane ze zmniejszeniem oporów ruchu. Głównym czynnikiem, któremu należy poświęcić najwięcej uwagi, wydaje się być redukcja masy.

Tabela 3

Dane bolidu	2016	2017
Kąt pochylenia zwrotnicy	14°	11°
Kąt pochylenia koła	-0°30'	-0°30'
Kąt wyprzedzenia sworznia zwrotnicy	12°	12°
Zbieżność kół przednich	0°	0°
Promień zataczania	-15 mm	0 mm
Rozstaw kół przednich	670 mm	570 mm
Masa zwrotnicy z przegubami	450 g	230 g
Masa koła przedniego	1250 g	620 g

Literatura

- [1] ARCZYŃSKI S.: *Mechanika ruchu samochodu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
- [2] REIMPELL J., BETZER J.: *Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [3] GABRYLEWICZ M.: *Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych. Podstawy budowy, diagnozowania i naprawy*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2015.
- [4] PROCHOWSKI L.: *Mechanika ruchu. Pojazdy samochodowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.

Michał Domek - Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn, PWSZ im. S. Pigoń w Krośnie