

WPLYW CIŚNIENIA W OGUMIENIU NA OPORY TOCZENIA KÓŁ POJAZDÓW

W pracy przeprowadzono analizę literaturową pod kątem identyfikacji czynników mających wpływ na opory toczenia kół pojazdów samochodowych. Przeanalizowano także zjawiska występujące w czasie użytkowania opon przy nieprawidłowym ciśnieniu ich pompowania. Przygotowano metodykę badań eksperymentalnych, których celem było wyznaczenie zależności między ciśnieniem w oponach pneumatycznych i wartością oporów toczenia kół pojazdów. Testom poddano 10 losowo wybranych pojazdów o różnych rodzajach kół pneumatycznych. Pomiary realizowano dla ciśnienia nominalnego i obniżonego o 10%, 20%, 30% i 40%, a także przy ciśnieniu podwyższonym o 10%. Wykonano wizualizację wyników zarejestrowanych w czasie badań i na ich podstawie wygenerowano równania opisujące zależność między ciśnieniem w oponach pneumatycznych i wartością oporów toczenia kół. Przeprowadzone analizy wykazały, że zmiany ciśnienia w oponach w przyjętym zakresie mogą wywołać zmianę oporów toczenia nawet o 25%. Opracowana w ten sposób baza wiedzy wykorzystana zostanie do budowy cyfrowych modeli pojazdów samochodowych.

WSTĘP

Dynamiczny rozwój motoryzacji spowodował wzrost ilości odpadów poprodukcyjnych i powstających w procesie eksploatacji pojazdów, które negatywnie wpływają na środowiska naturalnego. Każdego roku na świecie zużywa się około miliarda opon (dane z roku 2009). W Unii Europejskiej zużycie opon wynosi około 300 milionów, a w Polsce około 190 tysięcy (dane z roku 2009). Zużyte opony stanowią około 60-70% odpadów gumowych. Dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii recyklingu tego typu odpadów, znacząco ograniczono ich wpływ na środowisko naturalne. Wskaźnik zagospodarowania zużytych opon w Europie wzrósł z 32% w 1992 roku, do ponad 89% w roku 2009. Mimo to produkcja opon wiąże się z dużymi nakładami materiałowymi i energetycznymi [3, 9].

Tylko właściwa eksploatacja opon może wydłużyć ich trwałość, a tym samym przyczynić się do ograniczenia nakładów materiałowych i energetycznych, zużytych na ich wytworzenie i utylizację. Jednym z głównych przyczyn wpływających na zmniejszenie trwałości opon jest niewłaściwe ciśnienie pompowania. Podczas corocznych akcji przeprowadzanych na terenie Polski przez firmę Michelin, pod tytułem "Ciśnienie pod kontrolą" prowadzone są badania dotyczące właściwej eksploatacji opon. W roku 2012 przeprowadzone kontrole wykazały, że tylko 38% kierowców z badanej grupy miało właściwe ciśnienie w kołach pneumatycznych. Należy pamiętać, że obniżenie ciśnienia w ogumieniu o 20% to zmniejszenie trwałości opony na poziomie 30%, a o 40% skutkuje zmniejszeniem trwałości nawet do 40% [2, 9, 13].

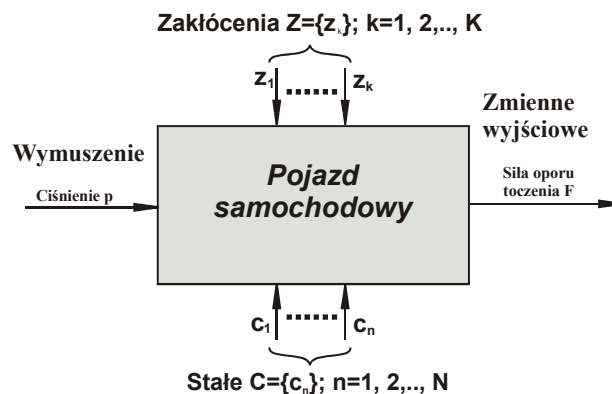
Zmiany ciśnienia w oponie to zjawisko naturalne. Na ich wielkość wpływ mają głównie: szczelność konstrukcji, obciążenie i zmiany temperatury otoczenia. Należy pamiętać, że zmiana ciśnienia w ogumieniu wynikająca ze zmian temperatury środowiska roboczego może wynosić nawet 4×10^4 Pa. Zbyt niskie ciśnienie w oponie powoduje także zwiększenie oporów toczenia kół, co wpływa na dynamikę jazdy i zużycie paliwa (zmniejszone o 1×10^5 Pa ciśnienie powoduje wzrost zużycia paliwa o 6%). Obniżone ciśnienie pompowania to także zwiększenie ryzyka utraty szczelności opony pneumatycznej w kontakcie z obręczą koła (wartość graniczna przy jakiej wzrasta znacząco ryzyko rozszczelnienia wynosi 5×10^4 Pa poniżej optymalnego ciśnienia pompowania). W procesie eksploata-

cji opon o zaniżonym ciśnieniu wystąpić może także: zmniejszenie stateczności ruchu pojazdu (zmniejszenie ciśnienia o 1×10^5 Pa wymusza konieczność obniżenia prędkości podczas pokonywania łuków o około 10 km/h), wzrost ryzyka wystąpienia aquaplaningu (obniżenie ciśnienia o 30% znacząco podwyższa ryzyko aquaplaningu) i wydłużenie drogi hamowania (zmniejszenie ciśnienia o 1×10^5 Pa powoduje wydłużenie drogi hamowania o 5m) [1, 2, 4, 8, 13].

Określenie zależności między ciśnieniem w kole pneumatycznym, a wartością współczynnika oporów toczenia kół pozwoli opracować bazę wiedzy potrzebną przy budowie modeli pojazdów. Modele tego typu umożliwią badania zachowania pojazdów w przestrzeni wirtualnej, przy nieprawidłowej eksploatacji kół pneumatycznych, a także wpływu ciśnienia w oponie na bezpieczeństwo użytkownika pojazdu [4, 5, 6, 7, 10, 11, 12].

1. METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu ciśnienia w oponach pojazdów samochodowych na wielkość oporów toczenia pojazdów samochodowych. Aby osiągnąć założony cel przyjęto model eksperymentalny w postaci przedstawionej na rys. 1. W przyjętym modelu zmiana wartości wymuszeń realizowana jest bezpośrednio przez zmianę ciśnienia w oponie pneumatycznej.



Rys. 1. Pojazd samochodowy jako przedmiot badań
Źródło: Opracowanie własne

W przyjętym modelu zbiór stałych C ma postać:

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} \quad n = 6 \quad (1)$$

gdzie:

- c_1 – masa pojazdu i kierowcy,
- c_2 – droga pomiarowa,
- c_3 – rodzaj podłoża,
- c_4 – pochylenie wzdłużne i poprzeczne podłoża,
- c_5 – prędkość,
- c_6 – rodzaj opon i opory mechaniczne.

W przyjętym modelu zbiór zakłóceń Z ma postać:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_k \end{bmatrix} \quad k = 3 \quad (2)$$

gdzie:

- z_1 – bezwładność pojazdu,
- z_2 – nierówność i niejednorodność podłoża,
- z_3 – zmienność środowiska pomiarowego (np. temperatura i ciśnienie atmosferyczne).

Badania przeprowadzono na grupie dziesięciu samochodów osobowym o zróżnicowanej konstrukcji i przebiegu:

- Audi 80 sedan (rok produkcji - 1990, przebieg - 208244 km, opony przednie - Michelin Energy 185/70R15, opony tylne - Firestone F630 185/70R14, wysokość bieżnika 5-6 mm),
- Audi A4 kombi (rok produkcji - 2004, przebieg - 258836 km, opony - Uniroyal Rain Expert 205/65R16, wysokość bieżnika 7 mm),
- Fiat Seicento S hatchback (rok produkcji - 1999, przebieg - 170280 km, opony - Daytona D110 145/70R13, wysokość bieżnika 5 mm),
- Mercedes-Benz E320 sedan (rok produkcji - 2003, przebieg - 190485 km, opony - Goodyear Excellence 225/55ZR16, wysokość bieżnika 5 mm),
- VW Passat sedan (rok produkcji - 1998, przebieg - 192332 km, opony - Barum Bravuris 205/55R16, wysokość bieżnika 5-6 mm),
- VW Passat kombi (rok produkcji - 1998, przebieg - 216259 km, opony przód - Continental ContiSportContact 3 225/45R17, opony tył - Dunlop SP Sport 9000 225/45ZR17, wysokość bieżnika 5 mm),
- Skoda Octavia sedan (rok produkcji - 2003, przebieg - 201891 km, opony - Barum Brilliantis II 175/80R14, wysokość bieżnika 8 mm),
- Peugeot Partner van (rok produkcji - 2011, przebieg - 13414 km, opony - Continental ContiPremiumContact 2 205/65R15, wysokość bieżnika 7 mm),
- VW Transporter van (rok produkcji - 2003, przebieg - 406554 km, opony - Vanpro Maxi 205/65R16C, wysokość bieżnika 5 mm),
- Volvo V70 kombi (rok produkcji - 2004, przebieg - 128211 km, opony przód - Infinity INF-05 215/55R16, opony tył - Continental ContiPremiumContact 2 205/65R15, wysokość bieżnika 5-6 mm).

Pomiary realizowano dla ciśnienia nominalnego (zalecanego przez producenta pojazdu) i obniżonego o 10%, 20%, 30% i 40%, a także przy ciśnieniu podwyższonym o 10%. Dokładność pomiaru ciśnienia realizowana była na poziomie 0,01 MPa. Tor pomiarowy posiadał podłoże betonowe o zerowym pochyleniu wzdłużnym i poprzecznym. Do pomiaru siły użyto czujnika tensometrycznego FT-3507 o zakresie pomiarowym 0-5000N. Współpracował on z rejestratorem MG-TAE1-230. Tak zestawiony tor pomiarowy umożliwiał rejestrację siły z dokładnością do 0,3 N przy częstotliwości próbkowania wynoszącej 80 Hz. By wyeliminować wpływ siły bezwładności na opory przetaczania pojazdu, podczas analiz uwzględniano tylko fragment zarejestrowanego przebiegu czasowego siły dla stałej prędkości przetaczania. Dla tak wyselekcjonowanego fragmentu przebiegu czasowego wyznaczano średnią wartość siły oporu toczenia pojazdu.

Pomiary przeprowadzono według następującego planu:

- pomiar nacisku statycznego kół na podłoże wykonany na SCREEN-TEST-LINE 7000,
- ustawienie pojazdu na torze pomiarowym i montaż aparatury pomiarowej,
- kalibracja aparatury pomiarowej,
- rozbieg pojazdu,
- pomiar siły oporu przetaczania przy stałej prędkości (1 m/s),
- wybieg pojazdu,
- demontaż aparatury pomiarowej.

2. BADANIA EKSPERYMANTALNE

Badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z opracowaną metodyką w Katedrze Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn UWM w Olsztynie.

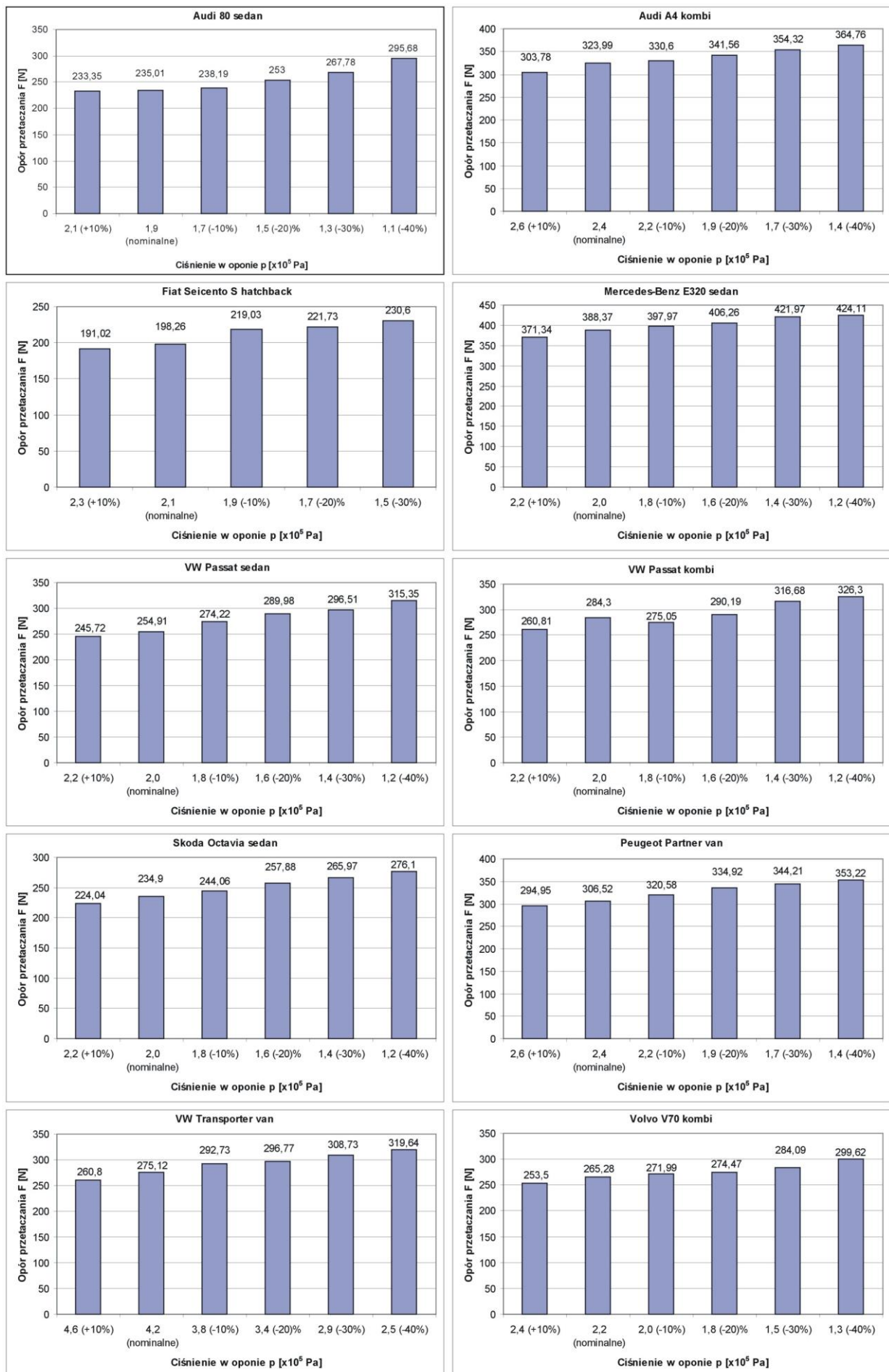
Na rysunku 2 przedstawiono widok czujnika siły FT-3507 zamontowanego do przetaczanego pojazdu.



Rys. 2. Czujnik siły FT-3507 zamontowany do przetaczanego pojazdu

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki zarejestrowane w kolejnych pomiarach wyeksportowano z rejestratora MG-TAE1-230 za pomocą karty pamięci typu SD, w plikach tekstowych. Następnie poddano je filtracji i przetwarzaniu. Na ich podstawie wygenerowano wykresy przedstawiając zależność oporów toczenia pojazdów od wartości ciśnienia w oponach pneumatycznych (rys. 3).



Rys. 3. Czujnik siły FT-3507 zamontowany do przetaczanego pojazdu
 Źródło: Opracowanie własne

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki uzyskane w czasie badań eksperymentalnych zostały wykorzystane do opracowania indywidualnych modeli matematycznych opisujących zależność oporów przetaczania pojazdu od ciśnienia w oponach (tabela 1).

Tab. 1. Równania opisujące zależność oporów przetaczania pojazdu od ciśnienia w oponach

Pojazd	Równanie
Audi 80 sedan	$F = -26,64352 \cdot p^3 + 207,17460 \cdot p^2 - 513,63595 \cdot p + 645,16738$ $R^2 = 0,996$
Audi A4 kombi	$F = -36,17447 \cdot p^3 + 202,24805 \cdot p^2 - 412,27270 \cdot p + 645,47746$ $R^2 = 0,987$
Fiat Seicento S hatchback	$F = 76,66667 \cdot p^3 - 463,44643 \cdot p^2 + 869,05476 \cdot p - 289,77539$ $R^2 = 0,96$
Mercedes-Benz E320 sedan	$F = 5,21991 \cdot p^3 - 48,94742 \cdot p^2 + 66,83307 \cdot p + 406,47111$ $R^2 = 0,985$
VW Passat sedan	$F = 7,04861 \cdot p^3 - 37,22917 \cdot p^2 - 5,77183 \cdot p + 362,37238$ $R^2 = 0,986$
VW Passat kombi	$F = -46,56250 \cdot p^3 + 270,33036 \cdot p^2 - 568,83929 \cdot p + 702,92143$ $R^2 = 0,912$
Skoda Octavia sedan	$F = 14,43287 \cdot p^3 - 77,14782 \cdot p^2 + 81,77844 \cdot p + 263,92984$ $R^2 = 0,997$
Peugeot Partner van	$F = 7,49264 \cdot p^3 - 63,12759 \cdot p^2 + 111,13061 \cdot p + 300,79120$ $R^2 = 0,999$
VW Transporter van	$F = -6,35382 \cdot p^3 + 62,76838 \cdot p^2 - 226,70339 \cdot p + 593,24731$ $R^2 = 0,991$
Volvo V70 kombi	$F = -87,44621 \cdot p^3 + 493,93192 \cdot p^2 - 945,25650 \cdot p + 885,79594$ $R^2 = 0,999$

W tabeli 2 przedstawiono zmierzone i wyznaczone w czasie analiz parametry powiązane z oporami przetaczania pojazdów.

Analizując dane przedstawione w tabeli 2 stwierdzono, że najniższy wzrost siły oporów toczenia pojazdu zaobserwowano w przypadku pojazdu Volvo V70 kombi, zaś najwyższy w przypadku Audi 80 sedan. Średni wzrost siły oporów toczenia pojazdów dla ciśnienia w oponie obniżonego o 40% wyniósł 43,87 N. Odnosząc wartość wzrostu oporów toczenia pojazdu do jego masy, najniższy względny przyrost odnotowano w przypadku pojazdu Mercedes-Benz E320 sedan i wyniósł on 9,2 %, najwyższy zaś, w przypadku Audi 80 sedan. Średni względny wzrost siły oporów toczenia pojazdów dla ciśnienia w oponie obniżonego o 40% wyniósł 16,42 %.

Wysoki wzrost oporów toczenia w przypadku Audi 80 sedan i VW Passat sedan jest spowodowany dużym tarciem wewnętrznym w oponach tych pojazdów, w przypadku obniżonego ciśnienia. Powoduje to dysypację energii na znacznie wyższym poziomie, niż ma to miejsce w przypadku pozostałych pojazdów. Zmniejszenie ciśnienia w oponie powoduje wzrost zmienności oporu przetaczania pojazdu (większa zmienność rejestrowanego przebiegu czasowego siły oporu). W przypadku pojazdu VW Transporter van odnotowano najniższą wartość jednostkowego oporu toczenia na poziomie 0,149 N/kg. Tak niska wartość tego parametru jest wywołana bardzo wysokim ciśnieniem pompowania opon w tym pojeździe, które było około 2 razy wyższe niż w przypadku pozostałych pojazdów.

PODSUMOWANIE

Zmiany ciśnienia w oponach eksploatowanych pojazdów są zjawiskiem naturalnym. W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu komfortu, a także bezpieczeństwa istotnym staje się monitorowanie ciśnienia pompowania kół. Zbyt wysoka wartość ciśnienia powoduje obniżenie komfortu podróżowania i pogorszenie przyczepności koła do podłoża. Zmniejszenie ciśnienia pompowania wywołuje zwiększenie oporów toczenia, co w konsekwencji wiąże się ze wzrostem nakładów eksploatacyjnych. Przeprowadzone analizy wykazały, że spadek ciśnienia w ogumieniu o 40% może spowodować wzrost wartości oporów toczenia średnio o 16,42 %. Pojazdy, w których odnotowano największy względny wzrost oporów przetaczania wyposażone były w ogumienie, które przy obniżonym ciśnieniu charakteryzowała duża dysypacja energii na skutek tarcia wewnętrznego.

Zapewnienie odpowiedniego ciśnienia pompowania kół w toku użytkowania pojazdu, z uwzględnieniem zmiennego obciążenia, spowodowałaby zmniejszenie ryzyka wypadku, a także obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Proponowane rozwiązania polegające na stosowaniu w pojazdach systemów monitorowania ciśnienia w oponach nie można uznać za idealne. W tym przypadku to kierowca decyduje czy skorygować ciśnienie w oponach. Dodatkowo zmiana obciążenia pojazdu powoduje potrzebę korekty ciśnienia zgodnie z zaleceniami producenta pojazdu. Tylko systemy automatycznie korygujące ciśnienie w ogumieniu można uznać za kompletne. Obecnie są one stosowane w pojazdach militarnych oraz wysokiej klasy maszynach rolniczych i budowlanych. W przyszłości można

Tab. 2. Zmierzone i wyznaczone parametry powiązane z oporami przetaczania pojazdów

Pojazd	Masa pojazdu	Ciśnienie nominalne (szerokość opony, wysokość profilu opony, średnica opony)	Opory nominalne (Opory jednostkowe*)	Przyrost oporów dla ciśnienia minimalnego (-40%)	Względny przyrost oporów dla ciśnienia minimalnego (-40%)
Audi 80 sedan	1120 kg	$1,9 \times 10^5$ Pa (0,185 m; 0,1295 m; 0,602 m)	235,01 N (0,209 N/kg)	60,67 N	25,81%
Audi A4 kombi	1670 kg	$2,4 \times 10^5$ Pa (0,205 m; 0,1332 m; 0,6729 m)	323,99 N (0,194 N/kg)	40,77 N	12,58%
Fiat Seicento S hatchback	995 kg	$2,1 \times 10^5$ Pa (0,145 m; 0,1015 m; 0,5332 m)	198,26 N (0,199 N/kg)	32,34 N (dla -30%)	16,31 % (dla -30%)
Mercedes-Benz E320 sedan	1740 kg	$2,0 \times 10^5$ Pa (0,225 m; 0,1237 m; 0,6539 m)	388,37 N (0,223 N/kg)	35,74 N	9,2 %
VW Passat sedan	1390 kg	$2,0 \times 10^5$ Pa (0,205 m; 0,1127 m; 0,6319 m)	254,91 N (0,183 N/kg)	60,44 N	23,71 %
VW Passat kombi	1460 kg	$2,0 \times 10^5$ Pa (0,225mm; 0,1012 m; 0,6343 m)	284,3 N (0,194 N/kg)	42 N	14,77 %
Skoda Octavia sedan	1255 kg	$2,0 \times 10^5$ Pa (0,175 m; 0,140 m; 0,6356 m)	244,06 N (0,187 N/kg)	41,2 N	17,53 %
Peugeot Partner van	1515 kg	$2,4 \times 10^5$ Pa (0,205mm; 0,1332 m; 0,6475 m)	306,52 N (0,202 N/kg)	46,7 N	15,23 %
VW Transporter van	1840 kg	$4,2 \times 10^5$ Pa (0,205 m; 0,1332 m; 0,6729 m)	272,12 N (0,149 N/kg)	44,52 N	16,18 %
Volvo V70 kombi	1585 kg	$2,2 \times 10^5$ Pa (0,205 - 0,215 m; 0,1127-0,1182 m; 0,6319-0,6429 m)	265,28 N (0,167 N/kg)	34,34 N	12,94 %

* - iloraz siły oporu toczenia pojazdu i jego masy.

się jednak spodziewać, że systemy automatycznego korygowania ciśnienia w oponach pojazdów staną się wyposażeniem standardowym.

Przeprowadzone analizy pozwoliły na stworzenie bazy wiedzy, która zostanie wykorzystana do budowy modeli dynamiki pojazdów. Badania symulacyjne z wykorzystaniem tychże modeli pozwolą w bezpieczny i wydajny sposób pozyskiwać wiedzę o zachowaniu pojazdów eksploatowanych w ekstremalnych warunkach.

BIBLIOGRAFIA

1. Chludziński M., *Wpływ ciśnienia w ogumieniu na tłumienie drgań przez układ zawieszenia*, Praca Magisterska, UWM WNT, Olsztyn 2013.
2. Jaworski J., *Ogumienie pojazdów samochodowych budowa i eksploatacja*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
3. Kozłowska B., *Postępowanie z odpadami gumowymi, głównie z zużytymi oponami*. Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka 2009.
4. Lozia Z., Guzek M., Pieniążek W., Zdanowicz P., *Metodyka i przykładowe wyniki badań symulacyjnych ruchu wieloosiowego pojazdu specjalnego w warunkach eksplozyjnego uszkodzenia opon*. ZESZYTY NAUKOWE INSTYTUTU POJAZDÓW 4(90)/2012, s. 19-42.
5. Michalski R., Szczyglak P., *Modelowanie podatności promieniowej kół pneumatycznych współpracujących ze sztywnym podłożem*. Technical Sciences, Supplement 1, Publisher UWM, Olsztyn 2004, s. 187-196.
6. Michalski R., Szczyglak P., *Model sterowania zużyciem paliwa w pojazdach*. Teka Komisji Motoryzacji, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, Zeszyty 33-34, s. 285-293.
7. Michalski R., Szczyglak P., *Controlling Vehicle Fuel Consumption in Urban Traffic*, Proceeding of the 12th international conference, Transport Means, Kaunas University of Technology, 23-24 october 2008, s. 13-15.
8. Powalka M., Buliński J., *Wpływ technicznych parametrów opon ciągnikowych i sztywności podłoża na wielkość powierzchni podparcia koła*, Inżynieria Rolnicza 4(64), 2005, s. 155-163.
9. Rykowski K., *Wpływ ciśnienia w ogumieniu na opory ruchu pojazdu*, Praca Magisterska, UWM WNT, Olsztyn 2013.
10. Szczyglak P., *Modeling the flexibility of pneumatic tired wheels moving on the soil surface*, Technical Sciences 9, Publisher UWM, Olsztyn 2006, s. 111-118.
11. Szczyglak P., *Analiza porównawcza metod wyznaczania podatności promieniowej koła pneumatycznego*. Inżynieria Systemów Bioagrotechnicznych, Zeszyt 6 (15), Płock 2007, s. 35-40.
12. Szczyglak P., *Testing of stability of a machine aggregate with a model of dynamics*. *Horizonty Doprawy* 5/2006, Żylin 2006, s. 42-44.
13. <http://www.michelin.pl/>

The influence of the pressure in the tires on the vehicle's wheels rolling resistance

A literature analysis to identify the variables affecting the rolling resistance of the car's tires has been carried out during works, also, phenomena occurring at the time of the tire usage with an incorrect pressure of the pumping. The experimental research methodology has been prepared. The aim of the research was to identify influence of the pressure in pneumatic wheels on the value of the rolling resistance of vehicle's tires. There was 10 randomly selected vehicles with different kinds of pneumatic wheels tested. The measurements were taken for the nominal pressure and pressure decreased by 10%, 20%, 30% and 40% and also for a pressure increased by 10%. The visualization of the results registered at the time of research has been created, and on those results' basis the equations have been generated describing the influences of pressure in pneumatic wheel on the rolling tire resistance. The analysis has shown that the changes in pressure of tires within the range in the research may cause changes in rolling tire resistance by up to 25%. The knowledge basis worked out in this way will be used to build digital car models.

Autorzy:

dr inż. **Piotr Szczyglak** – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, adres e-mail: szczypio@uwm.edu.pl

dr hab inż. **Jerzy Napiórkowski** prof. UWM – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, adres e-mail: napij@uwm.edu.pl

inż. **Kamil Rykowski**