

MnRoad Facility

Badania nawierzchni drogowych w amerykańskim stylu

Pomimo znacznego rozwoju technik modelowania matematycznego oraz badań laboratoryjnych nie jest obecnie możliwe wyeliminowanie badań nawierzchni drogowych i ich monitorowania w warunkach drogowych. Modelowanie matematyczne z natury rzeczy wymaga wprowadzenia pewnych, niekiedy bardzo istotnych, uproszczeń oraz dostarczenia zweryfikowanych danych wejściowych. Im bardziej zaawansowany jest model, tym więcej danych musi być do niego wprowadzonych. Uzyskiwanie danych wejściowych niezbędnych do aktywacji modelu może być zadaniem bardzo trudnym, bowiem badania laboratoryjne, na których zazwyczaj bazowane są wszelkie dane wejściowe, prowadzone są w wyidealizowanych warunkach, nie zawsze w pełni reprezentatywnych dla rzeczywistych warunków ruchu. W związku z powyższym konieczne jest prowadzenie badań weryfikacyjnych na drogach, na których odbywa się rzeczywisty ruch drogowy.

Badanie nawierzchni drogowych w warunkach rzeczywistych napotyka wiele problemów technicznych i organizacyjnych, szczególnie w przypadku rozwiązań przeznaczonych dla dróg o dużym natężeniu ruchu drogowego. Jednym z głównych problemów jest lokalizacja. Z uwagi na konieczność zapewnienia reprezentatywnego obciążenia ruchem drogowym odcinki powinny być lokalizowane na drogach o dużym natężeniu ruchu (autostrady i drogi ekspresowe), a to znacznie utrudnia wykonywanie nawierzchni, ewentualne jej naprawy i przede wszystkim prowadzenie okresowych badań z użyciem sprzętu mobilnego oraz stacjonarnego. Aby prowadzone badania były efektywne, pożądane jest, by odcinki badawcze (zazwyczaj od długości 100-300 m) były usytuowane jeden za drugim (to ułatwia wzajemne porównanie nawierzchni, gdyż warunki ich eksploatacji są identyczne) oraz aby możliwe było całkowite wyłączenie ich z ruchu na okres badań. Przy prowadzeniu badań z wykorzystaniem mobilnych urządzeń badawczych korzystne jest również, aby podczas badań możliwe były wykonywanie przejazdów w obie strony oraz zawracanie.



Rys. 1. Odcinek doświadczalny pokryty nawierzchnią poroelastyczną PERS-HET usytuowany na jednej z ulic w mieście Linköping, Szwecja



Rys. 2. Odcinki doświadczalne na opuszczonym lotnisku Spenberg w Niemczech wykorzystywane kilkanaście lat temu do badań hałasu opon



Rys. 3. Odcinki doświadczalne na wyłączonym z ruchu fragmencie drogi w miejscowości Kloosterzande, Holandia

Najczęściej spotykane podejścia

Jak wynika z powyższych rozważań, zbudowanie optymalnego odcinka doświadczalnego nie jest łatwe i zazwyczaj jest bardzo kosztowne. W wielu przypadkach aspekty praktyczne muszą ustąpić przed aspektami ekonomicznymi i odcinki testowe lokalizowane są na drogach o niezbyt dużym natężeniu ruchu, co ułatwia ich wykonanie. Przykładem takiego rozwiązania jest odcinek testowy w Linköpingu (Szwecja), na którym ułożono eksperymentalną nawierzchnię poroelastyczną PERS-HET (rys. 1). Oczwistą wadą takiego rozwiązania jest konieczność wprowadzania ograniczeń w ruchu drogowym podczas układania nawierzchni, jej badania oraz usuwania. Dodatkowym problemem jest to, że na drogach o małym natężeniu ruchu, szczególnie w terenie zabudowanym, prędkość pojazdów jest zazwyczaj niewielka oraz niewiele jest pojazdów ciężkich.

W celu uniknięcia problemów związanych z zakłócaniem ruchu drogowego w wielu krajach nawierzchnie testowe wykonywane są na opuszczonych lotniskach (np. Spenberg, Niemcy - rys. 2), wyłączonych z eksploatacji odcinkach dróg (Kloosterzande, Holandia - rys. 3) lub na torach doświadczalnych (IFST-TAR, Nantes, Francja - rys. 4). Takie rozwiązanie zapewnia dobre warunki do prowadzenia badań, ale nawierzchnie nie są poddane działaniu ruchu drogowego, przez co nie udaje się uzyskać wielu istotnych informacji.

Podejście amerykańskie

Zupełnie inne podejście do problemu zaprezentowali Amerykanie, budując ośrodek doświadczalny o nazwie MnRoad Facility,

należący do MnDOT. Ośrodek zlokalizowany jest w Monticello w stanie Minnesota i składa się z trzech niezależnych torów testowych (patrz rys. 5). Tor główny „Mainline” zlokalizowany jest na autostradzie Interstate I-94 i ma długość 4,34 km. Obejmuje on dwa pasy ruchu w kierunku zachodnim. Na pasach tych zlokalizowano 40 odcinków o długościach od 10 do 150 m, które rozdzielone są krótkimi odcinkami separującymi. Poszczególne odcinki różnią się zarówno pod względem nawierzchni, jak i podbudowy. W nawierzchniach i w podbudowie umieszczone są czujniki określające natężenie ruchu drogowego, nacisk osi pojazdów, temperaturę, odkształcenia, a nawet ciśnienie wody w porach podbudowy w przypadku jej namoknięcia. Podczas budowy torów doświadczalnych wbudowano ponad 5000 różnych czujników, które w trakcie eksploatacji były wymieniane oraz uzupełniane, gdy było to konieczne.

Najważniejszą różnicą, jaka występuje pomiędzy MnRoad Facility a innymi torami doświadczalnymi, jest jednak to, że równoległe do toru wybudowano dodatkową nitkę autostrady o dwóch pasach ruchu (by-pass), na którą przekierowywany jest ruch drogowy w okresach, w których odcinki testowe są budowane, przebudowywane albo gdy odbywają się na nich pomiary. Zamknięcia pasów doświadczalnych odbywają się w okresie od wiosny do późnej jesieni co kilka tygodni, ale nie powoduje to żadnych zakłóceń w ruchu drogowym. W celu usprawnienia przełączania ruchu na autostradzie znajdują się stałe elementy oznakowania wyposażone w tablice świetlne i światła wyłączające poszczególne pasy z ruchu.



Rys. 4. Badania oporu toczenia prowadzone na odcinkach testowych na torze doświadczalnym IFSTAR, Nantes, Francja

- Dzięki takiemu rozwiązaniu nawierzchnie poddawane są zużyciu wynikającemu z normalnego ruchu drogowego, ale jednocześnie zapewniona jest możliwość wykonywania pomiarów zarówno sprzętem stacjonarnym, jak i mobilnym. Dodatkowo, dzięki czujnikom zamontowanym w jezdni oraz stacjom meteorologicznym i kamerom, możliwe jest dokładne identyfikowanie struktury rodzajowej pojazdów, warunków atmosferycznych i ewentualnych sytuacji nadzwyczajnych.

W 2013 roku Równoważne Obciążenie Pojedynczej Osi (ESAL) określone dla nawierzchni podatnych wynosiło dla prawego pasa 683 751, a dla pasa lewego 191 488, podczas gdy równoważne obciążenie dla nawierzchni sztywnych wynosiło odpowiednio 1 032 696 i 286 612. Z uwagi na dużą popularność w USA nawierzchni sztywnych i półsztywnych w chwili obecnej ponad połowa odcinków testowych na torze głównym wykonana jest w tych technologiach.

Drugi tor testowy nazwany „Low Volume Road” (w dosłownym tłumaczeniu: droga o małym ruchu) jest torem zamkniętym o długości 4 km i dwóch pasach ruchu. W odróżnieniu od toru głównego tor ten obciążony jest jedynie ruchem w pełni kontrolowanym przez ośrodek badawczy MnRoad. Po torze porusza się od 1994 roku ciągnik siodłowy z naczepą, wykonując rocznie około 6-8 tysięcy przejazdów. Zestaw ma 5 osi i łączne obciążenie 80 000 funtów (36 t) przy przejazdach po pasie wewnętrznym lub 102 000 funtów (46 t) przy przejazdach po pasie zewnętrznym. Od początku 1994 roku do końca 2013 roku zestaw wykonał 130 142 przejazdy po torze wewnętrznym i 28 159 przejazdów po torze zewnętrznym. Z uwagi na konfigurację toru prędkość, z którą można wykonywać badania na torze LVR, jest bardzo uzależniona od dynamiki pojazdu. W przypadku zbudowanej na Politechnice Gdańskiej przyczepy R² Mk.2, służącej do badania oporu toczenia nawierzchni, możliwe było wykonywanie badań z maksymalną prędkością wynoszącą 80 km/h. Na torze

LVR zlokalizowanych jest 36 odcinków testowych, które – podobnie jak w przypadku toru głównego – różnią się nawierzchnią i podbudową.

Trzeci tor to tak zwany „Farm Loop”, czyli „wiejska pętla”. Na tym torze znajdują się tylko dwa odcinki testowe, które zbudowane są w technologiach stosowanych na farmach i lokalnych drogach w okolicy farm. Odcinki te wykorzystywane są do oceny wpływu maszyn rolniczych (ciągników, przyczep i kombajnów) na drogi wiejskie. Z obserwacji poczynionych przez autorów wynika, że tor ten wykorzystywany jest sporadycznie, a prowadzone na nim badania mają bardzo ograniczony zakres.

Badania MnRoad

Na torze MnRoad prowadzone są cykliczne pomiary wielu parametrów charakteryzujących stan nawierzchni drogowych na poszczególnych torach. Poniżej przedstawione są rutynowe badania prowadzone na poszczególnych torach:

- Badanie starzenia się nawierzchni – próbki rdzeniowe pobierane są raz w roku z nawierzchni asfaltowych i betonowych. Wszystkie nawierzchnie podlegają wizualnej ocenie stanu dwa razy w roku w ramach programu LTPP (*Long Term Pavement Performance*).
- Badania dynamiczne i kalibracja czujników obciążenia zamontowanych w nawierzchniach za pomocą przejazdów kontrolnych testowego samochodu ciężarowego oraz ugięciomierza dynamicznego (FWD) – 4 razy w roku.
- Badanie uskoków („progów”) występujących na szczelinach dylatacyjnych w nawierzchniach betonowych wykonywane za pomocą przyrządu typu Georgia Faultmeter – 2-3 razy w roku.
- Przyczepność (szorstkość) nawierzchni – testy wykonywane są 1-2 razy w roku z wykorzystaniem różnych metod pomiarowych.

- Badania nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym (FWD) – 8 razy w roku.
- Badanie kolein i pęknięć nawierzchni za pomocą laserowego systemu pomiarowego ALPS (*Advanced Laser Profile System*) – 3 razy w roku.
- Badanie hałasu opon metodą OBSI (*On Board Sound Intensity*) – 3 razy w roku. Metoda OBSI zbliżona jest do stosowanej w Europie metody CPX (*Close Proximity Method*), przy czym badanie opiera się na pomiarze intensywności dźwięku, a nie na pomiarze poziomów ciśnienia akustycznego.
- Badania piezometryczne poziomu wody gruntowej wykonywane 4 razy w roku.
- Badanie przepuszczalności wody przez nawierzchnie drenażowe (porowate) – 2-4 razy w roku.
- Komfort jazdy określany na podstawie pomiarów geometrycznych nawierzchni – 2-4 razy w roku.
- Współczynnik pochłaniania dźwięku – 3 razy w roku.
- Tekstura nawierzchni mierzona za pomocą metody piaskowej oraz urządzeniem Circular Texture Meter, które wykonuje pomiar za pomocą laserów poruszających się po okręgu.

W chwili obecnej na torze MnRoad znajdują się między innymi następujące nawierzchnie (w zestawieniu nie uwzględniono licznych wariantów podbudowy znajdującej się pod wymienionymi warstwami ścieralnymi):

- beton asfaltowy (Hot Mix Asphalt),
- cienki dywanik asfaltowy (Ultra Thin Bonded Wearing Course),
- beton Asfaltowy 12,5 mm typu SuperPave (nawierzchnia o podwyższonej trwałości),
- beton cementowy poprzecznie szcztokowany (w kilku wariantach),
- beton cementowy wzdłużnie rowkowany,
- beton cementowy wzdłużnie rowkowany i frezowany,
- beton cementowy wzdłużnie rowkowany i przeciągany jutą,
- beton cementowy wzdłużnie frezowany (w kilku wariantach),
- cienki dywanik betonowy powiązany z nawierzchnią asfaltową (*whitotopping*) poprzecznie przeciągany jutą,
- beton cementowy z odsłoniętym kruszywem,
- beton cementowy wzdłużnie szcztokowany,
- porowaty dywanik z betonu cementowego, wzdłużnie frezowany,
- nawierzchnia z płyt betonowych 1,8 x 1,8 m,
- beton asfaltowy SuperPave corocznie pokrywany emulsją asfaltową (Fog Seal),
- cementowy beton porowaty,
- asfaltowy beton porowaty (w kilku wykonaniach),
- powierzchniowe utrwalenie jednowarstwowe (Chip Seal),
- powierzchniowe utrwalenie dwuwarstwowe (Double Chip Seal).

Badania oporu toczenia prowadzone przez Politechnikę Gdańską na torach MnRoad Facility

Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej od 2010 roku współpracuje z naukowcami pracującymi w MnRoad Facility. W 2011 roku w oparciu o projekt sponsorowany przez DOT ekipa Politechniki pojechała do Minnesoty na pierwszą turę



Rys. 5. MnRoad Facility w stanie Minnesota, USA. Widok na tor doświadczalny Mainline – trzecia nitka autostrady, licząc od lewej strony, oraz na LVR – tor w kształcie spłaszczonego w środkowej części okręgu. Na rysunku widoczny jest również by-pass (druga nitka autostrady od strony lewej) wykorzystywany w okresach zamykania dla ruchu toru Mainline. Na rysunku nie jest widoczny tor Farm Loop, który jest zlokalizowany w dół od dolnej krawędzi zdjęcia. Zdjęcie wykorzystane za zgodą MnDOT



Rys. 6. Przyczepa do badania oporu toczenia R^2 w MnRoad Facility, 2011

badania drogowych oporu toczenia. Przyczepa doświadczalna R^2 (patrz rys. 6) została przetransportowana samolotem do Stanów Zjednoczonych, gdzie była wykorzystana do badania oporu toczenia trzech opon samochodowych na torach Mainline i LVR oraz na kilku odcinkach drogowych w stanie Minnesota. Oprócz badania oporu toczenia prowadzone były przez stronę amerykańską badania tekstury i hałasu. Wyniki pomiarów po ich opracowaniu zostały udostępnione w raporcie końcowym [1].

Druga seria badań przeprowadzona została w maju 2014 roku. Do badań tych została wykorzystana nowa przyczepa o nazwie R^2 Mk.2, która zbudowana została przez Politechnikę Gdańską ▶



Rys. 7. Przyczepa do badania oporu toczenia R² Mk. 2 wraz z ekipą pomiarową podczas badań w MnRoad Facility w 2014 roku

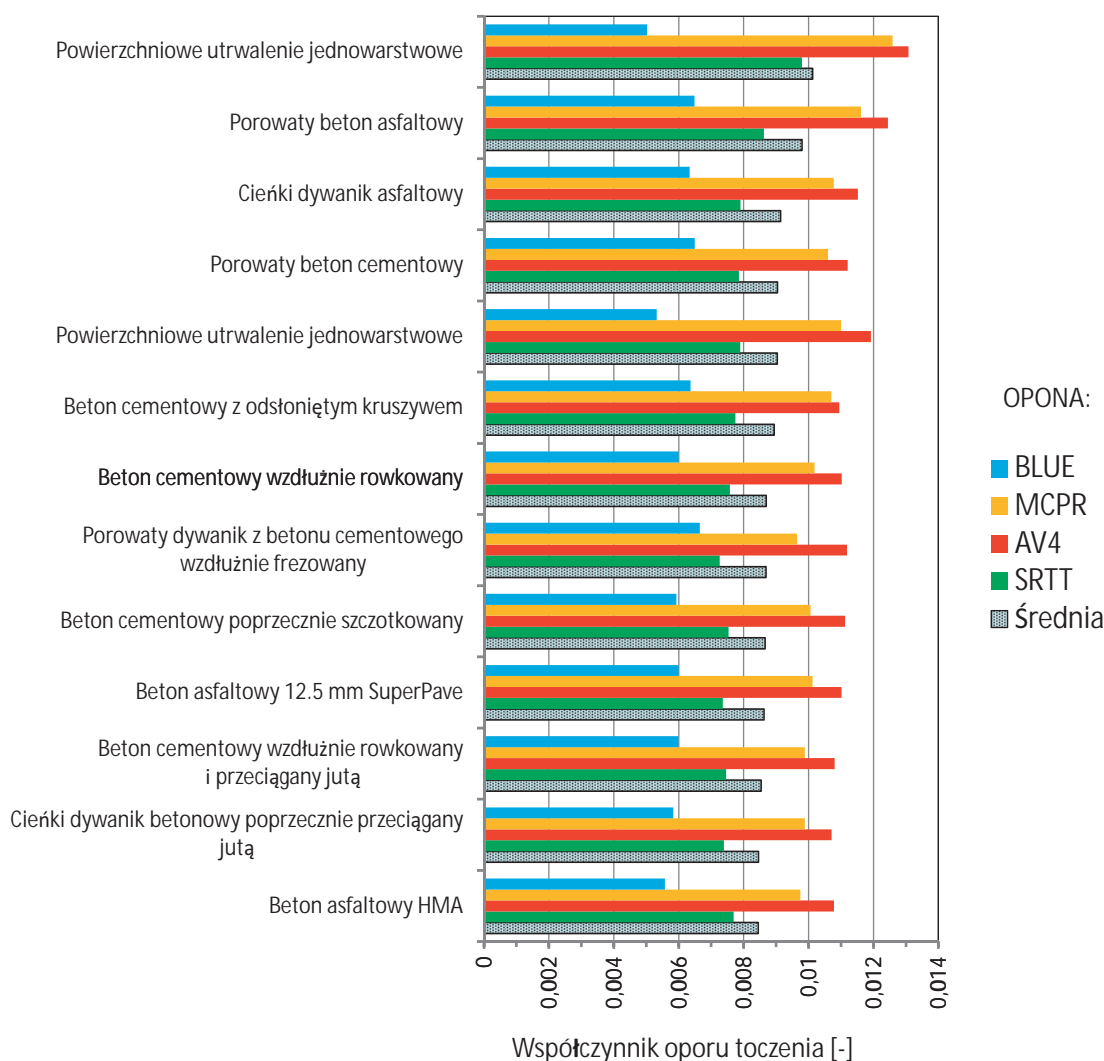
► w 2013 roku (rys. 7). Badania w USA były pierwszym poważnym sprawdzeniem nowego urządzenia, co oczywiście powodowało spore emocje, bo w przypadku poważniejszej awarii naprawa na terenie USA mogła być bardzo trudna, a nawet całkowicie niemożliwa. Na szczęście przyczepa nie sprawiała kłopotów, za wyjątkiem zasilania w energię elektryczną z samochodu ciągnącego, który dostarczyli Amerykanie. Samochód nie miał odpowiednio wzmocnionej instalacji elektrycznej i konieczne było ciągnięcie dodatkowych przewodów od alternatora do tylnego zderzaka.

Ponieważ nie ma żadnej normy dotyczącej drogowych badań oporu toczenia opon samochodowych, dla oceny nawierzchni drogowych konieczne było wybranie kilku opon o nieformalnym charakterze referencyjnym. Od kilku lat ośrodki wykonujące drogowe badania oporu toczenia prowadzą je z wykorzystaniem dwóch opon referencyjnych zgodnych z normą ISO/DIS 11819-2 dotyczącą badania hałasu opon metodą CPX. Dzięki temu nie ma konieczności pozyskiwania dodatkowych opon referencyjnych. Opony wymagane obecnie przez normę ISO/DIS 11819-2 to: Standard Road Reference Tyre UNIROYAL TIGER PAW P225/60R16 97S M+S (SRTT) oraz AVON SUPERVAN AV4 195R14C 106/104N (AV4). W opinii zespołu naukowego Politechniki Gdańskiej opony te nie do końca reprezentują opony wykorzystywane w Europie. Opona SRTT jest oponą wielosezonową (uniwersalną), a opona AV4 jest oponą zimową produkowaną głównie na rynek w Islandii. W zestawie brak więc jest opony letniej o rozmiarze typowym dla rynku europejskiego. W związku

z tym Politechnika Gdańska prowadzi dodatkowo badania oporu toczenia z wykorzystaniem opony MICHELIN PRIMACY HP 225/60R16 98V (MCPR).

W czasie badań prowadzonych w USA w 2014 roku do opon referencyjnych stosowanych przez Politechnikę Gdańską dodana została dodatkowo opona przeznaczona do samochodów elektrycznych CONTINENTAL Conti.eContact BLUECO, 195/50R18 90T (BLUE) w celu określenia jej własności na różnych typach nawierzchni. Na rys. 8 przedstawione są współczynniki oporu toczenia uzyskane przy prędkości 80 km/h dla badanych na torze MnRoad opon i wybranych nawierzchni. Jak wynika z rysunku, współczynnik oporu toczenia uśredniony dla czterech badanych opon wynosi od 0,00845 (dla betonu asfaltowego HMA) do 0,0101 (dla jednowarstwowego powierzchniowego utrwalenia). Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi dla poszczególnych opon są jeszcze większe, gdyż przykładowo dla nawierzchni typu beton asfaltowy 12,5 mm „SuperPave” współczynnik oporu toczenia dla opony AV4 wynosi 0,0110, a dla opony BLUE – jedynie 0,0073, czyli jest o około 35% mniejszy. Taka różnica współczynnika oporu toczenia może dla jazdy ze stałą średnią prędkością powodować około 10-proc. zmniejszenie zużycia energii [3].

Jeszcze większe różnice występują przy porównaniu najgorszej kombinacji opony i nawierzchni z kombinacją najlepszą. Na jednowarstwowym powierzchniowym utrwaleniu opona AV4 wykazuje współczynnik oporu toczenia wynoszący 0,01308, podczas gdy na betonie cementowym wzdłużnie



Rys. 8. Współczynniki oporu toczenia uzyskane przy prędkości 80 km/h dla badanych na torze MnRoad opon i wybranych nawierzchni

przeciąganym jutą (nawierzchnia ta nie jest uwzględniona na rys. 8) opona BLUE wykazuje współczynnik oporu toczenia wynoszący jedynie 0,0046. W tym przypadku opór toczenia opony BLUE jest o 66% mniejszy od oporu toczenia opony AV4, co może spowodować zmniejszenie zużycia energii nawet do 20%.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, nawet przy zastosowaniu istniejących i sprawdzonych już typów nawierzchni drogowych oraz opon znajdujących się na rynku można uzyskać stosunkowo duże oszczędności w zużyciu energii przez pojazdy samochodowe, o ile wybrane zostaną odpowiednie kombinacje opon i nawierzchni. Bez wątpienia istnieje nadal duży potencjał w zakresie konstruowania opon i nawierzchni o jeszcze mniejszych stratach energetycznych.

W opinii autorów ośrodek MnRoad Facility jest idealnym miejscem do testowania opon i nawierzchni drogowych, gdyż spełnia dwa trudne do pogodzenia warunki: zapewnia realistyczne warunki eksploatacji nawierzchni oraz umożliwia łatwe prowadzenie prac związanych z budową, modernizacją i badaniami odcinków doświadczalnych bez wprowadzania uciążliwości dla użytkowników autostrady.

Podziękowania

Prace opisane w niniejszym artykule prowadzone były w ramach umowy z Minnesota State University oraz w ramach projektów RolRes (umowa PBS1/A6/1/2012) i Leo (Polsko-Norweski Program CORE2013, Nr 87/2013) finansowanych przez NCBiR. Autorzy dziękują również kierownictwu MnRoad Facility za zgodę na opublikowanie wybranych wyników badań, informacji o tym ośrodku badawczym i dostarczenie zdjęcia lotniczego ośrodka.

Piśmiennictwo

1. Ejsmont J., Ronowski G., Wilde W.J.: *Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, MN/RC 2012-07*. Minnesota Department of Transportation, Research Services Section, 395 John Ireland Boulevard, MS 330, St. Paul, Minnesota 55155-1899, 2012, <http://www.lrrb.org/pdf/201207.pdf>.
2. Ejsmont J., Świczko-Żurek B., Ronowski G., Wilde W.J.: *Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Round 2*. Minnesota Department of Transportation, Research Services Section, 395 John Ireland Boulevard, MS 330, St. Paul, Minnesota 55155-1899, 2014 (w opracowaniu).
3. Ejsmont J., Świczko-Żurek B., Ronowski G.: *Opór toczenia opon samochodowych*. „Magazyn Autostrady”, 7/2014.