

Mechanizmy generowania hałasu opon

JERZY A. EJSMONT

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

Referat prezentuje podstawowe informacje dotyczące mechanizmów generowania hałasu podczas współpracy opony pneumatycznej z nawierzchnią jezdni. Porusza również zagadnienia związane z możliwością wpływania na te mechanizmy, w celu zmniejszenia hałasu emitowanego do otoczenia. Omówione są następujące mechanizmy generowania hałasu: promieniowe i styczne drgania elementów bieżnika, drgania ścianek bocznych i pasa bieżnika, slip-stick, przywieranie gumy do nawierzchni, rezonans powietrza zamkniętego w oponie, przepompowywanie powietrza, rezonans Helmholtza i drgania powietrza w rowkach bieżnika.

1. Wstęp

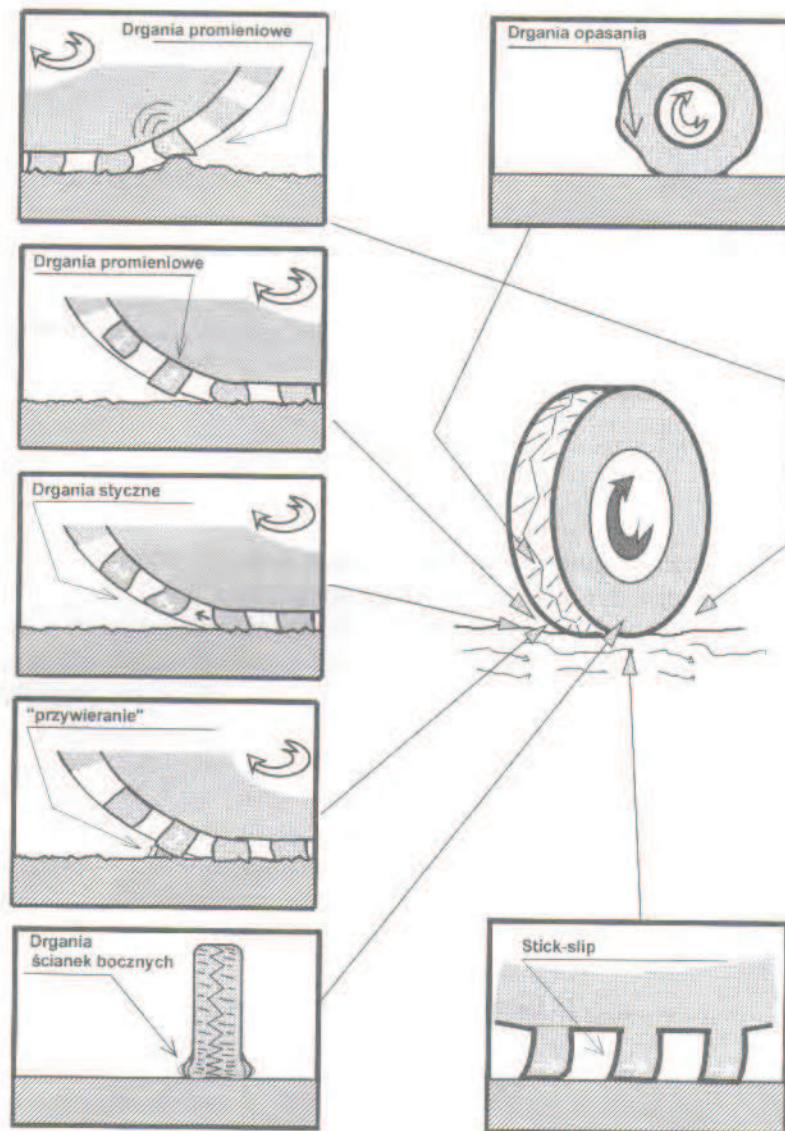
W wyniku znacznego zmniejszenia hałaśliwości zespołów napędowych współczesnych pojazdów samochodowych, jedyną drogą zmierzającą do dalszego zmniejszenia hałasu całkowitego tych pojazdów jest znaczne ograniczenie hałasu generowanego przez opony współpracujące z nawierzchnią jezdni, który w dalszej części nazywany będzie *hałasem opon*. Zgodnie z wynikami najnowszych badań [11] można przyjąć, że hałas opon zaczyna dominować w stosunku do innych hałasów związanych z ruchem pojazdów przy jeździe ze stałą prędkością wynoszącą ponad 15–25 km/h dla samochodów osobowych i 30–35 km/h dla samochodów ciężarowych. W przypadku silnego przyspieszania prędkości te ulegają podwyższeniu do odpowiednio ok. 30–45 km/h i 45–50 km/h. Można więc powiedzieć, że praktycznie jedynym sposobem zmniejszenia hałasu generowanego przy wyższych prędkościach jest ograniczenie hałasu opon.

2. Generowanie hałasu opon

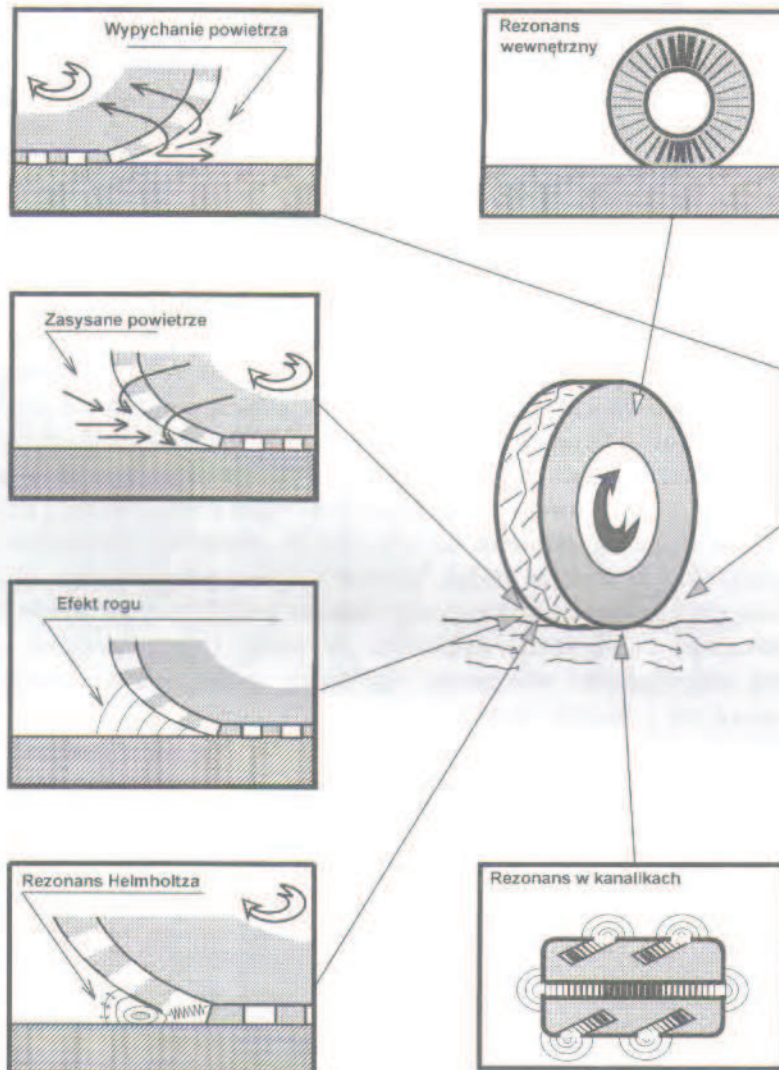
Dla zmniejszenia hałasu opon samochodowych konieczna jest znajomość mechanizmów powodujących hałas podczas współpracy opony z nawierzchnią jezdni. Należy przy tym zdawać sobie sprawę z tego, że poszczególne zmiany w konstrukcji opon lub nawierzchni mogą jednocześnie oddziaływać na kilka mechanizmów i że wpływy te mogą być przeciwstawne.

Mechanizmy generowania hałasu opon mogą być podzielone na dwie grupy. Jedną grupę stanowią mechanizmy bezpośrednio związane z drganiami elementów opony (rys. 1), a drugą grupę stanowią mechanizmy powiązane ze zjawiskami aerodynamicznymi (rys. 2).

Nie jest możliwe jednoznaczne uszeregowanie stopnia ważności poszczególnych mechanizmów w procesie generowania hałasu opon. Udział tych mechanizmów zależy bowiem od wielu czynników, z których najważniejsze to: budowa opony i nawierzchni,



Rys. 1. Mechanizmy generowania hałasu opon związane z drganiami mechanicznymi.
Fig. 1. Tyre/road noise generating mechanisms in connection with mechanical vibrations



Rys. 2. Aerodynamiczne mechanizmy generowania hałasu opon.
 Fig. 2. Aerodynamics mechanisms as a source of tyre/road noise

parametry eksploatacyjne oraz warunki środowiskowe. Dalsze rozdziały poświęcone będą poszczególnym mechanizmom oraz możliwościom wpływu na nie poprzez zmiany w budowie opon i nawierzchni. W tym miejscu należy podkreślić, że uciążliwość hałasu komunikacyjnego zależy nie tylko od charakterystyk źródeł hałasu, ale również od warunków propagacji hałasu pomiędzy źródłami a receptorami. Problemy propagacji wykraczają jednak poza ramy niniejszego referatu.

3. Promieniowe i styczne drgania elementów bieżnika

Drgania promieniowe elementów bieżnika mogą być wzbudzone na dwa sposoby. Jednym z nich są uderzenia elementów gumowych („klocków”) o nawierzchnię podczas wchodzenia w styk z nawierzchnią, a następnie gwałtownego „podrywania” ich przy wychodzeniu ze styku. Drugi sposób pobudzenia polega na uderzaniu nierówności nawierzchni drogowych o gumę bieżnika. Praktycznie dla każdej opony i nawierzchni obydwie rodzaje pobudzeń występują jednocześnie, ich wzajemna intensywność może jednak znacznie się różnić.

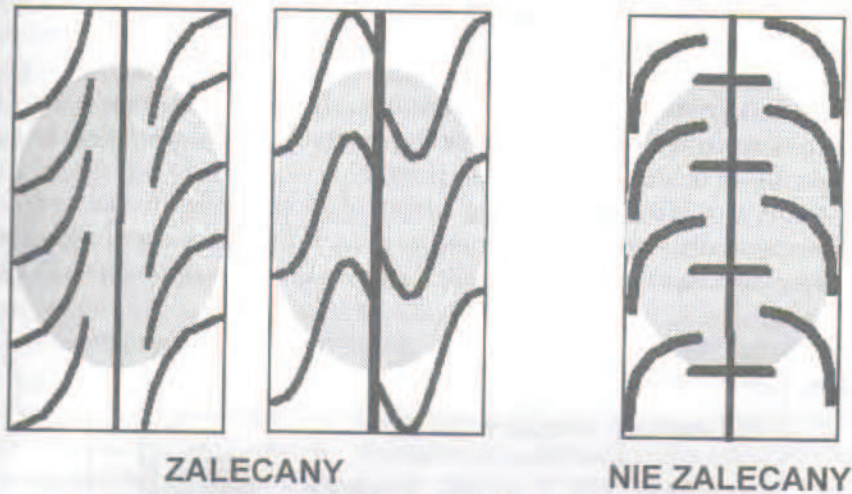
Wzajemne uderzenia elementów bieżnika i nierówności nawierzchni nie są w stanie wytłumaczyć wielu obserwacji poczynionych przy badaniu hałasu opon. Jest sprawą oczywistą, że przy mechanizmie uderzeniowym, częstotliwość generowanego hałasu powinna być związana z prędkością jazdy oraz odległością pomiędzy poszczególnymi klockami bieżnika lub nierównościami nawierzchni. W szczególnym przypadku, przy równomiernym układzie klocków lub przy teksturze nawierzchni o stałej podziałce, należy spodziewać się generowania hałasu o częstotliwości $f = v/\lambda$ gdzie v jest prędkością jazdy a λ jest długością elementu bieżnika lub długością fali nierówności nawierzchni. W, uzyskiwanych podczas badań, widmach hałasu generowanego przez opony jedynie nieznaczna część energii akustycznej daje się jednak przyporządkować częstotliwości wynikającej z powyższej zależności. W tabeli 1 przedstawione są typowe częstotliwości odpowiadające uderzeniom elementów opony o nawierzchnię i nierównościami nawierzchni o bieżnik opony.

Tabela 1. Typowe częstotliwości wymuszeń.
Table 1. Typical excitation frequencies

λ [mm]		Prędkość [km/h]				
		30	50	70	90	110
Uderzenia „klocków” opon do samochodów osobowych						
20–40	Częstotliwość uderzeń [Hz]	210–420	350–700	490–970	625–1250	770–1540
30	Częstotliwość uderzeń [Hz]	275	465	650	830	1025
Uderzenia „klocków” opon do samochodów ciężarowych						
45–65	Częstotliwość uderzeń [Hz]	130–185	215–310	300–430	380–560	470–680
55	Częstotliwość uderzeń [Hz]	150	250	350	450	550
Uderzenia nierówności nawierzchni						
8–20	Częstotliwość uderzeń [Hz]	420–1040	700–1740	970–2430	1250–3125	1540–3825
14	Częstotliwość uderzeń [Hz]	600	990	1390	1790	2180

Zmniejszenie hałaśliwości opon, poprzez wpływ na mechanizm związany z drganiami promieniowymi, może być uzyskane zarówno przez zmniejszenie amplitudy wymuszeń jak również przez zmianę charakterystyk częstotliwościowych (widm dźwięku).

Zmniejszenie amplitudy wymuszeń może być uzyskane poprzez zmiany kształtu elementów bieżnika, powodujące bardziej „łagodne” wchodzenie ich w kontakt z nawierzchnią. W praktyce oznacza to zmniejszenie ilości rowków poprzecznych i/lub ukształtowanie tych rowków w taki sposób, aby ich przebieg nie pokrywał się z przebiegiem krawędzi śladu styku opony z jezdnią. Zasada ta zobrazowana jest na rys. 3. Na rysunku 4 przedstawione są trzy komercyjne wzory bieżnika, w których zasada ta jest dobrze widoczna. Dla uwypuklenia opisywanej zasady, ślady styku zostały przedstawione w postaci elips zamiast prostokątów z zaokrąglonymi narożami.



Rys. 3. Zalecane i nie zalecane układy rowków bieżnika.

Fig. 3. Recommended and unrecommended thread patterns

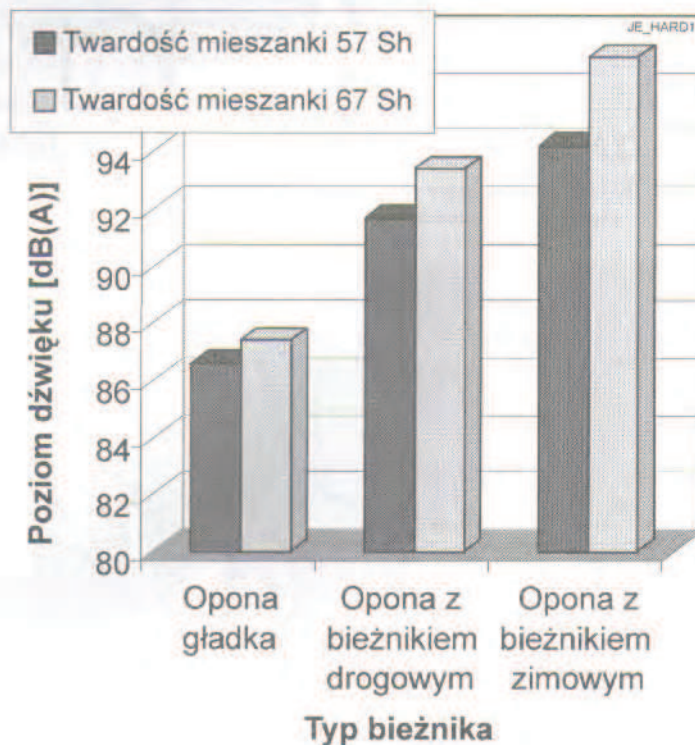


Rys. 4. Komercyjne wzory bieżników, w których przebieg rowków nie pokrywa się z krawędzią śladu styku opony z jezdnią.

Fig. 4. Commercial thread patterns, where the pattern is not in accordance with the edge of contact surface on the road

Zmiana sztywności elementów bieżnika (np. przez wprowadzenie „mostków” pomiędzy blokami, lokalne zmniejszanie głębokości rowków lub zmiany w mieszance gumowej) może również wpłynąć w znaczący sposób na amplitudę wymuszeń i w konsekwencji amplitudę drgań elementów. Należy jednak podkreślić, że usztywniające oddziaływanie „mostków” wpływa zupełnie inaczej na generowanie hałasu niż usztywnienie opony przez zastosowanie twardszej mieszanki gumowej. Twardsza mieszanka zwiększa wymuszenia, co prowadzi do zwiększenia hałasu (szczególnie w paśmie wyższych częstotliwości). Na rysunku 5 przedstawiony jest przykładowy wpływ twardości mieszanki gumowej dla trzech typów bieżnika opony. „Mostki” natomiast (pomimo usztywnienia bieżnika) wpływają głównie na „wygładzenie” wymuszeń, które przebiegają bardziej łagodnie, co powoduje zmniejszenie hałasu. Mostki zapobiegają gwałtownym zmianom sztywności związanym z przejściem rowka bieżnika przez krawędź śladu styku opony z nawierzchnią i jednocześnie, łącząc poszczególne elementy, zmniejszają ich swobodę drgań, co dodatkowo ogranicza hałas.

Zewnętrzna powierzchnia opony ma kształt zdeformowanego torusa, przez co jest nierozwijalna w sensie geometrycznym. Oznacza to, że w dolnej części muszą powstać znaczne naprężenia styczne i odkształcenia umożliwiające uzyskanie płaskiej powierz-



Rys. 5. Wpływ twardości mieszanki bieżnika na hałas opon; Prędkość 70 km/h, nawierzchnia z betonu asfaltowego.

Rig. 5. The influence of tread material composition on tyre/road noise. Velocity 70 km/h, surface made from tarmac concrete

czni styku opony z jezdnią. Dodatkowo naprężenia styczne powstają, gdy na koła samochodowe oddziałują siły wzdłużne lub poprzeczne. Podczas odkształcania elementy bieżnika opony, opasania i ścianek bocznych akumulują energię potencjalną, która następnie jest w dużej części odzyskiwana po wyjściu ze styku z nawierzchnią. Niestety część energii jest rozpraszana w postaci ciepła (co wiąże się z powstawaniem oporu toczenia), a kolejna część przetwarzana jest na energię kinetyczną (element bieżnika pod wpływem naprężeń zostaje „wyrzucony” ze styku z nawierzchnią). Ruch elementu z tym związany rozpoczyna drgania styczne elementów bieżnika, szczególnie w rejonie wyjścia opony ze styku z nawierzchnią jezdni.

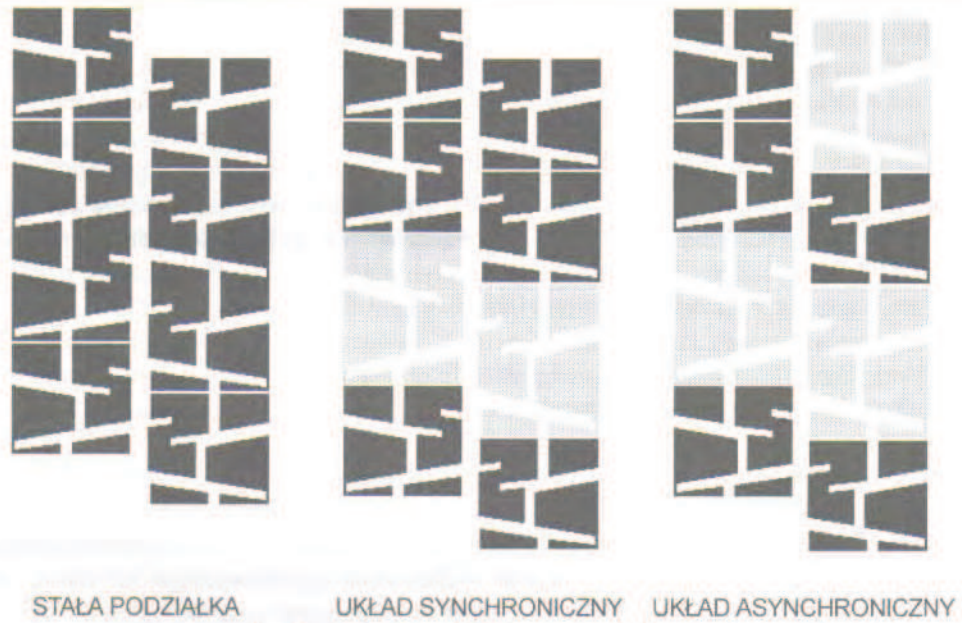
Zmniejszenie drgań stycznych może być uzyskane poprzez modyfikację zarysu bieżnika w kierunku większej „rozwijalności” oraz poprzez ograniczenie możliwości swobodnych drgań stycznych elementów bieżnika. Szczególnie dobre efekty mogą być uzyskane poprzez wprowadzenie systemu lamelek, które zmniejszają możliwość kumulowania energii w bloku bieżnika, a po zainicjowaniu drgań mogą pomagać w ich tłumieniu.

Dla osób narażonych na hałas opon, szczególne znaczenie ma subiektywne uczucie głośności, związane z charakterystykami widmowymi generowanego dźwięku. Jak wiadomo, człowiek preferuje dźwięki o charakterze szumów (szerokie pasmo częstotliwości), a reaguje pobudzeniem na dźwięki mono-harmoniczne (w których większość energii zawiera się w wąskim paśmie częstotliwości). Oznacza to, że zmniejszenie subiektywnej głośności hałasu opon może być osiągnięte poprzez „rozmycie” widma dźwięku i wyeliminowanie „pików” powiązanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla podziałki bieżnika. Zabieg taki nazywany jest *randomizacją* i polega na wprowadzeniu na obwodzie bieżnika elementów o różnej długości obwodowej, które są rozmieszczone w przypadkowy sposób.

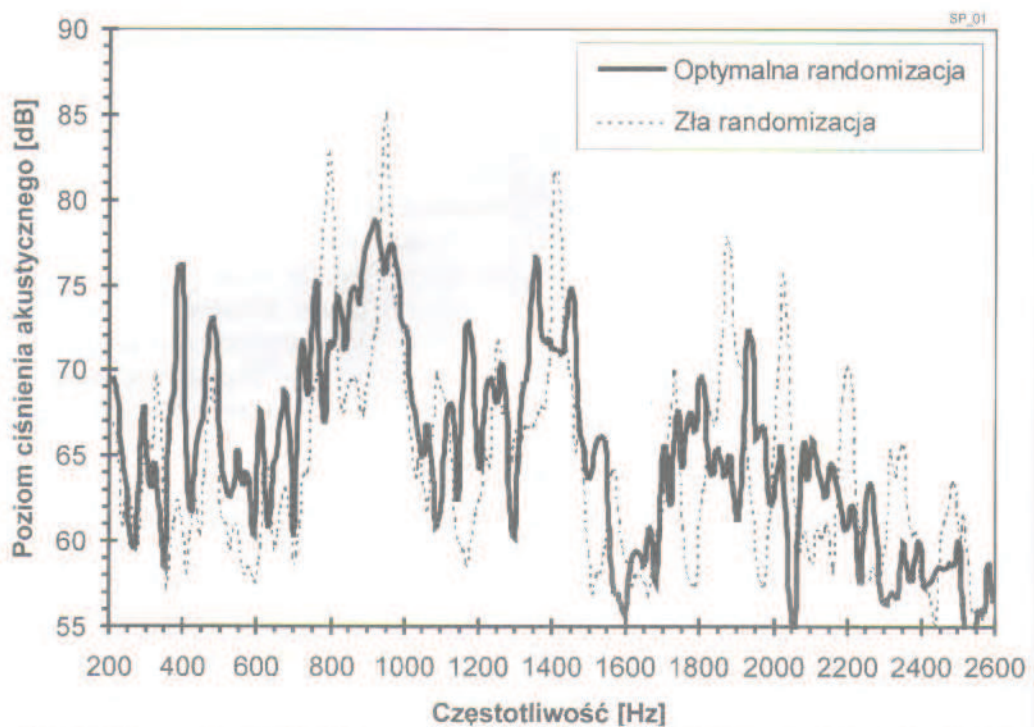
Na rysunku 6 przedstawione są trzy przykładowe bieżniki opon. Pierwszy posiada stałą podziałkę bieżnika, drugi ma podziałkę zmienną na obwodzie, lecz identyczną po obu stronach bieżnika, a trzeci charakteryzuje się różną zmiennością po obu stronach opony. Trzecie rozwiązanie (opatentowane przez autora) jest dla wielu wzorów bieżnika optymalne pod względem charakterystyki generowanego hałasu. Rysunek 7 przedstawia widma dźwięku uzyskane dla opon o prawidłowej i nieprawidłowej randomizacji bieżnika. Opracowanie prawidłowej randomizacji możliwe jest poprzez prowadzenie symulacji komputerowej np. za pomocą programu CONSEG opracowanego przez autora.

Podobny wpływ na widmo dźwięku jaki ma bieżnik opony ma również tekstura nawierzchni. Nawierzchnie nie powinny mieć powtarzalnych elementów tekstury, które powodują rytmiczne uderzenia o bieżnik. Z tego powodu zaprzestano stosowania poprzecznego żłobienia nawierzchni wykonanych z betonu cementowego (patrz rys. 8).

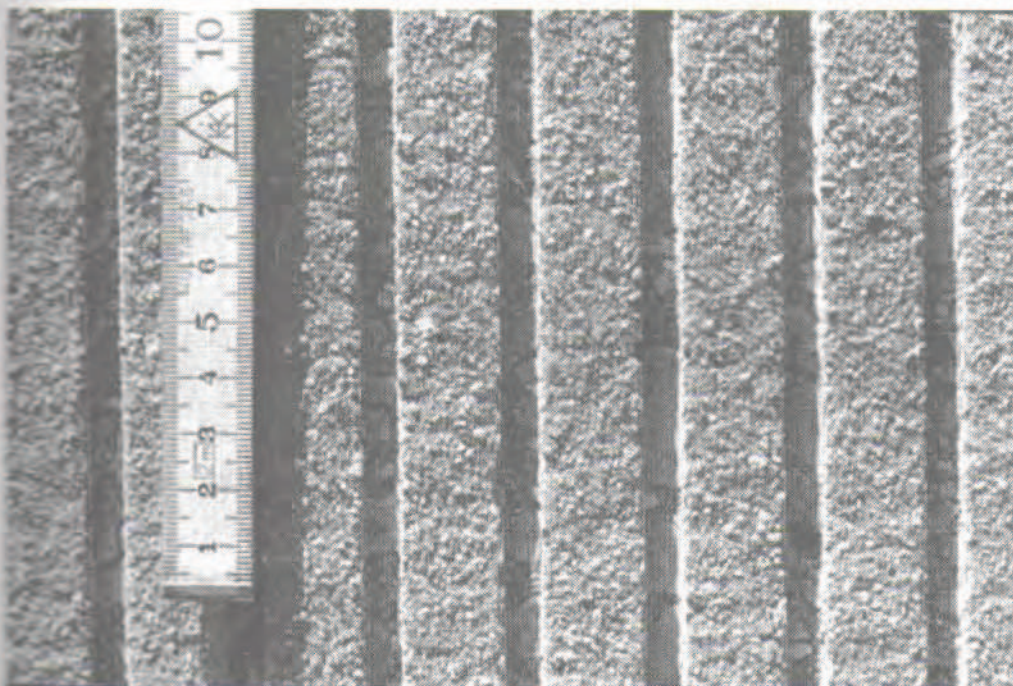
Zmniejszenie drgań elementów bieżnika, co wiąże się ze zmniejszeniem generowanego hałasu, może być również uzyskane poprzez zastosowanie elastycznej nawierzchni drogowej. Od kilkunastu lat trwają intensywne prace (głównie w Szwecji i Japonii) nad stworzeniem poroelastycznych nawierzchni drogowych. Pierwsze wyniki wskazują na możliwość zmniejszenia hałasu na takich nawierzchniach nawet o około 10 dB(A).



Rys. 6. Trzy typowe układy segmentów bieżnika.
Fig. 6. Three typical thread segments system



Rys. 7. Wpływ randomizacji bieżnika na widmo hałasu. Prędkość 70 km/h, nawierzchnia „Safety Walk”
Fig. 7. The influence of randomized thread on noise spectrum. Velocity 70 km/h, surface “safety walk”



Rys. 8. Poprzecznie żłobkowany beton cementowy powodujący znaczny wzrost hałasu opon.

Fig. 8. Transversally cuted concreet giving great increase of tyre/road noise

4. Drgania ścianek bocznych

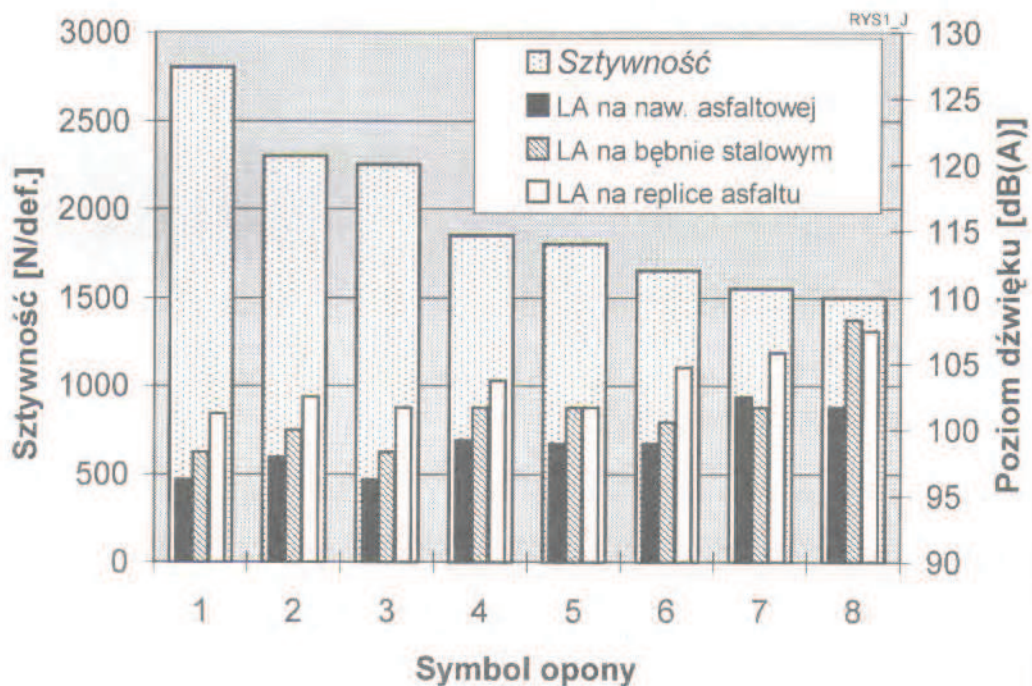
Drgania ścianek bocznych są w opinii większości badaczy stosunkowo mało istotnym źródłem hałasu opon. Nie ma jednak jednoznacznej opinii na ten temat. Eberhardt [3] na podstawie licznych badań doszedł do wniosku, że ścianki boczne przenoszą jedynie drgania wygenerowane w rejonie bieżnika i że nie ma to większego znaczenia dla hałasu całkowitego emitowanego przez oponę. W jego opinii przenoszenie to zanika dla częstotliwości powyżej 800 Hz. Z drugiej strony Donovan i Oswald [2], którzy prowadzili badania metodami intensywnościowymi dla opon o bieżniku zebrowym, uznali, że drgania ścianek bocznych są głównym mechanizmem odpowiedzialnym za hałas w paśmie 500 do 1000 Hz. Autor uważa, że hałas pochodzący od ścianek bocznych nie jest istotny dla typowych opon radialnych.

5. Drgania opasania i karkasu opony

Jak już wspomniano powyżej, uderzenia klocków opony o nawierzchnię nie mogą powodować wysokich poziomów hałasu opon dla częstotliwości około 1000 Hz, które to poziomy są dominujące dla większości opon i co najważniejsze ich częstotliwość jest niezależna od prędkości. Wiele prac badawczych [2, 4, 10] wskazuje, że hałas o częstot-

liwości około 1 kHz jest generowany nie tylko przez elementy bieżnika lub zjawiska związane z drganiem powietrza w rowkach, ale że spowodowany jest on przez drgania pasa bieżnika i karkasu.

Badania wskazują na duży wpływ sztywności opasania na charakterystyki hałasu generowanego przez opony. Rysunek 9 przedstawia wyniki testów przeprowadzonych na Politechnice Gdańskiej, w których badano 8 opon o identycznym bieżniku, lecz diametralnie innych opasaniach. Wyraźnie widoczny jest wpływ sztywności opasania na hałas, zarówno na bardzo gładkiej nawierzchni „Safety Walk”, jak i na nawierzchni stanowiącej replikę betonu asfaltowego. Na potrzeby tego eksperymentu została opracowana specjalna metoda określania sztywności opasania, która omówiona jest w [11].



Rys. 9. Wpływ sztywności opasania na hałas opon. Prędkość 100 km/h.
Fig. 9. The influence of banding tape on tyre/road noise. Velocity 100 km/h

6. Stick-slip

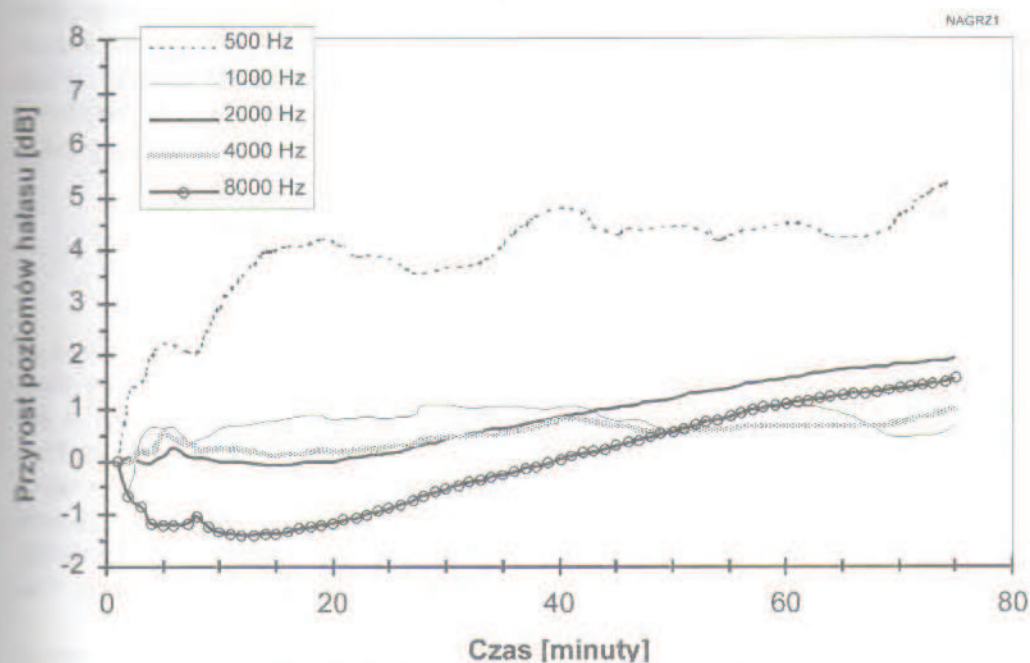
Zjawisko stick-slip zachodzi jedynie wtedy, gdy charakterystyka współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu dla współpracujących ze sobą materiałów wykazuje ujemny gradient. Zjawisko to występuje dopiero po przekroczeniu prędkości poślizgu dla której tarcie jest największe.

Stick-slip uznany jest za istotny mechanizm generowania hałasu opon tylko dla sytuacji, w których występują znaczne siły styczne na styku opony z jezdnią (jazda po zakrętach, przyspieszanie, hamowanie). Zmniejszenie hałasu związanego ze zjawiskiem

stick-slip, może być uzyskane poprzez zastosowanie mieszanek gumowych o dużej przyczepności, szczególnie przy dużych prędkościach poślizgu. Jest to zresztą bardzo korzystne również dla bezpieczeństwa jazdy. Trzeba sobie jednak zdawać sprawę, że ograniczenie przesunięć bieżnika po nawierzchni oznacza brak możliwości „rozładowywania” nagromadzonej energii w napiętych klockach bieżnika. To zaś może powodować wzrost drgań stycznych przy opuszczaniu przez klocek rejonu styku z nawierzchnią. Zjawisko takie było już opisane w literaturze, patrz [1].

7. Mechanizm adhezyjny

Jeśli powierzchnia bieżnika opony staje się kleista (np. gdy opona zimowa eksloatowana jest w bardzo wysokich temperaturach), a nawierzchnia jezdni jest bardzo czysta, to może występować silne przyklejanie się elementów bieżnika do nawierzchni. Prowadzi to do zwiększenia wymuszeń przy odrywaniu elementów bieżnika od nawierzchni w rejonie krawędzi wyjścia ze styku. W konsekwencji może nastąpić podwyższenie hałasu o wysokiej częstotliwości. Jednocześnie może nastąpić znaczny wzrost oporu toczenia opony. Rysunek 10 ukazuje zmiany poziomu hałasu dla kilku pasm częstotliwości, jako funkcji czasu upływającego od chwili rozpoczęcia badań na bębnie pokrytym bardzo czystą i gładką nawierzchnią. Wyniki uzyskane zostały dla opony zimowej toczonyj z prędkością 80 km/h po nawierzchni „Safety Walk”. Poziomy uzyskane na początku pomiarów zostały potraktowane jako poziomy odniesienia.



Rys. 10. Wpływ czasu nagrzewania opony na hałas.
Fig. 10. The influence of tyre heating time on tyre/road noise

Wyraźny przyrost poziomów dla częstotliwości 500 Hz może stanowić potwierdzenie powyższej hipotezy, gdyż częstotliwość 500 Hz odpowiada dla badanej opony częstotliwości związanej ze średnią podziałką bieżnika. Można więc domniemywać, że odrywanie przyklejonych elementów stanowi swoiste impulsowe wymuszenie, działające w rytm przechodzenia klocków przez krawędź śladu styku opony z jezdnią.

W opinii autora wpływ zjawiska przywierania klocków do nawierzchni jest obecnie niedoceniony. Jeśli nawet w warunkach normalnego ruchu drogowego nawierzchnie jezdni nie są tak czyste, aby zjawisko przyklejania miało większe znaczenie, to w czasie badań laboratoryjnych, gdy opona toczy się po czystym bębnie, w którego powierzchnię wcierają się cząsteczki gumy mechanizm ten może być bardzo istotny.

8. Rezonans powietrza zamkniętego w oponie

Drgania powietrza zamkniętego w oponie są znanym źródłem hałasu o niskiej częstotliwości [12]. Hałas ten jest jednak tylko w minimalnym stopniu słyszalny na zewnątrz pojazdu. W znacznie większym stopniu wpływa on na klimat akustyczny w kabinie pojazdu, gdyż jest stosunkowo dobrze przenoszony przez elementy zawieszenia. Częstotliwość rezonansu słupa powietrza zamkniętego w oponie, uzależniona jest jedynie od rozmiaru opony oraz prędkości rozchodzenia się dźwięku w gazie wypełniającym tę oponę. Dla typowych opon wypełnionych powietrzem częstotliwość rezonansowa wynosi ok. 210–250 Hz.

Jeśli hałas związany z drganiem powietrza zamkniętego w oponie stanowi problem w kabinie pojazdu, to jedyną metodą zmniejszenia jego uciążliwości jest zmiana sztywności elementów zawieszenia (rozstrojenie), tak aby częstotliwości około 210–250 Hz nie przenosiły się do wnętrza pojazdu. Próby napełniania opon innym niż powietrze gazem (co oddziałuje na częstotliwość rezonansową poprzez zmianę prędkości rozchodzenia się dźwięku) należy uznać za niepraktyczne.

9. Zasysanie i wyrzucanie powietrza (*“air pumping”*)

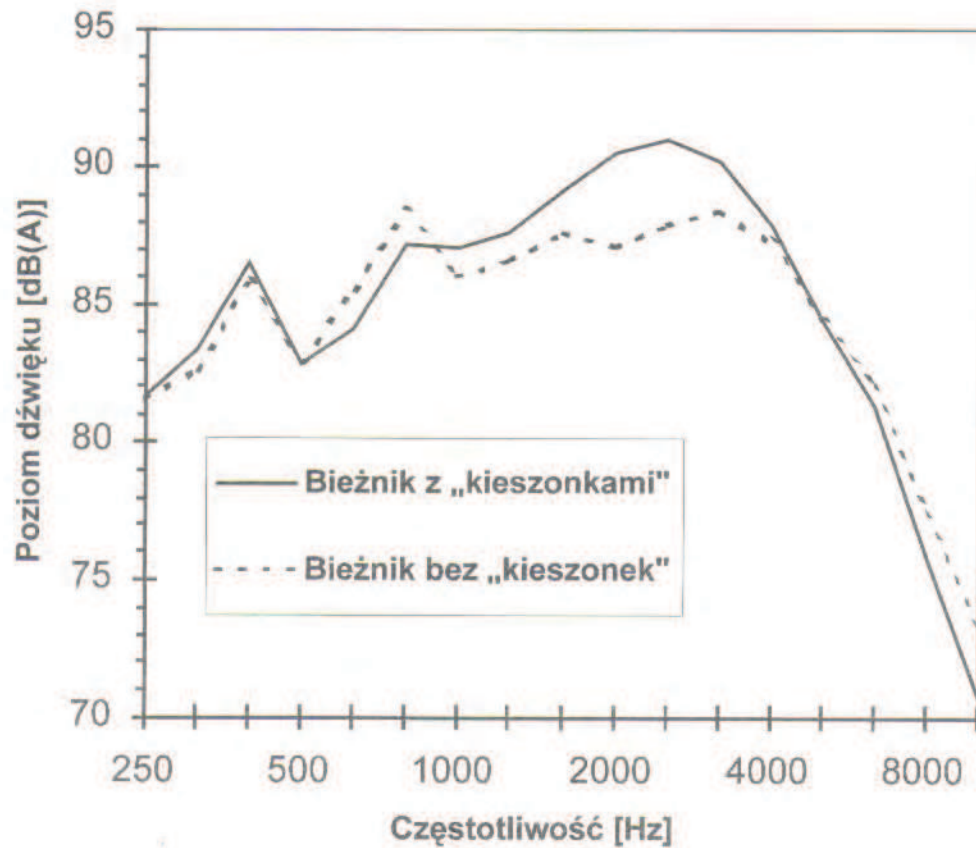
W trakcie toczenia opony po nawierzchni jezdni, w rejonie śladu styku tworzą się systemy kanalików ograniczonych nawierzchnią jezdni oraz ściankami rowków bieżnika. Ugięcia i przemieszczenia klocków bieżnika powodują zmiany ciśnienia w powstałym systemie rowków. W szczególnym przypadku, gdy kanaliki nie są wentylowane, powstają tzw. „kieszonki”, w których zmiany ciśnienia, są stosunkowo duże. W rejonie wyjścia „kieszonki” ze styku z nawierzchnią następuje więc gwałtowna zmiana ciśnienia związana z rozszczelnieniem kieszonki. W tym momencie powstaje zjawisko akustyczne, którego nazwa zapożyczona z języka angielskiego brzmi *“air pumping”*. Poraz pierwszy zjawiskiem tym zajął się Hayden [7].

Dla wyeliminowania *air-pumping*'u należy zapewnić dobrą wentylację rowków. Zasadniczo może to być osiągnięte albo poprzez ukształtowanie systemu rowków bieżnika w sposób uniemożliwiający powstawanie zamkniętych kieszonek, albo poprzez

zapewnienie wentylacji od strony nawierzchni drogowej. Przeprowadzone na Politechnice Gdańskiej eksperymenty wskazują, że nawet małe „kieszonki” mogą być odpowiedzialne za poważny wzrost hałasu opon. W jednym z typów opon, produkowanych w kraju, obserwowane były stosunkowo częste błędy wykonawcze polegające na nieznacznym wypływananiu gumy w rejonie podziału formy wulkanizacyjnej. Powodowało to tworzenie membranki, która odcinała stosunkowo niewielki fragment systemu rowków od możliwości wentylacji na zewnątrz śladu styku. W konsekwencji tworzyły się kieszonki i znacznie wzrastał hałas opon związany z mechanizmem typu air-pumping. Na rysunku 11 przedstawiony jest wzór bieżnika, w którym obserwowano powstawanie kieszzonek, a na rys. 12 zamieszczone są widma hałasu uzyskane przy toczeniu opony z membranką oraz uzyskane po wycięciu membranki. Wyraźnie widoczny jest znaczny wpływ membranki na poziomy hałasu dla pasma częstotliwości 1600–4000 Hz. Przedział ten związany jest z omawianym zjawiskiem.



Rys. 11. Wzór bieżnika, w którym w wyniku błędów produkcyjnych powstały „kieszonki”.
Fig. 11. Thread pattern, with the “pockets” as the results of technological errors



Rys. 12. Wpływ „kieszzonek” na hałas opony, której bieżnik przedstawiony jest na rys. 11.

Fig. 12. The influence of “pockets” on tyre/road noise, tyre presented in Fig. 11

W latach dziewięćdziesiątych szwedzki wynalazca Hans-Erik Hansson wynalazł koło kompozytowe, które posiadając sztywność zbliżoną do klasycznego, ogumionego koła samochodowego pozbawione jest opony pneumatycznej. Koło to pozwala na zastosowanie unikatowej metody wentylacji rowków „na wskroś” bieżnika. Widok koła przedstawiony jest na rys. 13. Poziom hałasu toczenia koła kompozytowego jest wyraźnie niższy od poziomu hałasu klasycznych kół samochodowych wyposażonych w opony pneumatyczne.

Jak już wspomniano powyżej, wentylowanie w rejonie śladu styku opony z jezdnią może być zrealizowane również poprzez właściwe ukształtowanie nawierzchni. Duża tekstura nawierzchni ułatwia rozszczelnianie śladu styku opony i jezdni eliminując zjawisko air-pumping’u. Jeszcze lepsze rezultaty można uzyskać stosując nawierzchnię drenażową, to znaczy taką, przez którą swobodnie przepływa powietrze (i woda!). Nawierzchnie drenażowe są już często stosowane w krajach Europy Zachodniej i w Japonii. Oprócz znacznego ograniczania hałasu pojazdów (o 3–8 dB) zmniejszają one



Rys. 13. Kompozytowe „Koło Hanssona” z wentylowanym bieżnikiem.
Fig. 13. Composit tyre “Hanssen’s Wheel” with ventilated tread

problemy związane z obecnością wody na nawierzchni jezdni. Na rysunku 14 przedstawione są zdjęcia zrobione w czasie jazdy samochodem po klasycznej nawierzchni z betonu asfaltowego (rys. 14a) i po nawierzchni z asfaltu drenażowego (rys. 14b). Zdjęcia te wykonane zostały przez autora w odstępach kilkudziesięciu sekund na autostradzie w Niemczech. W obu przypadkach intensywność opadów była więc identyczna.

10. Rezonans Helmholtz’a

Wielu badaczy hałasu opon wskazuje na to, że rezonans Helmholtz’a jest jednym z bardziej istotnych mechanizmów generowania hałasu opon. W opinii Nilssona [8] rezonans Helmholtz’a jest dla opon z poprzecznymi rowkami najważniejszym mechanizmem generowania hałasu.

Rezonans Helmholtz’a występuje wtedy, gdy rowek wypełniony powietrzem przejdzie przez krawędź wyjścia opony ze styku z nawierzchnią. W pierwszym etapie następuje połączenie powietrza znajdującego się w rowku z powietrzem poza rowkiem, poprzez szczelinę uformowaną przy krawędzi rowka. W tym momencie masa powietrza w rowku „zawieszona” na sprężystości powietrza w szczelinie zaczyna drgać. Otwarcie rowka towarzyszy seria impulsów, których amplituda szybko maleje. Zwykle częstotliwość impulsów wynosi około 1000–2000 Hz.

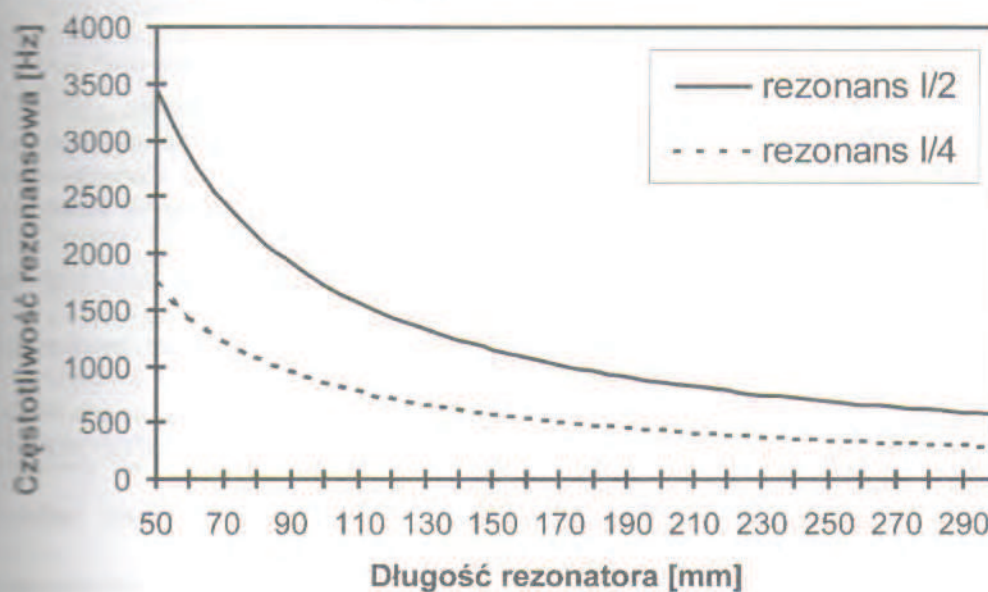


Rys. 14. Wpływ nawierzchni na widoczność podczas deszczu: A — beton asfaltowy, B — asfalt drenażowy.
Fig. 14. The influence of surface on the visibility during rain: A — tarmac concreet, B — tarmac with drying system

Rezonans Helmholtz'a może być ograniczany poprzez dobrą wentylację systemu rowków, zarówno poprzez właściwe ukształtowanie rzeźby bieżnika jak i poprzez porowatość (własności drenażowe) nawierzchni.

11. Rezonans powietrza w rowkach

Rzeźba bieżnika opony współpracując z gładką nawierzchnią jezdni tworzy skomplikowany system kanalików wypełnionych powietrzem. Każdy element takiego systemu „rurek” utworzonych poprzez rowki bieżnika i nawierzchnię jezdni stanowi swoisty rezonator. W zależności od tego, czy rowek jest na obu końcach otwarty, czy też jeden koniec jest zamknięty tworzone są rezonatory typu $\lambda/2$ lub $\lambda/4$. Na rysunku 15 przedstawione są pierwsze częstotliwości rezonansowe dla poszczególnych typów rezonatorów w funkcji długości „rurki”. W przypadku opony należy wziąć dodatkowo pod uwagę, że zwykle zakończenie rowka nie jest prostopadłe do jego osi i wyznaczenie rzeczywistej długości rezonatora jest utrudnione.



Rys. 15. Częstotliwości rezonansowe dla rowków bieżnika.

Fig. 15. Resonans frequencies for thread patterns

Zmniejszenie hałasu poprzez wpływ na mechanizm związany z rezonansem powietrza w rowkach bieżnika, może być dokonane na dwa sposoby. Jednym ze sposobów jest unikanie nakładania się częstotliwości rezonansowych związanych z rezonansem powietrza w rowkach z częstotliwościami wymuszeń pochodzących od uderzania klocków bieżnika o nawierzchnię. Podobnie jak w przypadku innych mechanizmów aerodynamicznych można również stosować dobre wentylowanie systemu rowków, co praktycznie eliminuje możliwość zaistnienia drgań rezonansowych.

12. „Efekt rogu”

W rejonie wejścia opony w styk z nawierzchnią i w rejonie wyjścia ze styku, powierzchnie opony oraz nawierzchni jezdni tworzą kształt przypominający tubę pozbawioną ścianek bocznych. Jak wiadomo kształt tubowy („róg”) stosowany jest w akustyce do wzmacniania i ukierunkowania emisji dźwięku (sygnały dźwiękowe, głośniki tubowe itp). Przy odpowiednio dużej szerokości opony, brak „ścianek bocznych” nie eliminuje efektu rogu i następuje kierunkowa emisja hałasu ku tyłowi i ku przodowi opony. Efekt rogu może być zamodelowany poprzez wprowadzenie źródeł pozornych, zastępujących efekt odbicia dźwięku od powierzchni stanowiących ścianki rogu [13]. Efektywność efektu rogu uzależniona jest w przypadku opony od jej szerokości oraz od własności absorpcyjnych nawierzchni jezdni. Nawierzchnie drenażowe znacznie zmniejszają efekt rogu, gdyż utrudniają odbicie dźwięku od powierzchni jezdni. Stosowanie wąskich opon (co jest niestety sprzeczne z obecnymi trendami) również ogranicza ten efekt.

13. Wnioski

Brak jest prostych i uniwersalnych metod pozwalających na stworzenie „cichych” opon samochodowych. Nawet małe zmiany w rzeźbie bieżnika mogą znacznie wpłynąć na poziom i widmo emitowanego hałasu. Pomimo tego możliwe jest sformułowanie kilku ogólnych zaleceń ułatwiających walkę z hałasem opon samochodowych. Zalecenia te przedstawione są poniżej:

- rowki poprzeczne w bieżniku opon nie powinny mieć przebiegu zbliżonego do kształtu krawędzi śladu współpracy opony z nawierzchnią,
- rzeźba bieżnika powinna być dobrze zrandomizowana, w miarę możliwości należy stosować asynchroniczną rzeźbę bieżnika,
- w rejonie bieżnika należy stosować miękką mieszankę gumową; usztywnienie elementów bieżnika można uzyskać poprzez zastosowanie „mostków” i/lub zmniejszenia głębokości wybranych rowków,
- w oponach należy stosować sztywne opasanie, szczególnie w rejonie barków opony,
 - konstrukcja zawieszenia pojazdu powinna być taka, aby utrudnić przenoszenie drgań o częstotliwości związanej z rezonansem powietrza zamkniętego w oponie (zwykle ok. 200–250 Hz),
 - rzeźba bieżnika powinna zapewniać dobrą wentylację rowków; należy za wszelką cenę unikać możliwości powstawania zamkniętych „kieszni”,
 - częstotliwości rezonansowe związane z drganiem powietrza w rowkach bieżnika, nie powinny pokrywać się z częstotliwościami wymuszeń pochodzących od uderzeń bieżnika opony o nawierzchnię (przynajmniej dla typowych prędkości jazdy),
 - należy unikać stosowania bardzo gładkich nawierzchni drogowych; w miarę możliwości należy stosować nawierzchnie szorstkie lub jeszcze lepiej porowate.

LITERATURA

- [1] DOAN, V.Q.: *Influence of Tire Construction and Tire Mould Profile on Coast-by Noise*, Tire Technology International 1996, The Annual Review of Tire Materials and Tire Manufacturing Technology.
- [2] DONAVAN, P.R., OSWALD, L.J.: *Quantification of Noise Mechanisms of Blank, Rib, and Cross-Bar Tread Bias-Ply Truck Tires*, Report GMR-3750, General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan 48090, USA, 1981.
- [3] EBERHARDT, A.C.: *An Experimental and Analytical Investigation of the Vibration Noise Generation Mechanism in Truck Tires*, Report No DOT-HS-805-868, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 1981.
- [4] EISMONT, J.A.: *Comparison of Road and Laboratory Measurements and Influence of Some Tire Parameters on Generation of Sound*, Report 244 A, Swedish Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden, 1982.
- [5] EISMONT, J.A.: *Side Force Influence on Tire/Road Noise*, Proceedings of INTRO '90, 8–10 August 1990, Gothenburg, Sweden.
- [6] EISMONT, J.A.: *Hałas opon samochodowych — wybrane zagadnienia*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 498, Mechanika LXVIII, Habilitation Thesis, Technical University of Gdańsk, Poland, 1992.
- [7] HAYDEN, R.E.: *Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface*, Proceedings Purdue Noise Control Conference, Purdue University, 1971.
- [8] NILSSON, N.A., SODERQVIST, S., BENNERHULT, O.: *Air-Resonant Radiation — a Possible Mechanism for High Frequency Noise from Cross-Bar Tires*, Technical Report 6.084.02 IFM, Akustikbyran, Sweden, 1979.
- [9] NILSSON, N.A., ZETTERLING, T.: *Noise Reduction Mechanisms for Poroelastic Road Surfaces*, Proceedings of INTRO '90, 8–10 August 1990, Gothenburg, Sweden.
- [10] PLOTKIN, K.J., MONTROLL, M.L., FULLER, W.R.: *The Generation of Tire Noise by Air Pumping and Carcass Vibration*, A057A Proc. Inter-Noise '80.
- [11] SANDBERG U., EISMONT J.A.: *Tyre/Road Noise Reference Book*, INFORMEX, Hargsgard, 59040 Kisa, Sweden, 2002.
- [12] SCAVUZZO, R.W., CHAREK, L.T., SANDY, P.M., SHTEINHAUZ, G.D.: *Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise*, SAE Technical Paper Series No. 940533, SAE, 1994.
- [13] RONNEBERGER, D.: *Towards Quantitative Prediction of Tire/Road Noise*, A Workshop on Rolling Noise Generation, October 10/11 1989, Technische Universität Berlin, Germany.

Słowa kluczowe: opony, hałas, mechanizmy generowania hałasu, zwalczanie hałasu

Keywords: tyres, noise, noise generation mechanisms, noise reduction methods

Tyre/road noise generation mechanisms

Summary

The paper presents basic information related to noise generating mechanisms during interaction between pneumatic tyre and road surface. It discusses also selected possibilities of tyre/road noise reduction by influencing certain noise generation mechanisms. Following mechanisms of noise generation are described: radial and lateral vibrations of tyre tread elements, vibrations of tyre belt and sidewalls, slip-stick, adhesion between tread rubber and road surface, torus cavity resonance in tyre tube, air-pumping, Helmholtz resonance, pipe resonances in channels formed in the foot-print.