

Prognozowanie stanu zużycia klocka hamulcowego na podstawie parametrów sygnału akustycznego

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i stanowiskowych pary ciernej koło-klocki. Porównano widma akustyczne dla klocków o różnej grubości. Wskazano na eksploatacyjne aspekty poprawnej diagnostyki zużycia klocków hamulcowych.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu rozwojowego nr R 10 004806/2009 pt. „Mikroprocesorowy system diagnostyczny głównych systemów trakcyjnego pojazdu szynowego uwzględniający ocenę bieżącą i prognozowanie stanów”, finansowanego z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego..

1. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie metodyki diagnostycznej zużycia klocków hamulcowych pojazdów szynowych za pomocą modelu numerycznego pary ciernej koło-klocki przy możliwie najwierniejszym odzwierciedleniu rzeczywistych zjawisk fizycznych oraz weryfikacja tego modelu numerycznego badaniami stanowiskowymi i określenie wpływu parametrów pracy tego układu na emitowaną falę akustyczną.

1.1 Wprowadzenie

Artykuł jest podsumowaniem etapów pracy opisanych w OR-9789, OR-9804, OR-9967, OR-9981, OR-10006, OR-10042 i OR-10220. Częstym problemem spotykanym w eksploatacji pojazdów szynowych jest ocena stanu zużycia klocków hamulcowych. Zazwyczaj dokonuje się jej wizualnie a skutkami ewentualnych niedopatrzeń są nadmierne wytarcie klocka a w efekcie pogorszenie skuteczności hamowania i zniszczenie powierzchni tocznej koła w wyniku kontaktu z twardą powierzchnią obsady. Przykłady konsekwencji błędów popełnionych przy eksploatacji klocków przedstawiono na rys. 1 i 2 (były to zjawiska zaobserwowane podczas prawie dwuletniej eksploatacji wagonów 430W prowadzonej przez IPS „TABOR”)

Istotną rzeczą jest, więc znalezienie sposobu diagnozowania stanu zużycia klocków hamulcowych i wprowadzenie jej do bieżącej eksploatacji. Niewątpliwym ułatwieniem byłaby możliwość prognozowania stanu zużycia powierzchni ciernej klocka na podstawie analizy fali akustycznej w trakcie hamowania i określenie bieżącego zużycia klocków hamulcowych.

Koncepcja ta bazuje na prostej obserwacji eksperymentalnej wskazującej wpływ grubości klocka na amplitudę i częstotliwość generowanej podczas hamowania fali akustycznej.



Rys. 1. Całkowite zużycie powierzchni ciernej klocka i jego wypadnięcie. Hamowanie odbywało się obsadą.

1.2 Metodologia rozwiązania zagadnienia

Metodyka rozwiązania zagadnienia emisji fali akustycznej przez współpracującą parę cierną wymaga znajomości fizycznej interpretacji tego zjawiska. Fala akustyczna powstaje w efekcie ścierania się nierówności powierzchni ciernej klocka i powierzchni tocznej koła, które powoduje ich wzajemne pobudzanie do



Rys. 2. Uszkodzenie powierzchni tocznej koła spowodowane nadmiernym zużyciem klocka i hamowaniem klinem (widoczne wgłębienie pod przymiarem AOC)

drgań, przenoszonych następnie przez powietrze i odbieranych, jako dźwięk. Towarzyszy temu szereg zjawisk dodatkowych jak np.: rozgrzewanie pary ciernej, ubytki materiału powodujące zmiany rzeczywistych stref kontaktu pomiędzy klockiem a kołem, tłumienność materiału itd. Ze względu na złożoność badanego zjawiska nieodzowne było równoczesne przeprowadzenie eksperymentalnych prób stanowiskowych stanowiących dalszą podstawę do konstrukcji modelu numerycznego. Jako środowisko jego konstrukcji wybrano program mesowski Abaqus. Na słuszność takiej koncepcji rozwiązania wskazują załączone pozycje literaturowe [1], [2], [3] i [4] w których autorzy zgodnie uznają trafność podejścia metodą elementów skończonych do rozwiązywania zagadnień związanych z emisją fali akustycznej.



Rys. 3. Wygląd stanowiska badawczego podczas próby hamowania (klocki hamulcowe o granicznym zużyciu)

1.3 Osiągnięte wyniki prób stanowiskowych

Wszystkie próby przeprowadzono na stanowisku 12 SB znajdującym się w IPS Tabor. Stanowisko to służy do wykonywania badań układów hamulcowych z uwzględnieniem w skali 1:1 bezwładności masy pojazdu szynowego. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3.

Aparaturę pomiarową w postaci mikrofonu ½" firmy Bruel & Kjaer typu 4133 o charakterystyce dokółnej ustawiono w odległości 1,5m od miejsca styku koło-kłosek na wysokości środka klocka. Rejestrowane wartości poziomu dźwięku zapisano na dysku twardym komputera za pomocą licencjonowanego programu PULSE Recorder firmy Bruel & Kjaer. Zastosowana aparatura umożliwiła zarejestrowanie sygnału w paśmie do 20000 Hz.

Przedmiotem rozważań było wyznaczenie widma akustycznego podczas prób hamowania dla różnych konfiguracji materiału klocka, grubości klocka i prędkości początkowej.

Próby wykonano dla dwóch rodzajów materiału klocków hamulcowych, przy uwzględnieniu trzech różnych grubości w obrębie każdego z nich:

- dla klocka P10 (grubości średnie):

56,6 mm,
28,9 mm
18,8 mm

- dla klocka kompozytowego LL FR-510 (grubości średnie):

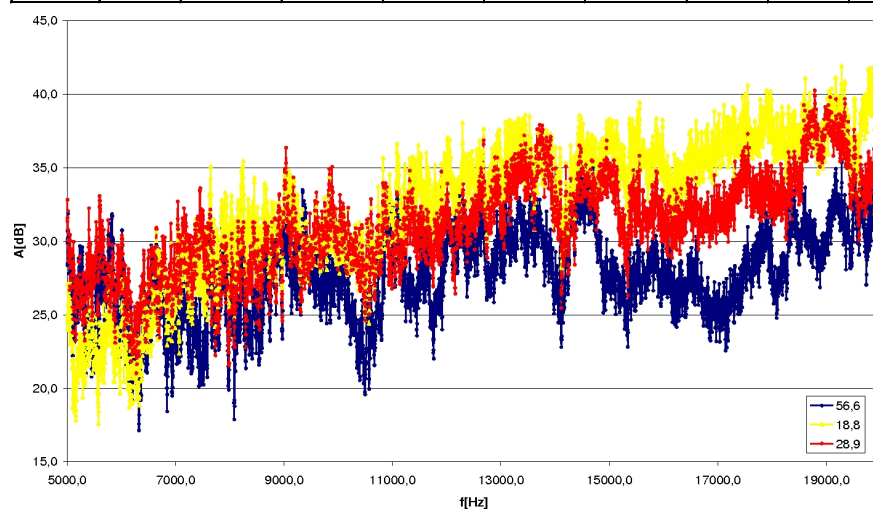
42,4 mm
32,1 mm
23,2 mm

Rozpatrzono dwie początkowe prędkości hamowania 80 km/h i 60 km/h a uzyskane dla nich wyniki pomiarów przedstawiono w Tabelach 1 i 2. Przed przystąpieniem do pomiarów widma podczas procesu hamowania zmierzono tło akustyczne stanowiska (uruchomione stanowisko 12SB z obracającym się bez hamowania kołem i masą bezwładnościową odpowiadającą obciążeniu 20t/oś)

Ze względu na powszechność stosowania w eksploatacji starszego taboru kolejowego klocków hamulcowych P10 oraz dużo niższego poziomu widma akustycznego (w porównaniu z widmem tła) dalszą analizę problemu oparto o wyniki uzyskane dla klocków hamulcowych P10.

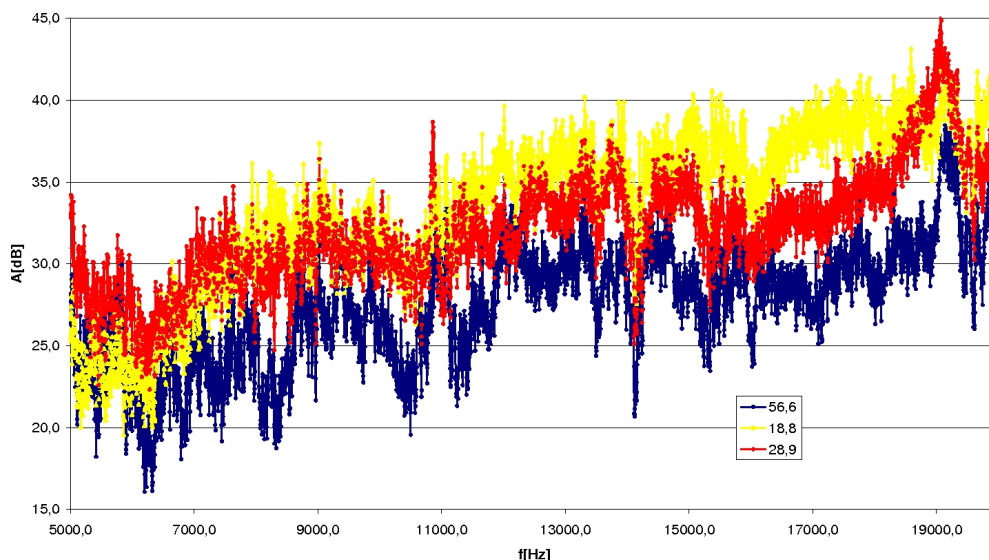
Na podstawie powyższych tabel sporządzono wykresy 4 i 5 przedstawiające zależności amplitudy widma akustycznego A [dB] w zależności od częstotliwości f [Hz].

F [Hz]	Tłó 80 km/h	Pomiary [dB]			Grubość klocka [mm]	Pomiary [dB]			Grubość klocka [mm]	Pomiary [dB]			Grubość klocka [mm]
		Pom I	Pom II	Pom III	56,6	Pom I	Pom II	Pom III	18,8	Pom I	Pom II	Pom III	28,9
5000,0	36,8	63,4	63,8	68,6	28,5	60,3	60,3	63,2	24,4	68,2	67,8	68,6	31,4
5003,1	37,4	64,1	64,5	68,5	28,4	61,1	61,2	63,6	24,6	68,5	68,1	69,5	31,4
5006,3	36,3	65,4	65,5	68,4	30,1	61,0	60,7	61,8	24,9	67,8	69,7	69,9	32,8
5009,4	37,4	65,4	65,4	70,9	29,9	61,5	61,2	61,3	24,0	68,1	70,2	68,6	31,6
5012,5	37,4	66,5	65,7	72,1	30,7	62,1	63,3	61,8	25,0	66,5	67,6	68,3	30,1
5015,6	36,3	66,0	66,8	71,6	31,9	62,2	63,9	64,0	27,1	66,5	68,6	69,9	32,1
5018,8	38,2	67,5	67,8	71,1	30,6	62,8	63,7	65,1	25,7	67,1	70,2	69,6	30,8
5021,9	38,2	67,7	67,7	70,1	30,3	62,4	63,8	63,8	25,2	66,2	69,0	68,3	29,7
5025,0	38,7	66,6	66,9	68,5	28,6	63,0	63,8	63,8	24,8	63,9	69,1	69,2	28,7
5028,1	37,3	65,3	66,9	69,0	29,7	63,8	63,5	64,3	26,5	65,4	70,1	68,1	30,5
5031,3	38,0	64,5	66,5	70,0	29,0	63,3	63,7	63,5	25,5	65,2	69,7	67,5	29,5
5034,4	37,7	64,5	65,8	68,3	28,5	62,5	62,5	63,0	25,0	65,0	68,3	67,0	29,1
5037,5	37,6	63,8	64,7	67,7	27,8	61,6	62,7	63,0	24,9	64,6	67,2	67,9	29,0
5040,6	37,2	64,7	65,6	67,6	28,8	63,1	63,1	64,1	26,2	64,4	66,9	66,7	28,8
5043,8	36,7	64,0	65,3	67,1	28,7	62,9	64,4	64,7	27,3	62,5	66,1	67,4	28,6
5046,9	38,7	64,1	64,7	67,1	26,6	61,6	63,8	64,9	24,7	63,8	64,9	67,4	26,7
5050,0	38,7	64,5	64,5	66,5	26,5	59,9	61,5	63,7	23,0	64,4	66,1	66,5	26,9
19946,9	15,1	50,3	50,0	48,2	34,4	55,7	53,9	57,6	40,6	52,5	51,0	50,7	36,3
19950,0	14,7	51,2	49,6	49,6	35,4	56,2	54,7	57,7	41,5	51,7	51,5	50,1	36,4
19953,1	16,5	50,2	49,3	48,0	32,6	55,9	54,6	56,9	39,3	50,5	51,5	49,1	33,8
19956,3	16,0	49,3	49,9	47,0	32,8	55,3	55,7	57,1	40,1	51,2	50,9	48,9	34,4
19959,4	16,1	50,6	50,0	48,5	33,6	55,9	55,6	57,2	40,2	51,2	49,8	50,6	34,4
19962,5	15,3	50,5	49,5	48,8	34,3	56,1	55,0	57,0	40,7	50,3	50,4	48,9	34,6
19965,6	16,1	50,8	51,2	49,4	34,4	55,8	54,8	57,1	39,8	51,0	50,7	49,3	34,2
19968,8	16,6	50,3	50,4	48,9	33,2	56,0	55,9	57,1	39,7	51,4	49,5	49,4	33,5
19971,9	15,9	50,3	49,4	49,0	33,7	56,5	55,8	57,9	40,8	50,2	50,4	49,9	34,2
19975,0	16,0	51,6	49,0	48,3	33,7	56,5	53,9	57,7	40,1	51,7	50,2	48,9	34,3
19978,1	16,0	51,5	49,5	48,5	33,9	55,8	53,0	56,2	39,0	52,8	49,8	50,1	34,9
19981,3	14,9	50,7	48,7	49,0	34,5	56,5	54,8	55,9	40,8	53,0	49,4	50,6	36,1
19984,4	16,2	49,0	48,3	49,0	32,5	56,5	55,3	56,6	39,9	52,2	49,6	50,8	34,6
19987,5	16,3	47,8	51,0	48,1	32,7	56,2	54,7	58,0	40,0	51,7	50,3	49,0	34,0
19990,6	16,3	49,0	50,9	49,1	33,4	55,6	55,2	56,3	39,4	51,2	50,6	48,3	33,8
19993,8	16,8	49,4	49,9	48,9	32,6	55,8	55,5	55,8	38,9	52,3	49,3	49,9	33,7
19996,9	17,6	50,1	49,0	48,2	31,5	55,9	55,9	56,1	38,4	51,1	49,4	50,1	32,6
20000,0	16,8	50,4	49,0	49,4	32,8	54,5	55,5	55,6	38,4	51,4	49,7	50,2	33,6



Rys. 4. Widmo
akustyczne dla klocka
P10 przy prędkości 80
km/h

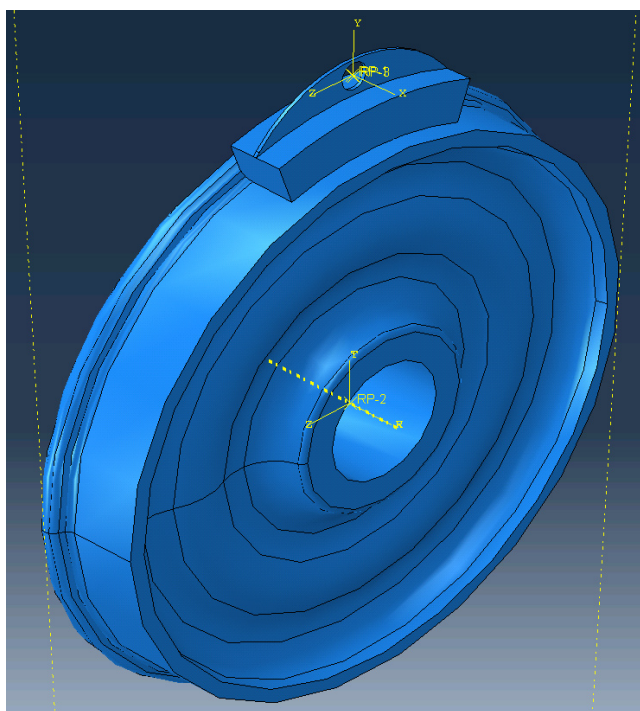
F [Hz]	Tłó 60 km/h	Pomiary [dB]			Grubość Klocka [mm]	Pomiary [dB]			Grubość Klocka [mm]	Pomiary [dB]			Grubość Klocka [mm]
		Pom I	Pom II	Pom III	56,6	Pom I	Pom II	Pom III	18,8	Pom I	Pom II	Pom III	28,9
5000,0	34,9	60,5	62,2	61,5	26,5	58,3	60,3	62,0	25,3	66,2	70,3	67,5	33,1
5003,1	35,1	62,3	62,9	63,2	27,7	59,6	60,5	61,6	25,5	65,3	69,8	69,0	32,9
5006,3	33,8	63,2	61,2	61,2	28,1	59,6	60,8	60,8	26,6	65,4	68,8	68,0	33,6
5009,4	34,9	61,0	62,5	60,2	26,3	60,8	59,6	61,4	25,7	67,1	68,3	67,9	32,8
5012,5	34,4	62,6	62,8	62,3	28,2	62,6	60,4	60,5	26,8	67,6	68,4	69,8	34,2
5015,6	34,5	63,9	63,1	63,5	29,0	62,7	60,6	62,2	27,4	67,8	68,0	69,9	34,1
5018,8	34,8	62,9	63,2	64,2	28,6	60,8	61,9	62,9	27,0	66,4	69,4	67,4	32,9
5021,9	34,1	62,3	63,6	64,5	29,3	61,4	62,3	62,8	28,0	65,7	71,0	67,7	34,0
5025,0	37,6	62,8	64,0	64,5	26,2	60,5	62,2	61,6	23,9	65,4	70,8	69,3	31,0
5028,1	37,4	63,5	63,5	63,8	26,2	60,8	62,2	62,6	24,5	65,6	69,9	68,7	30,6
5031,3	36,8	62,6	64,6	63,3	26,7	61,3	62,2	64,2	25,7	65,3	69,2	67,2	30,4
5034,4	36,5	62,8	64,3	63,0	26,8	59,8	62,2	64,2	25,5	64,6	68,6	68,9	30,8
5037,5	36,4	62,4	65,5	62,1	27,0	61,3	61,3	63,8	25,8	64,8	68,9	67,2	30,6
5040,6	36,3	62,0	65,2	62,8	27,1	61,7	61,1	64,2	26,1	64,6	67,8	66,0	29,9
5043,8	34,4	61,2	62,0	61,6	27,2	62,3	62,3	63,5	28,3	64,7	66,8	66,0	31,5
5046,9	33,5	61,1	60,1	60,0	26,9	62,3	62,9	62,3	29,0	65,7	67,7	66,3	33,1
5050,0	33,1	60,5	62,4	58,9	27,5	61,3	61,5	62,5	28,7	65,8	68,7	66,1	33,8
19928,1	15,0	46,7	49,5	47,5	32,9	54,1	55,3	55,3	39,9	51,4	48,3	49,7	34,8
19931,3	14,5	48,2	49,8	48,0	34,2	53,3	55,2	54,9	40,0	52,3	46,9	49,1	34,9
19934,4	14,6	48,4	48,7	48,2	33,8	53,9	54,6	53,9	39,5	52,5	47,8	48,6	35,0
19937,5	15,8	48,5	49,0	48,7	33,0	54,1	53,7	53,2	37,9	52,1	47,8	49,0	33,9
19940,6	15,2	48,0	48,8	47,9	33,1	54,3	54,4	53,9	39,0	52,4	47,9	49,2	34,7
19943,8	15,2	47,8	48,9	47,7	33,0	54,8	54,3	54,4	39,3	52,6	47,6	49,7	34,8
19946,9	15,4	47,5	48,2	47,4	32,3	54,6	54,6	54,6	39,2	52,9	47,5	48,9	34,3
19950,0	14,6	48,5	48,9	47,7	33,8	53,3	53,5	53,5	38,9	53,1	47,3	48,8	35,2
19953,1	14,1	49,2	48,1	47,6	34,2	54,8	53,3	54,8	40,2	53,3	48,6	49,3	36,3
19956,3	15,0	49,5	48,2	46,8	33,2	54,2	53,7	55,3	39,4	52,8	49,3	50,1	35,7
19959,4	14,0	46,7	48,4	48,3	33,9	53,4	52,5	53,9	39,3	53,0	49,4	49,7	36,8
19962,5	13,9	47,1	48,7	49,3	34,4	52,8	54,0	55,2	40,1	52,5	48,7	50,0	36,4
19965,6	15,0	47,4	48,1	49,3	33,3	53,6	54,8	55,4	39,6	51,6	48,1	51,5	35,4
19968,8	14,6	47,3	47,9	48,0	33,1	54,8	54,7	54,9	40,2	51,9	48,7	50,5	35,7
19971,9	14,9	47,0	48,0	48,3	32,8	55,9	54,0	53,8	39,6	51,3	47,9	49,8	34,8
19975,0	15,1	47,7	48,0	47,8	32,8	55,2	53,8	53,8	39,2	52,0	47,9	48,7	34,5
19978,1	15,2	46,7	49,1	46,8	32,3	55,0	54,7	53,9	39,3	52,1	47,7	48,7	34,3
19981,3	14,5	45,9	49,7	47,3	33,1	54,7	54,5	53,8	39,8	51,7	48,1	49,4	35,2
19984,4	16,0	48,3	48,3	46,1	31,6	53,9	52,9	53,6	37,5	51,2	48,2	49,9	33,8
19987,5	16,6	47,2	48,5	46,9	30,9	53,6	54,2	54,0	37,3	52,0	47,8	50,0	33,3
19990,6	16,0	47,6	48,9	48,1	32,2	53,6	54,3	54,2	38,0	52,1	49,1	49,7	34,3
19993,8	15,4	47,9	48,8	48,6	33,1	54,6	54,5	54,3	39,1	52,3	49,1	50,2	35,2
19996,9	15,5	48,6	48,4	47,6	32,7	54,3	54,6	53,0	38,5	53,3	50,4	50,3	35,8
20000,0	15,6	48,1	48,7	48,1	32,7	53,7	54,4	54,1	38,5	52,6	49,2	51,4	35,5



Rys 5. Widmo akustyczne dla klocka P10 przy prędkości 60km/h

2. Model numeryczny

Rozpatrywany model numeryczny stworzono w programie Abaqus. Jest to końcowa wersja modelu po licznych modyfikacjach. W celu odzwierciedlenia warunków stanowiskowych przyjęto geometrię koła i klocka zgodne z dostępną dokumentacją [1]. Widok pary ciernej koło-kłosek przedstawiono na rys.6.



Rys. 6. Widok ogólny układu (kłosek o grubości 60mm)

Zarówno koło jak i kłosek zamodelowano, jako ciała odkształcalne sprężyste.

2.1. Warunki zamocowania

Przyjęto, że miejscem zamocowania koła jest punkt RP-2 położony w jego geometrycznym środku, a jedynym dopuszczalnym ruchem jest obrót dookoła osi. Oddziaływanie tego punktu na pozostałe obszary koła zasymulowane zostało poprzez wprowadzenie więzów typu kinematycznego (Constraint)

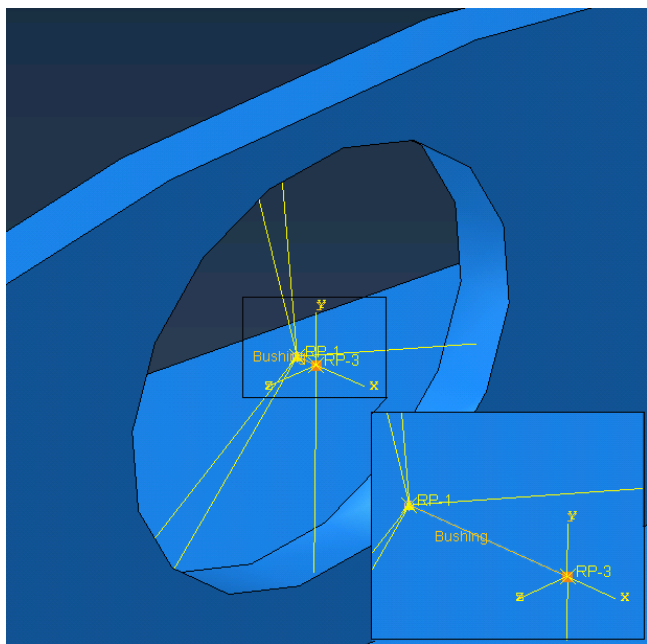
W celu odwzorowania rzeczywistych warunków kłosek zamontowano w obsadzie. Ze względu na stanowiskowe warunki zamocowania, sprężystość elementów i istniejące luzy obsada wykazuje zróżnicowane zależności od wyboru kierunku sztywności, dlatego zastosowano połączenie typu przegubowego (Coupling - Bushing - połączenie sprężyste) pomiędzy sztywno związanym z obsadą punktem RP-1 a sztywno związanym ze środkiem koła punktem RP-3.

Połączeniu temu nadano właściwości sprężyste poprzez zdefiniowanie jego sztywności translacyjnych i obrotowych w trzech kierunkach. Wprowadzone sztywności zestawiono w Tabeli 3 zaś połączenie przedstawiono na rys. 7.

Sztywności translacyjne i obrotowe zamocowania klocka

Tabela 3

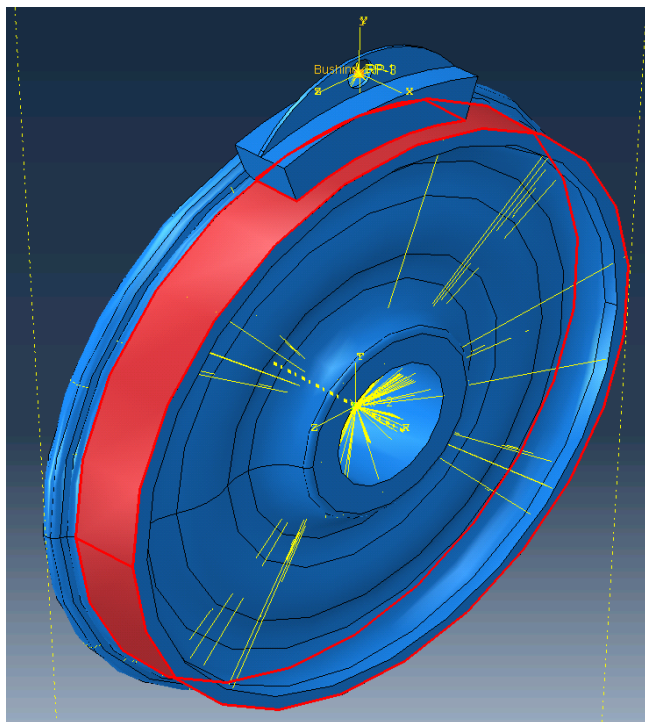
Sztywność translacyjna [N/mm]		Sztywność obrotowa [Nmm/rad]	
Kierunek X	10000	Względem X	100000
Kierunek Y	100	Względem Y	1000000
Kierunek Z	100000	Względem Z	1000000



Rys. 7. Sposób zamocowania klocka

2.2. Warunki kontaktu

Oddziaływanie w strefie styku powierzchni koła i klocka zasymulowano wprowadzając opcję kontaktu ogólnego dostępną w Solverze Explicit programu Abacus. Współczynnik tarcia zdefiniowano jako stały 0,30. Jako powierzchnię nadrzędną wskazano powierzchnię toczną koła a status powierzchni podrzędnej nadano powierzchni przylegania klocka (rys. 8).



Rys. 8. Sposób określenia kontaktu pomiędzy powierzchnią koła i klocka

2.3. Warunki ruchu i obciążenia

Prędkość obrotową koła zadano w powiązanim z nim punkcie RP-2. Liniowy przyrost prędkości od wartości początkowej 0 m/s do żądanej wartości końcowej osiągnięto posługując się opcją Amplitude w kroku prędkość.

Obciążenie pochodzące od siły nacisku zadano w postaci siły skupionej działającej w punkcie RP-1, która dzięki wprowadzonemu powiązaniu sprężystemu symuluje oddziaływanie sworznia na obsadę podczas docisku.

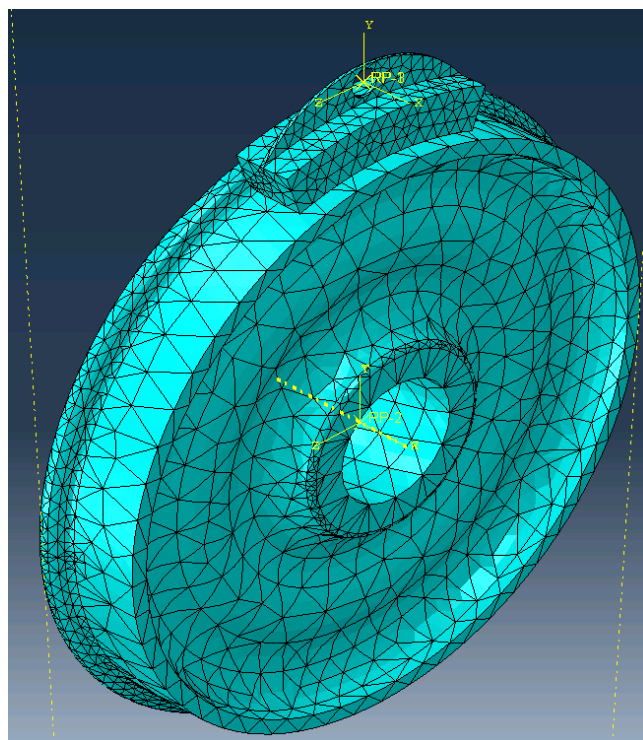
Bezwładność mas wirujących uwzględniono wprowadzając masę skupioną 10t w punkcie RP-2. Kolejność oraz czas poszczególnych kroków ilustruje Tabela 4

Kolejność kroków procedury obliczeniowej Tabela 4

Step Manager				
Name	Procedure	Nlgeom	Time	
Initial	(Initial)	N/A	N/A	
✓ Prędkość	Dynamic, Explicit	ON	0.01	
✓ Docisk	Dynamic, Explicit	ON	0.02	
✓ Hamowanie	Dynamic, Explicit	ON	0.03	
Create...	Edit...	Replace...	Rename...	Delete...
		Nlgeom...	Dismiss	

2.4. Podział modelu na elementy skończone

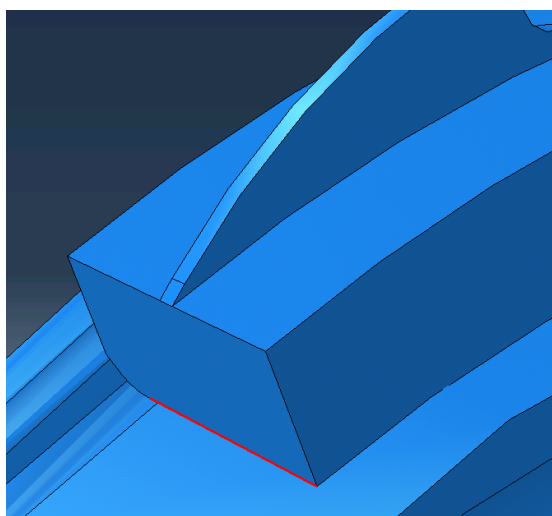
Zarówno do podziału klocka jak i koła zastosowano elementy czworościenne typu Tet. Wielkość „oczka siatki” na kole zadano, jako 50 mm zaś na klocku, jako 10 mm, w obu przypadkach typ elementu określono, jako Explicit. Podział modelu na elementy skończone przedstawiono na rys 9.



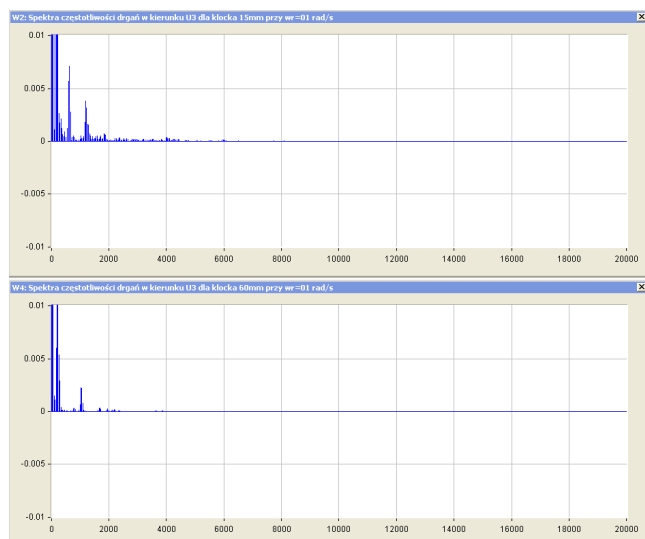
Rys. 9. Podział modelu na elementy skończone

2.5. Uzyskane wyniki

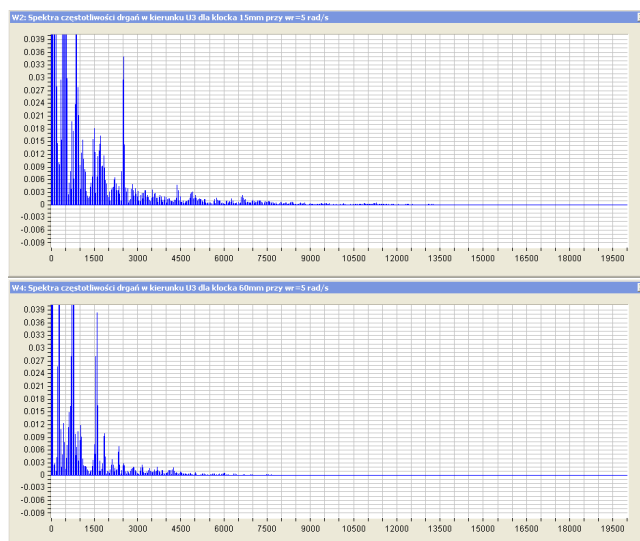
Rozważaniom numerycznym poddano dwie skrajne grubości klocka 60 mm i 15 mm odpowiadające stanowi początkowemu eksploatacji i skrajnemu zużyciu. Porównaniu i ocenie poddano rozkłady spektralne częstotliwości drgań w kierunku stycznym U3 do powierzchni klocka, wartości naprężeń i odkształceń oraz uśrednionych wychyleń węzłów na krawędzi wychodzącej klocka (rys. 10). Ze względu na znane z praktyki zjawisko wzrostu częstotliwości emitowanej fali akustycznej w przypadku dohamowywania tj. dla niskich prędkości, zdecydowano się przeprowadzić analizę dla prędkości kątowych wynoszących odpowiednio 0,1 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s i 20 rad/s. Osiągnięte wyniki zestawiono na rys. 11, 12, 13 i 14.



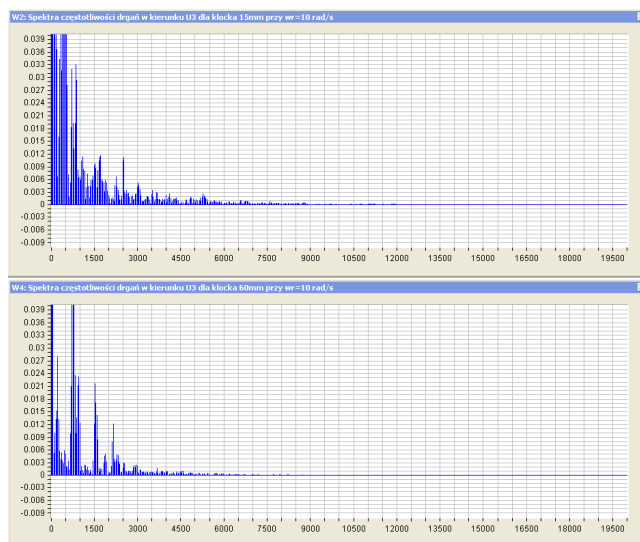
Rys. 10. Krawędź „atakująca” klocka, z której odczytywane są wyniki



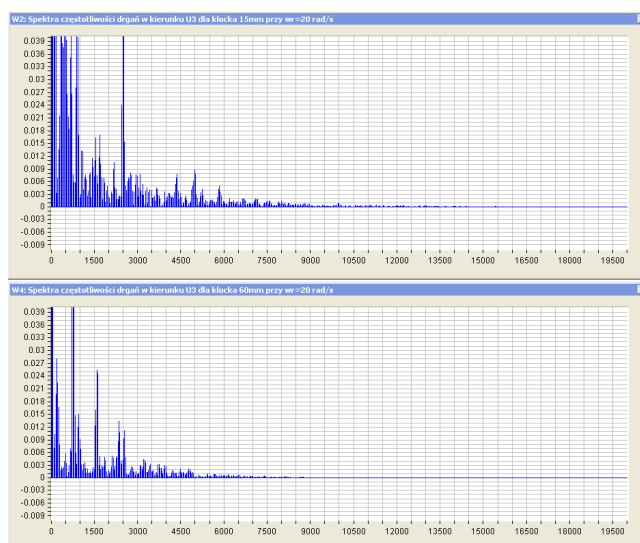
Rys. 11. Spektra częstotliwości drgań krawędzi klocka w kierunku U3 (grubości klocka 60mm i 15mm) w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 20kHz przy prędkości obrotowej koła 0,1 rad/s



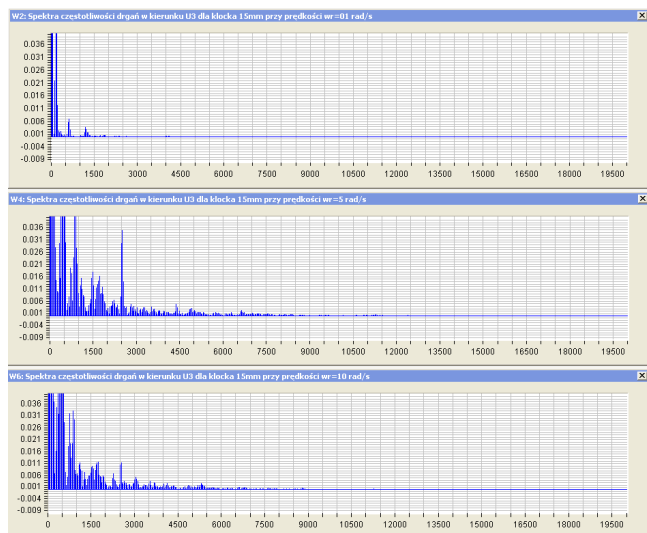
Rys. 12. Spektra częstotliwości drgań krawędzi klocka w kierunku U3 (grubości 60mm i 15mm) w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 20kHz przy prędkości obrotowej koła 5 rad/s



Rys. 13. Spektra częstotliwości drgań krawędzi klocka w kierunku U3 (grubości 60mm i 15mm) w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 20kHz przy prędkości obrotowej koła 10 rad/s

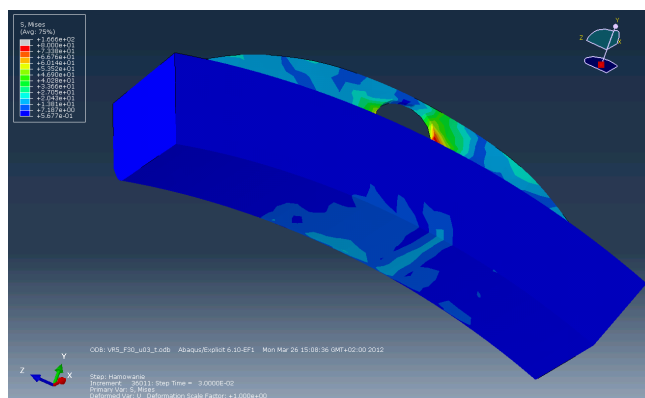


Rys. 14. Spektra częstotliwości drgań krawędzi klocka w kierunku U3 (grubości 60mm i 15mm) w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 20kHz przy prędkości obrotowej koła 20 rad/s.



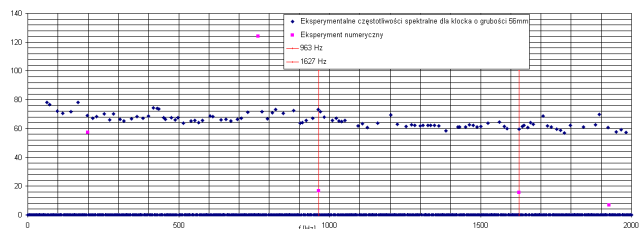
Rys. 15. Spektre częstotliwości drgań klocka o grubości 15mm przy różnych prędkościach obrotowych koła.

Rozkłady naprężeń zredukowanych wg Misesa powstałych dla klocka nowego i zużytego przedstawiono na rysunkach 16 i 17.

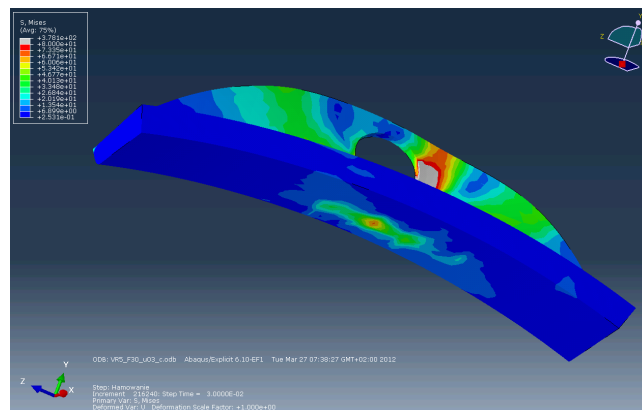


Rys. 16. Naprężenia wg Misesa dla klocka o grubości 60mm.

W celu skonfrontowania uzyskanych wyników z eksperymentem porównano wyznaczone numerycznie spektra częstotliwości drgań węzłów krawędzi klocka dla prędkości 40 i 80 km/h z spektrami wyznaczonymi eksperymentalnie (na stanowisku 12SB w IPS Tabor).

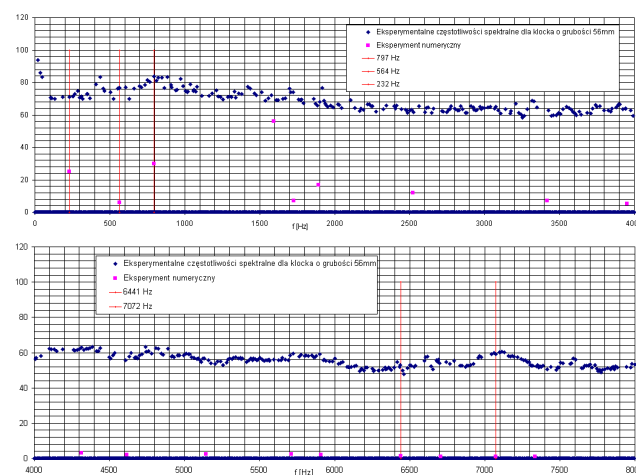


Rys. 18. Zestawienie częstotliwości spektralnych dla prędkości 40 km/h

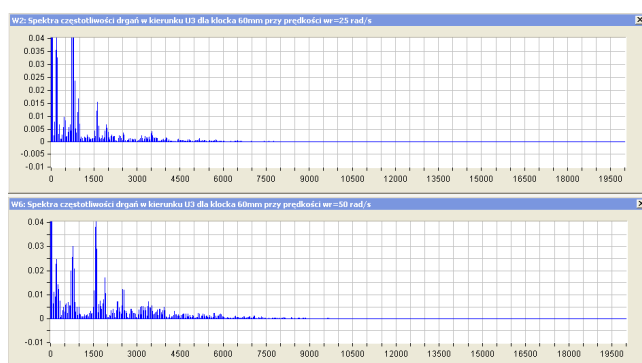


Rys. 17. Naprężenia wg Misesa dla klocka o grubości 15mm.

Wyznaczone teoretycznie wartości częstotliwości spektralnych drgań krawędzi klocka dla prędkości 40 km/h i 80 km/h z wynikami eksperymentalnymi przedstawiono na rys. 18 i 19.



Rys. 19. Zestawienie częstotliwości spektralnych dla prędkości 80 km/h



Rys. 20. Częstotliwości spektralne drgań dla prędkości $w_r=25$ rad/s i 50 rad/s.

3. Podsumowanie

Otrzymane wyniki pozwalają wnioskować, że występuje zróżnicowanie w zakresie spektrów częstotliwości drgań węzłów w zależności od grubości klocka.

Zmniejszenie grubości klocka doprowadza do zwiększenia zakresu spektrów częstotliwości drgań zwłaszcza dla prędkości kątowej obrotu koła wynoszącej 5 rad/s (8 km/h), oraz do wzrostu naprężeń w obrębie klocka, co ilustrują przedstawione wykresy. Odczytane z wykresów częstotliwości spektralne dla wybranych prędkości obrotowych koła i dwóch skrajnych grubości klocka zestawiono w Tabeli 5.

Częstotliwości spektralne

Tabela 5

Prędkość obrotowa koła [rad/s]	Kłosek 15mm [Hz]	Kłosek 60mm [Hz]
0,1	66,166,465,630,764 1195, 1826	66,199,797 1029,1693
5	99,431,896 1096,1494,1726,1826 2224,2523,2822,2922 3519,3619,3784 4117,4382,4914 5013,5741 6275,6640 7005,7171	66,133,266,432,763 1029,1594,1859 2125,2357,2523,2855 3154,3420,3685 4117,4250,4482
10	33,66,133,332,398,49 8,730,863 1096,1262,1527,1726 2258,2523,2623,2822 3021,3320,3519,3652, 3984 4117,4349,4847,4947 5046,5278 6574 7603	33,232,465,764,963 1527,1892 2158,2290,2523,2956 3685,3851 4017,4383,4548

Stabilizowane częstotliwości drgań węzłów klocka mogą, więc generować falę akustyczną mieszczącą się w granicach słyszalności dla człowieka.

Przeprowadzone badania numeryczne i stacjonarne dostarczają informację na temat różnic występujących w zakresie drgań klocka o dwóch skrajnych grubościach.

Stąd ze względu na złożoność zjawiska i pełne uwzględnienie rzeczywistych warunków pracy, wskazana jest dalsza analiza eksperymentalna (stanowiskowa) rozważanego procesu z wykorzystaniem precyzyjnej aparatury pomiarowej (np. mikrofony kierunkowe o zakresie pomiarowym do 70kHz) na stanowisku pomiarowym oraz podczas badań poligonowych. Badania te powinny być przeprowadzone z zastosowaniem izolowanym akustycznie tłem.

Wyniki tych badań pozwolą na dokładniejsze i bardziej szczegółowe określenie częstotliwości i amplitud widma akustycznego charakterystycznego dla różnych grubości klocka hamulcowego.

Umożliwi to diagnostykę stanu zużycia klocków podczas bieżącej eksploatacji (np. przejazd pociągu z określoną prędkością przez punkt pomiarowy). Otrzymane w czasie takiego pomiaru wyniki mogłyby być na bieżąco analizowane i porównywane z wcześniej opracowanym wzorcem „widmo/grubość”, co pozwoliłoby na wskazanie granicznie zużytych klocków przeznaczonych do natychmiastowej wymiany na poszczególnych pojazdach (docelowo z dokładnością do osi). Możliwe byłoby także określenie przewidzianego zużycia zależnego od przebiegu.

4. Literatura:

- [1] Abd Rahim Abu Bakar, Huajiang Ouyang, "Prediction of disc brake contact pressure distributions by finite element analysis, " *Jurnal Teknologi*, 43(A). Dis. 2005, 21-36.
- [2] Abd Rahim Abu Bakar, Mohd Kameil Abdul Hamid, Afandi Dzakaira, Badri Abdul Ghani, Maziah Mohamad, "Stability analysis of disc brake squeal considering temperature effect", *Jurnal Mekanikal*, December 2006, No. 22, 26-38.
- [3] F. Massi, L. Baillet, "Numerical analysis of squeal instability"
- [4] A. R. A. Bakar, H. Ouyang, D. Titeica, M. K. A. Hamid, "Modelling and simulation of disc brake contact analysis and squeal", *Seminar on Advances in Malaysian Noise Vibration and Comfort*, 17-18 May 2005.