

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH

ANALIZA CEPSTRALNA JAKO ŹRÓDŁO DANYCH WEJŚCIOWYCH DLA KLASYFIKATORA STOPNIA PODCIĘCIA ZĘBA

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono wyniki eksperymentu, którego celem było zastosowanie sieci neuronowej typu SVM w zadaniu klasyfikacji stopnia pęknięcia podstawy zęba. Klasyfikator neuronowy oparto na danych wejściowych pochodzących z analizy cepstrum.

CEPSTRUM ANALYSIS AS INPUT OF CLASTFICATION DEGREE OF TOOTH ROOT CRACKING

Summary. The work presents results of an experiment that employs the artificial neuronal network in the task of identification of the degree of tooth root cracking. In the experiment was used cepstrum analysis and SVM neural network.

1. WPROWADZENIE

Warunki pracy, w jakich pracują zęby kół zębatach przekładni, mogą doprowadzić do ich wyłamania na skutek inicjacji, a następnie wzrostu pęknięcia. Do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego dochodzi najczęściej w najbardziej wytężonym punkcie stopy zęba. Wystąpieniu pęknięcia u podstawy zęba towarzyszy zaburzenie warunków przyporu. Jest ono wywołane lokalną zmianą sztywności zazębienia [9].

Diagnostyka techniczna przekładni ma na celu zidentyfikowanie tego procesu już we wczesnych jego stadiach. Jedną z metod diagnostyki wibroakustycznej jest analiza cepstralna [1,2,6,7].

Zastosowanie analizy cepstralnej w diagnostyce może dać pozytywne wyniki wszędzie tam, gdzie zmiana stanu maszyny daje w efekcie pojawienie się lub zniknięcie harmonik [3].

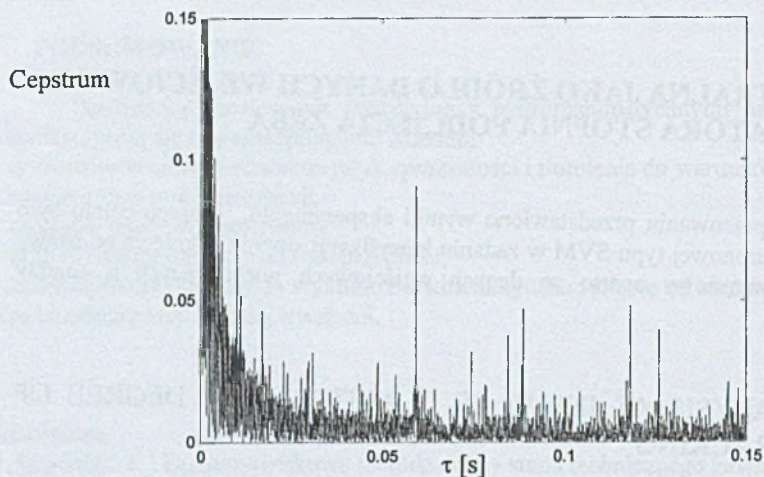
Cepstrum jest widmem mocy logarytmu widma mocy sygnału. Zmienna cepstrum wyrażona próbkami ma wymiar czasu i jest nazywana – quefrency.

Zgodnie z tą definicją analizę cepstralną można przedstawić jako zależność:

$$C(\tau) = \left| F^{-1} \{ \log G_{uu}(f) \} \right|^2$$

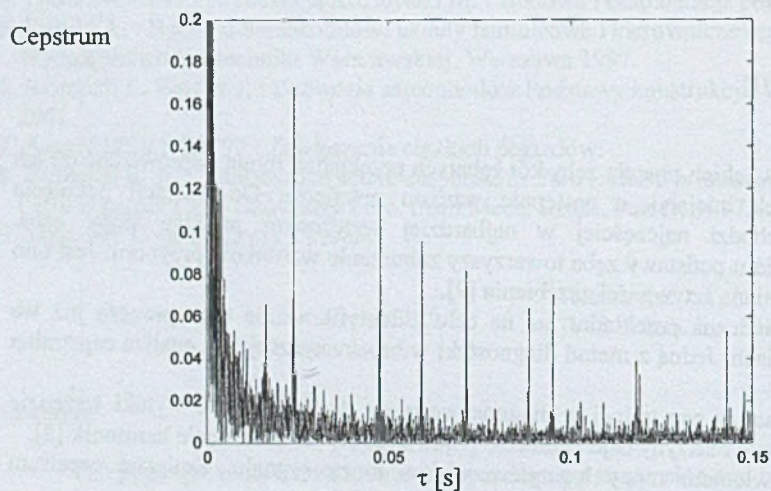
Logarytm gęstości widmowej mocy powoduje kompresję dynamiki widma i wyrównanie rozpiętości poszczególnych maksimów, czyli zwiększenie okresowości widma.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe cepstrum dla sygnału drgań poprzecznych wału przekładni nieuszkodzonej, natomiast na rys. 2 cepstrum dla koła z 60% zmianą sztywności w stosunku do koła nieuszkodzonego.



Rys. 1. Cepstrum przyspieszeń drgań poprzecznych – koło nieuszkodzone

Fig. 1. Cepstrum of shaft gear transversal vibration – without damage



Rys. 2. Cepstrum przyspieszeń drgań poprzecznych – koło z 60% zmianą sztywności w stosunku do koła nieuszkodzonego

Fig. 2. Cepstrum of shaft gear transversal vibration – drop of rigidity of mesh 60%

2. OPIS EKSPERYMENTU

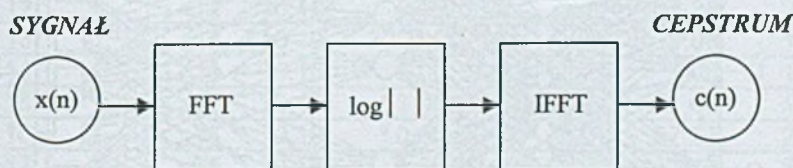
W eksperymencie postanowiono sprawdzić przydatność analizy cepstrum jako źródła danych wejściowych dla sztucznej sieci neuronowej [5,8,10]. Analizowano klasyfikator neuronowy SVM z radialnym jądrem w problemie oceny stopnia pęknięcia u podstawy zęba.

W badaniach wykorzystano zidentyfikowany model przekładni FZG [4]. Model matematyczny wykorzystano do symulacji przyspieszeń drgań poprzecznych wałów przekładni zębatej. Symulacje przeprowadzono w trzech seriach odpowiadających:

- przekładni bezbłędnej,
- przekładni w 5 klasie dokładności wykonania,
- przekładni w 6 klasie dokładności wykonania.

Symulacje dla przekładni w 5 i 6 klasie wykonania powtórzono pięciokrotnie dla różnych błędów losowych. Dla każdej serii zasymulowano uszkodzenie w postaci pęknięcia stopy zęba o różnym stopniu zaawansowania. Uzyskano 1111 symulacji.

Sygnał przyspieszeń drgań poprzecznych wału zębniaka analizowano za pomocą analizy cepstrum (rys. 3).



Rys. 3. Sposób obliczania cepstrum

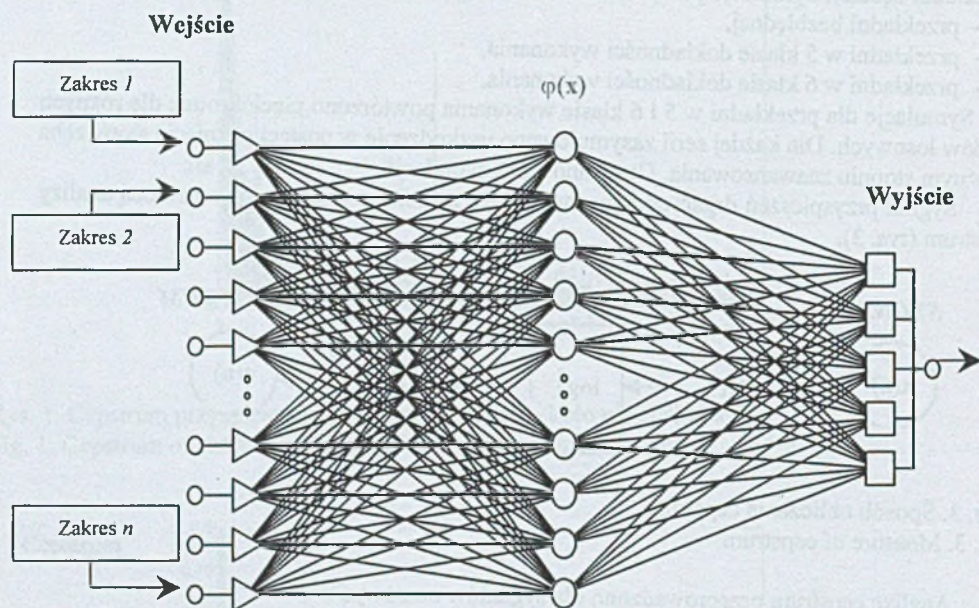
Fig. 3. Measure of cepstrum

Analizę cepstrum przeprowadzono dla sygnałów czasowych:

- z widma w całym zakresie częstotliwości (nr sygnału = 1),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz (nr sygnału = 2),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr sygnału = 3),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz sygnału resztkowego (nr sygnału = 4),
- z widma w zakresie $0,5 f_z$ do $1,5 f_z$ (nr sygnału = 5).

Sygnał cepstrum został podzielony na 20 równych przedziałów, dla których wyznaczono następujące miary: współczynnik zmienności (nr zmiennej = 1), współczynnik szczytu (nr zmiennej = 2), współczynnik luzu (nr zmiennej = 3), współczynnik kształtu (nr zmiennej = 4), współczynnik impulsowości (nr zmiennej = 5), współczynnik asymetrii (nr zmiennej = 6), dyskryminante X4 (nr zmiennej = 7), dyskryminante X6 (nr zmiennej = 8), dyskryminante X8 (nr zmiennej = 9), dyskryminante X10 (nr zmiennej = 10), energia sygnału (nr zmiennej = 11), odchylenie ćwiartkowe (nr zmiennej = 12), odchylenie przeciętne (nr zmiennej = 13), wartość skuteczna (nr zmiennej = 14), wartość średnia arytmetyczna (nr zmiennej = 15), wartość średnia geometryczna (nr zmiennej = 16), wartość średnia harmoniczna (nr zmiennej = 17), mediana (nr zmiennej = 18), pozycyjny współczynnik zmienności (nr zmiennej = 19), kwartyl pierwszy (nr zmiennej = 20), kwartyl trzeci (nr zmiennej = 21), wariancje (nr zmiennej = 22), odchylenie standardowe (nr zmiennej = 23), kurtoze (nr zmiennej = 24), wartość maksymalna (nr zmiennej = 25), wartość minimalna (nr zmiennej = 26), wartość międzyszczytowa (nr zmiennej = 27), pierwszy moment centralny (nr zmiennej = 28), drugi moment centralny (nr zmiennej = 29), trzeci moment centralny (nr zmiennej = 30).

zmiennej = 30), czwarty moment centralny (nr zmiennej = 31), piąty moment centralny (nr zmiennej = 32), szósty moment centralny (nr zmiennej = 33), siódmy moment centralny (nr zmiennej = 34), ósmy moment centralny (nr zmiennej = 35), dziewiąty moment centralny (nr zmiennej = 36), dziesiąty moment centralny (nr zmiennej = 37), kumulantę rzędu drugiego (nr zmiennej = 38), kumulantę rzędu trzeciego (nr zmiennej = 39), kumulantę rzędu czwartego (nr zmiennej = 40). Na wejście sieci podawano wybraną miarę obliczoną dla kolejnych zakresów. Analizowana architektura klasyfikatora SVM posiadała 20 neuronów wejściowych. Schemat klasyfikatora stopnia podcięcia stopy zęba przedstawiono na rys. 2.



Rys. 4. Architektura klasyfikatora stopnia podcięcia zęba

Fig. 4. Structure of neural network

3. WYNIKI I WNIOSKI EKSPERYMENTU

Tabela 1 przedstawia wyniki eksperymentu. Składa się ona z dziesięciu kolumn, w których kolejno przedstawiono liczbę porządkową, numer analizy, numer zmiennej, wartości współczynników γ i C , złożoność sieci (SV), ilość błędów w czasie procesu uczenia sieci i jej procentową wartość, ilość błędów w czasie procesu testowania sieci i jej procentową wartość. W tabeli przedstawiono tylko najlepszy uzyskany wynik dla danej miary wejściowej ze względu na dużą ilość analizowanych klasyfikatorów neuronowych. W sumie badania objęły 9800 sztucznych sieci neuronowych typu SVM.

Tabela 1

Wyniki eksperymentu

Lp.	Nr analizy	Nr zmiennej	γ	C	SV	Uczenie		Testowanie	
						Ilość błędów	% błędów	Ilość błędów	% błędów
1	1	1	0,10	3,00	552	6	1,08	179	32,25
2	1	2	0,10	3,00	487	28	5,04	168	30,27
3	1	3	0,10	3,00	476	132	23,74	263	47,39
4	1	4	0,10	3,00	552	6	1,08	179	32,25
5	1	5	0,10	3,00	479	37	6,65	161	29,01
6	1	6	0,10	3,00	509	34	6,12	159	28,65
7	1	7	0,10	3,00	502	45	8,09	151	27,21
8	1	8	0,10	3,00	490	85	15,29	176	31,71
9	1	9	0,10	3,00	490	109	19,60	185	33,33
10	1	10	0,10	3000,00	383	90	16,19	194	34,95
11	1	11	0,10	3,00	470	18	3,24	160	28,83
12	1	12	0,10	0,30	504	191	34,35	262	47,21
13	1	13	0,10	300,00	554	6	1,08	183	32,97
14	1	14	0,10	3,00	554	6	1,08	168	30,27
15	1	15	0,10	3,00	551	6	1,08	188	33,87
16	1	16	0,10	0,30	504	207	37,23	246	44,32
17	1	17	0,10	0,30	544	290	52,16	368	66,31
18	1	18	0,10	300,00	447	101	18,17	247	44,50
19	1	19	0,10	30,00	532	298	53,60	369	66,49
20	1	20	0,10	30,00	477	256	46,04	293	52,79
21	1	21	0,10	300,00	555	6	1,08	208	37,48
22	1	22	0,10	3,00	470	19	3,42	162	29,19
23	1	23	0,10	3,00	554	6	1,08	168	30,27
24	1	24	0,10	3,00	502	45	8,09	151	27,21
25	1	25	0,10	300,00	454	6	1,08	147	26,49
26	1	26	0,10	3,00	553	371	66,73	403	72,61
27	1	27	0,10	3,00	480	13	2,34	148	26,67
28	1	29	0,10	3,00	470	19	3,42	162	29,19
29	1	29	0,10	3,00	470	19	3,42	162	29,19
30	1	30	0,10	30,00	432	6	1,08	140	25,23
31	1	31	0,10	300,00	397	6	1,08	159	28,65
32	1	32	0,10	30,00	399	40	7,19	172	30,99
33	1	33	0,10	3000,00	370	91	16,37	193	34,77
34	1	34	0,10	3000,00	388	111	19,96	198	35,68
35	1	35	0,10	3000,00	402	137	24,64	206	37,12
36	1	36	0,10	30,00	465	38	6,83	215	38,74
37	1	37	0,10	300,00	421	20	3,60	221	39,82
38	1	38	0,10	3,00	470	19	3,42	162	29,19
39	1	39	0,10	30,00	432	6	1,08	140	25,23
40	1	40	0,10	300,00	379	88	15,83	160	28,83
41	2	1	0,10	3,00	410	26	4,68	63	11,35

cd. tab. 1

42	2	2	0,10	3,00	473	13	2,34	105	18,92
43	2	3	0,10	3,00	471	40	7,19	145	26,13
44	2	4	0,10	3,00	410	26	4,68	63	11,35
45	2	5	0,10	3,00	479	7	1,26	50	9,01
46	2	6	0,10	3,00	509	7	1,26	56	10,09
47	2	7	0,10	0,30	549	22	3,96	59	10,63
48	2	8	0,10	3,00	524	6	1,08	67	12,07
49	2	9	0,10	3,00	511	7	1,26	79	14,23
50	2	10	0,10	3,00	503	17	3,06	111	20,00
51	2	11	0,10	3,00	449	12	2,16	75	13,51
52	2	12	0,10	3,00	500	55	9,89	262	47,21
53	2	13	0,10	3,00	555	6	1,08	78	14,05
54	2	14	0,10	3,00	426	18	3,24	54	9,73
55	2	15	0,10	3,00	553	6	1,08	78	14,05
56	2	16	0,10	0,30	556	8	1,44	238	42,88
57	2	17	0,10	0,30	556	7	1,26	411	74,05
58	2	18	0,10	3,00	493	82	14,75	254	45,77
59	2	19	0,10	3000,00	526	275	49,46	387	69,73
60	2	20	0,10	3,00	556	6	1,08	313	56,40
61	2	21	0,10	0,30	556	8	1,44	215	38,74
62	2	22	0,10	3,00	449	11	1,98	75	13,51
63	2	23	0,10	3,00	426	18	3,24	54	9,73
64	2	24	0,10	0,30	549	22	3,96	59	10,63
65	2	25	0,10	3,00	470	7	1,26	45	8,11
66	2	26	0,10	3,00	556	6	1,08	435	78,38
67	2	27	0,10	3,00	475	7	1,26	45	8,11
68	2	29	0,10	3,00	449	11	1,98	75	13,51
69	2	29	0,10	3,00	449	11	1,98	75	13,51
70	2	30	0,10	3,00	451	26	4,68	96	17,30
71	2	31	0,10	30,00	383	18	3,24	111	20,00
72	2	32	0,10	30000,00	265	16	2,88	118	21,26
73	2	33	0,10	30000,00	290	36	6,47	139	25,05
74	2	34	0,10	30,00	420	98	17,63	157	28,29
75	2	35	0,10	30,00	452	46	8,27	158	28,47
76	2	36	0,10	30,00	448	61	10,97	171	30,81
77	2	37	0,10	300,00	406	43	7,73	173	31,17
78	2	38	0,10	3,00	449	11	1,98	75	13,51
79	2	39	0,10	3,00	451	26	4,68	96	17,30
80	2	40	0,10	3000,00	282	26	4,68	108	19,46
81	3	1	0,10	30,00	552	6	1,08	91	16,40
82	3	2	0,10	3,00	481	23	4,14	171	30,81
83	3	3	0,10	3,00	556	6	1,08	192	34,59
84	3	4	0,10	30,00	552	6	1,08	91	16,40
85	3	5	0,10	3,00	480	14	2,52	99	17,84
86	3	6	0,10	300,00	476	6	1,08	114	20,54
87	3	7	0,10	3,00	501	14	2,52	121	21,80

cd. tab. 1

88	3	8	0,10	3,00	506	14	2,52	133	23,96
89	3	9	0,10	3,00	504	32	5,76	165	29,73
90	3	10	0,10	3,00	503	48	8,63	186	33,51
91	3	11	0,10	30000,00	554	6	1,08	88	15,86
92	3	12	0,10	300,00	480	120	21,58	260	46,85
93	3	13	0,10	0,30	553	15	2,70	100	18,02
94	3	14	0,10	3,00	546	6	1,08	65	11,71
95	3	15	0,10	3,00	520	6	1,08	95	17,12
96	3	16	0,10	30,00	476	33	5,94	261	47,03
97	3	17	0,10	3000,00	513	55	9,89	419	75,50
98	3	18	0,10	3,00	556	6	1,08	263	47,39
99	3	19	0,10	3000,00	537	297	53,42	363	65,41
100	3	20	0,10	3,00	524	72	12,95	324	58,38
101	3	21	0,10	0,30	552	44	7,91	224	40,36
102	3	22	0,10	30,00	410	8	1,44	102	18,38
103	3	23	0,10	3,00	546	6	1,08	65	11,71
104	3	24	0,10	3,00	501	14	2,52	121	21,80
105	3	25	0,10	3,00	467	12	2,16	96	17,30
106	3	26	0,10	30,00	545	135	24,28	417	75,14
107	3	27	0,10	3,00	466	12	2,16	97	17,48
108	3	29	0,10	30,00	410	8	1,44	102	18,38
109	3	29	0,10	30,00	410	8	1,44	102	18,38
110	3	30	0,10	3,00	479	21	3,78	116	20,90
111	3	31	0,10	3,00	481	41	7,37	153	27,57
112	3	32	0,10	30,00	429	13	2,34	175	31,53
113	3	33	0,10	3,00	482	85	15,29	188	33,87
114	3	34	0,10	30,00	449	36	6,47	206	37,12
115	3	35	0,10	30,00	447	59	10,61	224	40,36
116	3	36	0,10	30,00	445	77	13,85	239	43,06
117	3	37	0,10	3000,00	421	116	20,86	252	45,41
118	3	38	0,10	30,00	410	8	1,44	102	18,38
119	3	39	0,10	3,00	479	21	3,78	116	20,90
120	3	40	0,10	3,00	487	35	6,29	160	28,83
121	4	1	0,10	30,00	540	6	1,08	96	17,30
122	4	2	0,10	3,00	494	26	4,68	186	33,51
123	4	3	0,10	3,00	555	6	1,08	202	36,40
124	4	4	0,10	30,00	540	6	1,08	96	17,30
125	4	5	0,10	3,00	481	21	3,78	136	24,50
126	4	6	0,10	3,00	490	22	3,96	129	23,24
127	4	7	0,10	3,00	496	19	3,42	123	22,16
128	4	8	0,10	30000,00	479	6	1,08	137	24,68
129	4	9	0,10	300,00	445	6	1,08	149	26,85
130	4	10	0,10	300,00	415	6	1,08	166	29,91
131	4	11	0,10	3,00	444	48	8,63	98	17,66
132	4	12	0,10	0,30	556	9	1,62	263	47,39
133	4	13	0,10	3,00	535	6	1,08	80	14,41

cd. tab. 1

134	4	14	0,10	3,00	534	6	1,08	81	14,59
135	4	15	0,10	3,00	495	7	1,26	96	17,30
136	4	16	0,10	0,30	552	18	3,24	243	43,78
137	4	17	0,10	0,30	553	311	55,94	397	71,53
138	4	18	0,10	0,30	551	15	2,70	235	42,34
139	4	19	0,10	0,30	551	253	45,50	339	61,08
140	4	20	0,10	3,00	515	60	10,79	297	53,51
141	4	21	0,10	3,00	545	6	1,08	208	37,48
142	4	22	0,10	3,00	464	30	5,40	113	20,36
143	4	23	0,10	3,00	534	6	1,08	81	14,59
144	4	24	0,10	3,00	496	19	3,42	123	22,16
145	4	25	0,10	3,00	473	22	3,96	131	23,60
146	4	26	0,10	30,00	543	104	18,71	408	73,51
147	4	27	0,10	3,00	474	23	4,14	132	23,78
148	4	29	0,10	3,00	464	30	5,40	113	20,36
149	4	29	0,10	3,00	464	30	5,40	113	20,36
150	4	30	0,10	3,00	477	26	4,68	133	23,96
151	4	31	0,10	3,00	473	41	7,37	157	28,29
152	4	32	0,10	3,00	480	65	11,69	183	32,97
153	4	33	0,10	30,00	431	23	4,14	187	33,69
154	4	34	0,10	3,00	542	6	1,08	196	35,32
155	4	35	0,10	3,00	535	10	1,80	194	34,95
156	4	36	0,10	300,00	508	6	1,08	215	38,74
157	4	37	0,10	3,00	505	18	3,24	215	38,74
158	4	38	0,10	3,00	464	30	5,40	113	20,36
159	4	39	0,10	3,00	477	26	4,68	133	23,96
160	4	40	0,10	3,00	477	42	7,55	166	29,91
161	5	1	0,10	3000,00	456	22	3,96	302	54,41
162	5	2	0,10	0,30	552	71	12,77	277	49,91
163	5	3	0,10	30,00	543	12	2,16	356	64,14
164	5	4	0,10	3000,00	456	22	3,96	302	54,41
165	5	5	0,10	0,30	554	72	12,95	265	47,75
166	5	6	0,10	3,00	513	122	21,94	256	46,13
167	5	7	0,10	3,00	551	10	1,80	276	49,73
168	5	8	0,10	300,00	537	6	1,08	289	52,07
169	5	9	0,10	30,00	485	82	14,75	288	51,89
170	5	10	0,10	30,00	487	123	22,12	306	55,14
171	5	11	0,10	0,30	547	172	30,94	298	53,69
172	5	12	0,10	3,00	540	79	14,21	345	62,16
173	5	13	0,10	3,00	526	62	11,15	273	49,19
174	5	14	0,10	30,00	510	13	2,34	277	49,91
175	5	15	0,10	3,00	524	71	12,77	270	48,65
176	5	16	0,10	3,00	556	6	1,08	334	60,18
177	5	17	0,10	30,00	546	309	55,58	419	75,50
178	5	18	0,10	30,00	530	234	42,09	357	64,32
179	5	19	0,10	3000,00	544	275	49,46	394	70,99

cd. tab. 1

180	5	20	0,10	30,00	541	211	37,95	368	66,31
181	5	21	0,10	3,00	528	101	18,17	315	56,76
182	5	22	0,10	0,30	537	188	33,81	291	52,43
183	5	23	0,10	30,00	510	13	2,34	277	49,91
184	5	24	0,10	3,00	551	10	1,80	276	49,73
185	5	25	0,10	3,00	536	33	5,94	262	47,21
186	5	26	0,10	3,00	554	352	63,31	438	78,92
187	5	27	0,10	3,00	535	34	6,12	261	47,03
188	5	29	0,10	0,30	537	188	33,81	291	52,43
189	5	29	0,10	0,30	537	188	33,81	291	52,43
190	5	30	0,10	30,00	489	223	40,11	295	53,15
191	5	31	0,10	30,00	492	266	47,84	297	53,51
192	5	32	0,10	3000,00	479	277	49,82	302	54,41
193	5	33	0,10	3000,00	485	292	52,52	308	55,50
194	5	34	0,10	30000,00	480	287	51,62	318	57,30
195	5	35	0,10	3000,00	478	259	46,58	311	56,04
196	5	36	0,10	3000,00	486	278	50,00	311	56,04
197	5	37	0,10	3000,00	485	288	51,80	323	58,20
198	5	38	0,10	0,30	537	188	33,81	291	52,43
199	5	39	0,10	30,00	489	223	40,11	295	53,15
200	5	40	0,10	3000,00	482	263	47,30	330	59,46

Najmniejszy procent błędu testowania uzyskano dla wartości międzyszczytowej dla sygnału z widma w zakresie 0 do 6 kHz. Klasyfikator neuronowy typu SVM uzyskał błąd testowania na poziomie 8,11%, natomiast uczenia 1,26%.

Dalsze badania mogą objąć poszukiwanie odpowiednich miar sygnałów uzyskanych z bispectrum, transformaty Wignera-Ville'a lub zastosowania innego rodzaju sztucznej sieci neuronowej.

Literatura

1. Badaoui M., Guillet F., Daniere J.: New applications of the real cepstrum to gear signals, including definition of a robust fault indicator. Mechanical Systems and Signal Processing 18/2004.
2. Badaoui M., Antoni J., Guillet F., Daniere J.: Use of the moving cepstrum integral to detect and localize tooth spalls in gears. Mechanical Systems and Signal Processing 15/2001.
3. Cempel Cz.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT, Warszawa 1982.
4. Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
5. Mangasarian O. L.: Lagrangian Support Vector Machines, Journal of Machine Learning Research, 2001.
6. Meltzer G., Ivanow Y.: Fault detection in gear drives with non-stationary rotational speed - part I: The time-frequency approach. Mechanical Systems and Signal Processing 17(5)/2003.

7. Meltzer G., Ivanow Y.: Fault detection in gear drives with non-stationary rotational speed - part II: The time-quefreny approach. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(2)/2003.
8. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
9. Radkowski S.: Wykorzystanie SWA w diagnozowaniu zmęczeniowych uszkodzeń kół zębatach. II Seminarium „Wibroakustyczna diagnostyka Procesów Zmęczeniowych”. Warszawa 2002.
10. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Publikacja powstała w wyniku realizacji pracy BW-441/RT-2/2004.