

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH

KLASYFIKACJA STOPNIA PODCIĘCIA STOPY ZĘBA OPARTA NA SIECI NEURONOWEJ SVM I TRANSFORMACIE FOURIERA

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 selekcji widmowej sygnałów wibroakustycznych.

CLASTFICATION DEGREE OF TOOTH ROOT CRACKING IDENTYFICATION SYSTEM BY USING SVM NEURAL NETWORK AND FFT

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 experiment was used Fourier transform.

1. WPROWADZENIE

Wzrost wymagań dotyczących bezpieczeństwa i niezawodności części maszyn powoduje dynamiczny rozwój metod diagnostyki. Wykrycie uszkodzenia już we wczesnej fazie może zapobiec uszkodzeniu maszyny i wynikających stąd wysokich strat ekonomicznych, a w niektórych przypadkach nawet zagrożeniu życia ludzkiego.

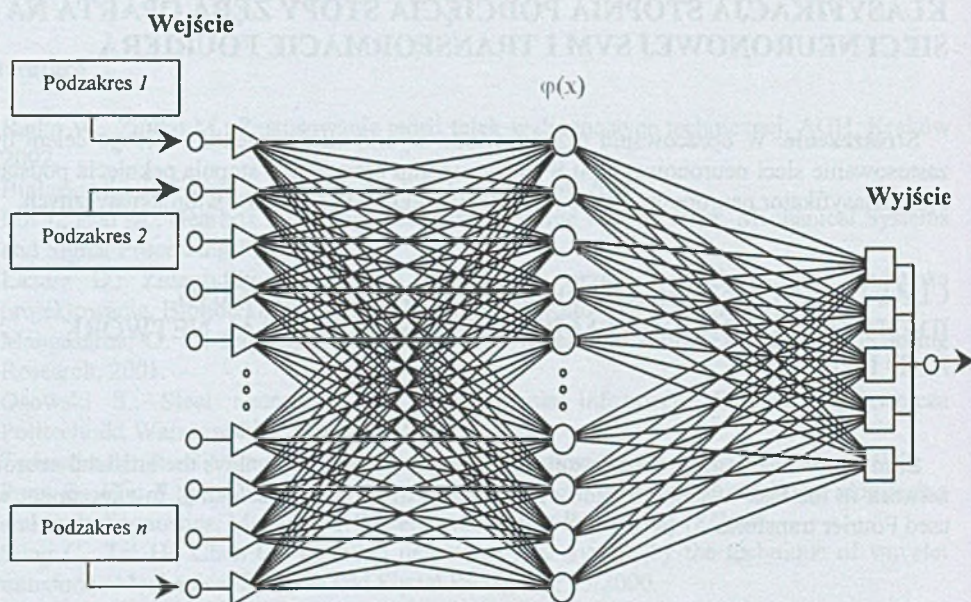
Jedną z nowoczesnych metod diagnostyki technicznej jest diagnostyka wykorzystująca sygnał wibroakustyczny [10]. Estymując sygnał WA wyznacza się wartości danej cechy punktowej lub funkcyjnej [2]. Do podstawowych cech funkcyjnych sygnałów w dziedzinie częstotliwości należy gęstość widmowa. Metoda jej wyznaczania oparta jest na analizie Fouriera. Analiza ta posłużyła za metodę generacji residuów [1,6,7].

Coraz częściej zawarte w sygnale symptomy uszkodzenia analizuje się za pomocą metod sztucznej inteligencji [2,4]. Metody te oprócz możliwości uczenia na podstawie zebranych danych pozwalają modelować dowolne nieliniowości, charakteryzują się odpornością na zakłócenia oraz zdolnością do uogólniania wiedzy [2].

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentu mającego na celu wykorzystania selekcji widmowej sygnałów drganiowych w klasyfikatorze neuronowym typu SVM.

2. OPIS EKSPERYMENTU

Celem eksperymentu było zastosowanie sztucznej sieci neuronowej w problemie oceny stopnia pęknięcia u podstawy zęba. W eksperymencie posłużono się sztuczną siecią neuronową typu SVM z jądrem radialnym (rys. 1), [5].



Rys. 1. Architektura sztucznej sieci neuronowej użytej w eksperymencie

Fig. 1. Structure of artificial neural network used in experiment

W badaniach wykorzystano zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej pracującej w układzie mocy krążącej [3].

Zidentyfikowany model posłużył do symulacji przyspieszeń drgań wału zębnika. Zasymulowano uszkodzenia w postaci podcięcia w stopie zęba. Zaawansowanie pęknięcia u podstawy zęba polegało na obniżeniu jego sztywności o ustaloną wartość w stosunku do sztywności zęba nieuszkodzonego.

Przeprowadzono symulację dla zmiany sztywności w zakresie od 0 do 100%. Symulacje zostały przeprowadzone dla różnych klas dokładności wykonania kół zębatych oraz dla różnych wartości błędów cyklicznych i losowych. Symulacje zostały podzielone na trzy serie:

1) seria pierwsza:

- błąd cykliczny dla zębnika: $0 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błąd cykliczny dla koła: $0 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błędy losowe $\rightarrow$ maksymalny błąd wykonania zębnika: $0 \mu\text{m}$,
- błędy losowe $\rightarrow$ maksymalny błąd wykonania koła: $0 \mu\text{m}$,

2) seria druga:

- błąd cykliczny dla zębnika: $-7 \mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błąd cykliczny dla koła: $5 \mu\text{m}$ /długość podziałki,

- błędy losowe → maksymalny błąd wykonania zębika: $\pm 4,5 \mu\text{m}$,
- błędy losowe → maksymalny błąd wykonania koła: $\pm 4,5 \mu\text{m}$,

3) seria trzecia:

- błąd cykliczny dla zębika: $-14 \mu\text{m}/\text{długość podziałki}$,
- błąd cykliczny dla koła: $10 \mu\text{m}/\text{długość podziałki}$,
- błędy losowe → maksymalny błąd wykonania zębika: $\pm 9 \mu\text{m}$,
- błędy losowe → maksymalny błąd wykonania koła: $\pm 9 \mu\text{m}$.

W sumie otrzymano 1111 symulacji.

Z uzyskanych z symulacji sygnałów przyspieszeń drgań poprzecznych wału zębika obliczono transformatę Fouriera, wyznaczając widma przyspieszeń drgań w zakresie od 0 do 6 kHz.

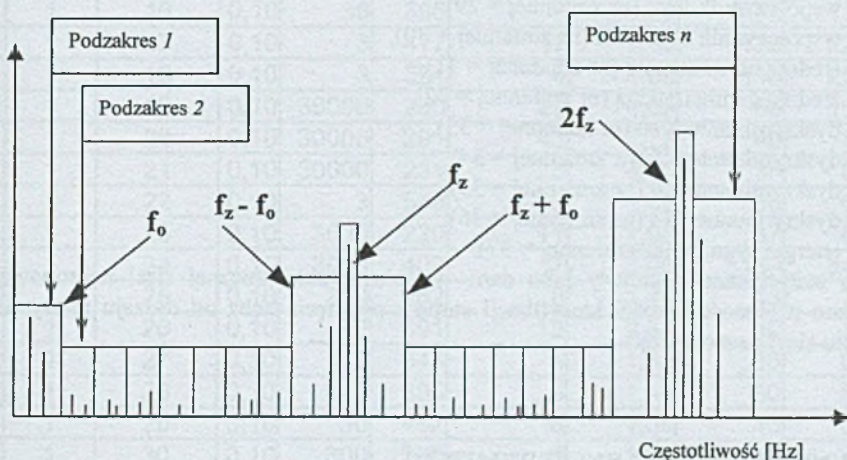
Pasmo częstotliwości podzielono na następujące podzakresy (rys. 2):

- podzakres częstotliwości w zakresie od 0 do częstotliwości obrotowej kół f_0 ,
- podzakresy równe kolejnym częstotliwościom zazębienia $i \cdot f_z$,
- podzakresy równe częstotliwością $i \cdot f_z - f_0$,
- podzakresy równe częstotliwością $i \cdot f_z + f_0$.

Zakres częstotliwości pomiędzy f_0 i $f_z - f_0$ oraz zakresy częstotliwości od $i \cdot f_z + f_0$ do $(i+1) \cdot f_z - f_0$ podzielono na podzakresy. W eksperymencie zbadano wpływ ilości podzakresów na jakość klasyfikacji pęknięcia stopy zęba. Zakres częstotliwości pomiędzy f_0 i $f_z - f_0$ oraz zakresy częstotliwości od $i \cdot f_z + f_0$ do $(i+1) \cdot f_z - f_0$ podzielono na:

- 3 (nr analizy = 1),
- 7 (nr analizy = 2),
- 14 (nr analizy = 3)

podzakresów o szerokości odpowiednio ok. 250, 100, 50 Hz.



Rys. 2. Podział widma przyspieszeń drgań na podzakresy

Fig. 2. Share spectrum out

Dla uzyskanych w ten sposób zakresów częstotliwości obliczono miary statystyczne [3,5,9,10]:

- średnią arytmetyczną (nr zmiennej = 1),
- kurtozę (nr zmiennej = 2),
- wartość skuteczną (nr zmiennej = 3),

- moment centralny rzędu pierwszego (nr zmiennej = 4),
- moment centralny rzędu drugiego (nr zmiennej = 5),
- moment centralny rzędu trzeciego (nr zmiennej = 6),
- moment centralny rzędu czwartego (nr zmiennej = 7),
- moment centralny rzędu piątego (nr zmiennej = 8),
- moment centralny rzędu szóstego (nr zmiennej = 9),
- moment centralny rzędu siódmego (nr zmiennej = 10),
- moment centralny rzędu ósmego (nr zmiennej = 11),
- moment centralny rzędu dziewiątego (nr zmiennej = 12),
- moment centralny rzędu dziesiątego (nr zmiennej = 13),
- kwartyl drugi (nr zmiennej = 14),
- kwartyl pierwszy (nr zmiennej = 15),
- kwartyl trzeci (nr zmiennej = 16),
- odchylenie ćwiartkowe (nr zmiennej = 17),
- pozycyjny współczynnik zmienności (nr zmiennej = 18),
- odchylenie przeciętne (nr zmiennej = 19),
- wariancje (nr zmiennej = 20),
- odchylenie standardowe (nr zmiennej = 21),
- współczynnik zmienności (nr zmiennej = 22),
- maksimum (nr zmiennej = 23),
- minimum (nr zmiennej = 24),
- wartość szczytową (nr zmiennej = 25),
- współczynnik szczytu (nr zmiennej = 26),
- współczynnik kształtu (nr zmiennej = 27),
- współczynnik impulsowości (nr zmiennej = 28),
- współczynnik luzu (nr zmiennej = 29),
- współczynnik asymetrii (nr zmiennej = 30),
- średnią harmoniczną (nr zmiennej = 31),
- średnią geometryczną (nr zmiennej = 32),
- dyskryminantę X10 (nr zmiennej = 33),
- dyskryminantę X8 (nr zmiennej = 34),
- dyskryminantę X6 (nr zmiennej = 35),
- dyskryminantę X4 (nr zmiennej = 36),
- energię sygnału (nr zmiennej = 37).

Miary statystyczne posłużyły jako dane wejściowe dla sztucznej sieci neuronowej [8,9]. Zbadano zależność jakości klasyfikacji stopnia podcięcia zęba od rodzaju miary użytej na wejściu sieci neuronowej.

3. WYNIKI I WNIOSKI EKSPERYMENTU

Wyniki eksperymentu zostały przedstawione w tab. 1. 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 i danej ilości podziału na podzakresy. Badania objęły 27195 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	30000	222	16	2,88	50	9,01
2	1	2	0,10	3	410	11	1,98	36	6,49
3	1	3	0,10	30000	220	23	4,14	36	6,49
4	1	4	0,10	0,03	556	440	79,14	440	79,28
5	1	5	0,10	30000	291	43	7,73	49	8,83
6	1	6	0,10	3000	224	7	1,26	40	7,21
7	1	7	0,10	3000	222	8	1,44	51	9,19
8	1	8	0,10	3000	276	11	1,98	53	9,55
9	1	9	0,10	300	333	34	6,12	57	10,27
10	1	10	0,10	30000	244	35	6,29	61	10,99
11	1	11	0,10	3000	329	43	7,73	66	11,89
12	1	12	0,10	3000	339	60	10,79	77	13,87
13	1	13	0,10	300	478	64	11,51	102	18,38
14	1	14	0,10	3	469	36	6,47	90	16,22
15	1	15	0,10	30000	447	6	1,08	109	19,64
16	1	16	0,10	30	396	7	1,26	74	13,33
17	1	17	0,10	3	477	17	3,06	126	22,70
18	1	18	0,10	3	534	6	1,08	115	20,72
19	1	19	0,10	30000	230	27	4,86	59	10,63
20	1	20	0,10	30000	291	43	7,73	49	8,83
21	1	21	0,10	30000	231	25	4,50	36	6,49
22	1	22	0,10	3	548	6	1,08	35	6,31
23	1	23	0,10	3000	220	11	1,98	37	6,67
24	1	24	0,10	3000	403	17	3,06	189	34,05
25	1	25	0,10	300	282	8	1,44	43	7,75
26	1	26	0,10	3	391	13	2,34	40	7,21
27	1	27	0,10	3	548	6	1,08	35	6,31
28	1	28	0,10	3	386	8	1,44	30	5,41
29	1	29	0,10	30	452	6	1,08	45	8,11
30	1	30	0,10	300	265	6	1,08	40	7,21
31	1	31	0,10	300	266	20	3,60	45	8,11
32	1	32	0,10	3	410	11	1,98	36	6,49
33	1	33	0,10	3	419	9	1,62	28	5,05
34	1	34	0,10	3	422	9	1,62	32	5,77
35	1	35	0,10	300	235	8	1,44	39	7,03
36	1	36	0,10	300	311	28	5,04	78	14,05
37	1	37	0,10	3000	338	6	1,08	145	26,13
38	2	1	0,10	3000	279	26	4,68	52	9,37

cd. tab. 1

39	2	2	0,10	300	286	6	1,08	29	5,23
40	2	3	0,10	3000	272	20	3,60	43	7,75
41	2	4	0,10	0,03	556	440	79,14	440	79,28
42	2	5	0,10	30	404	10	1,80	45	8,11
43	2	6	0,10	3000	228	7	1,26	44	7,93
44	2	7	0,10	30000	215	6	1,08	43	7,75
45	2	8	0,10	3000	279	12	2,16	52	9,37
46	2	9	0,10	300	339	34	6,12	57	10,27
47	2	10	0,10	30000	243	35	6,29	59	10,63
48	2	11	0,10	3000	335	41	7,37	66	11,89
49	2	12	0,10	3000	344	60	10,79	77	13,87
50	2	13	0,10	3000	360	79	14,21	102	18,38
51	2	14	0,10	3	500	11	1,98	78	14,05
52	2	15	0,10	3	526	10	1,80	105	18,92
53	2	16	0,10	30	448	7	1,26	73	13,15
54	2	17	0,10	3	525	6	1,08	125	22,52
55	2	18	0,10	30	556	6	1,08	108	19,46
56	2	19	0,10	3000	287	22	3,96	53	9,55
57	2	20	0,10	30	404	10	1,80	45	8,11
58	2	21	0,10	3000	282	19	3,42	41	7,39
59	2	22	0,10	30	434	6	1,08	28	5,05
60	2	23	0,10	300	260	11	1,98	30	5,41
61	2	24	0,10	3	503	30	5,40	238	42,88
62	2	25	0,10	30	356	8	1,44	33	5,95
63	2	26	0,10	0,30	516	8	1,44	34	6,13
64	2	27	0,10	30	434	6	1,08	28	5,05
65	2	28	0,10	3	496	7	1,26	29	5,23
66	2	29	0,10	0,30	554	6	1,08	41	7,39
67	2	30	0,10	30	314	7	1,26	36	6,49
68	2	31	0,10	30000	238	25	4,50	51	9,19
69	2	32	0,10	300	286	6	1,08	29	5,23
70	2	33	0,10	30	264	7	1,26	31	5,59
71	2	34	0,10	3	494	6	1,08	29	5,23
72	2	35	0,10	300	229	6	1,08	32	5,77
73	2	36	0,10	300	316	11	1,98	73	13,15
74	2	37	0,10	3	544	7	1,26	133	23,96
75	3	1	0,10	300	356	29	5,22	44	7,93
76	3	2	0,10	0,30	499	12	2,16	31	5,59
77	3	3	0,10	30	402	6	1,08	41	7,39
78	3	4	0,10	0,03	556	440	79,14	440	79,28
79	3	5	0,10	30000	239	13	2,34	55	9,91
80	3	6	0,10	3000	273	10	1,80	49	8,83
81	3	7	0,10	30000	237	6	1,08	47	8,47
82	3	8	0,10	3000	292	10	1,80	46	8,29
83	3	9	0,10	300	342	32	5,76	50	9,01
84	3	10	0,10	300	368	53	9,53	60	10,81

cd. tab. 1

85	3	11	0,10	3000	333	42	7,55	60	10,81
86	3	12	0,10	3000	350	60	10,79	74	13,33
87	3	13	0,10	30000	299	45	8,09	81	14,59
88	3	14	0,10	3	533	6	1,08	74	13,33
89	3	15	0,10	30	449	6	1,08	94	16,94
90	3	16	0,10	30	516	6	1,08	58	10,45
91	3	17	0,10	30	431	6	1,08	112	20,18
92	3	18	0,10	30	517	6	1,08	112	20,18
93	3	19	0,10	3	482	12	2,16	49	8,83
94	3	20	0,10	30000	239	13	2,34	55	9,91
95	3	21	0,10	300	336	28	5,04	43	7,75
96	3	22	0,10	3000	310	6	1,08	27	4,86
97	3	23	0,10	30	401	6	1,08	34	6,13
98	3	24	0,10	3	530	9	1,62	203	36,58
99	3	25	0,10	3	449	12	2,16	37	6,67
100	3	26	0,10	3	541	6	1,08	32	5,77
101	3	27	0,10	3000	310	6	1,08	27	4,86
102	3	28	0,10	30	314	6	1,08	26	4,68
103	3	29	0,10	3	425	6	1,08	29	5,23
104	3	30	0,10	30	418	6	1,08	33	5,95
105	3	31	0,10	3000	314	31	5,58	49	8,83
106	3	32	0,10	0,30	499	12	2,16	31	5,59
107	3	33	0,10	0,30	507	8	1,44	25	4,50
108	3	34	0,10	0,30	503	8	1,44	24	4,32
109	3	35	0,10	0,30	506	10	1,80	25	4,50
110	3	36	0,10	30	516	6	1,08	59	10,63
111	3	37	0,10	3	491	23	4,14	124	22,34

Najmniejszy procent błędów testowania uzyskano dla podziału na czternaście podzakresów. Najlepszą miarą okazała się dyskryminanta X8. Sztuczna sieć neuronowa uzyskała błąd testowania wynoszący 4,32%, a błąd uczenia 1,44%. Równocześnie dla tej samej miary błąd uczenia i testowania w przypadku innego podziału na ilość podzakresów wynosił:

- 3 podzakresy → błąd uczenia-1,62%, błąd testowania-5,77%,
- 7 podzakresów → błąd uczenia-1,08%, błąd testowania-5,23%.

Można więc zauważyć tendencję spadku wielkości błędu testowania i uczenia wraz ze zwiększeniem ilości podzakresów, na jakie dzielimy zakres częstotliwości pomiędzy f_0 i f_z oraz zakresy częstotliwości od $i \cdot f_z + f_0$ do $(i+1) \cdot f_z - f_0$.

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

Literatura

1. Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. *Mechanical Systems and Signal Processing* 14(3)/2000.
2. Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
3. Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
4. Łazarz B., Czech P.: Wykorzystanie sieci neuronowych do identyfikacji pęknięcia stopy zęba. *Diagnostyka* Vol. 31/2004.
5. Mangasarian O. L.: Lagrangian Support Vector Machines, *Journal of Machine Learning Research*, 2001.
6. Meltzer G., Ivanow Yu. Ye: 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 Yu. Ye: Fault detection in gear drives with non-stationary rotational speed – part II: the time-quefrency approach. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(2)/2003.
8. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
9. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
10. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Vibration Processing Techniques for Fault Detection in Gearboxes, *Proceedings of DETC'2003 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* Chicago, Illinois, USA, 2003.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

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