

Bogusław LAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH

KLASYFIKATOR NEURONOWY SVM OPARTY NA CIĄGŁEJ TRANSFORMACIE FALKOWEJ

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 uzyskanych z ciągłej analizy falkowej.

SVM AND CWT AS A NEURAL NETWORK CLASYFIKATOR

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 continuous wavelets transform (CWT) and SVM neural network.

1. WPROWADZENIE

Głównym celem diagnostyki maszyn jest wykrycie uszkodzeń już we wczesnej fazie ich wystąpienia. Szczególne znaczenie mają w tym przypadku metody diagnostyki nieinwazyjnej, do których należą metody diagnostyki wibroakustycznej [12]. Wykorzystują one jako nośnik informacji sygnał drganiowy i akustyczny. Zawarte w sygnale symptomy uszkodzenia są trudne do zidentyfikowania na podstawie surowych danych pomiarowych. Do analizy zmierzonych sygnałów WA i identyfikacji na ich podstawie rodzaju i stopnia uszkodzenia stosuje się szereg metod analizy sygnałów. Do jednej z metod, stosowanych obecnie z dużym powodzeniem, należy ciągła analiza falkowa (Continuous Wavelet Transform - CWT) [1,3,5,10,13]. Charakteryzuje ją zależność matematyczna [7]:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

gdzie:

$a \in R^+ - \{0\}$ - współczynnik skali,

$b \in R$ - parametr przesunięcia w dziedzinie czasu.

Transformata falkowa zapewnia automatyczne zawężenie okna przy analizie wysokich częstotliwości i jego poszerzenie dla niskich częstotliwości [2,4].

2. OPIS EKSPERYMENTU

Celem eksperymentu było zastosowanie sztucznej sieci neuronowej w problemie oceny stopnia pęknięcia u podstawy zęba.

W eksperymencie postanowiono sprawdzić przydatność ciągłej analizy falkowej w neuronowym klasyfikatorze. Przeanalizowano następujące falki:

haar (nr falki = 1), daubechies 2 (nr falki = 2), daubechies 3 (nr falki = 3), daubechies 4 (nr falki = 4), daubechies 5 (nr falki = 5), daubechies 6 (nr falki = 6), daubechies 7 (nr falki = 7), daubechies 8 (nr falki = 8), daubechies 9 (nr falki = 9), daubechies 10 (nr falki = 10), biorthogonal 1.3 (nr falki = 11), biorthogonal 1.5 (nr falki = 12), biorthogonal 2.2 (nr falki = 13), biorthogonal 2.4 (nr falki = 14), biorthogonal 2.6 (nr falki = 15), biorthogonal 2.8 (nr falki = 16), biorthogonal 3.1 (nr falki = 17), biorthogonal 3.3 (nr falki = 18), biorthogonal 3.5 (nr falki = 19), biorthogonal 3.7 (nr falki = 20), biorthogonal 3.9 (nr falki = 21), biorthogonal 4.4 (nr falki = 22), biorthogonal 5.5 (nr falki = 23), biorthogonal 6.8 (nr falki = 24), coiflets 1 (nr falki = 25), coiflets 2 (nr falki = 26), coiflets 3 (nr falki = 27), coiflets 4 (nr falki = 28), coiflets 5 (nr falki = 29), symlets 2 (nr falki = 30), symlets 3 (nr falki = 31), symlets 4 (nr falki = 32), symlets 5 (nr falki = 33), symlets 6 (nr falki = 34), symlets 7 (nr falki = 35), symlets 8 (nr falki = 36), morlet (nr falki = 37), mexican hat (nr falki = 38), meyer (nr falki = 39).

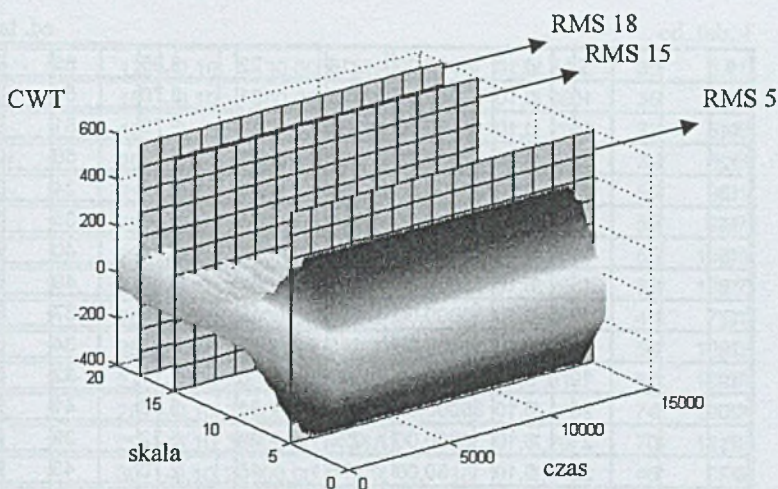
W badaniach wykorzystano zidentyfikowany model przekładni zębatej pracującej w układzie mocy krążącej, za pomocą którego zasymulowano uszkodzenie w postaci pęknięcia u podstawy zęba [6]. Symulowanie uszkodzenia polegało na obniżeniu sztywności zęba zębника o ustaloną wartość w stosunku do sztywności zęba nieuszkodzonego. Każdą symulację przeprowadzono 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. W rezultacie otrzymano 1111 sygnałów przyspieszeń poprzecznych drgań wałów przekładni zębatej.

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie ciągłej analizy falkowej 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).

Sprawdzono zależność wielkości błędu uczenia i testowania sieci SVM od rodzaju zastosowanej falki.

Za dane wejściowe dla klasyfikatora neuronowego SVM posłużyły wartości skuteczne obliczone w kolejnych 20 skalach CWT (rys. 1).



Rys. 1. Sposób uzyskania danych wejściowych dla SVM

Fig.1. Method of getting input data for SVM

3. WYNIKI I WNIOSKI EKSPERYMENTU

Wyniki eksperymentu przedstawiono w dziesięciokolumnowej tab. 1. Przedstawiono w niej liczbę porządkową, numer sygnału, numer falki, 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 [8,9,11].

Dla wymienionych sygnałów i rodzajów falek uczono i testowano klasyfikator neuronowy zmieniając jego parametry γ i C . W sumie przeanalizowano 9555 sieci neuronowych typu SVM. W tabeli przedstawiono tylko najlepsze uzyskane wyniki dla danego sygnału czasowego i danego rodzaju falki.

Tabela 1

Wyniki eksperymentu

Lp.	Nr sygnału	Nr falki	γ	C	SV	Uczenie		Testowanie	
						Ilość błędów	% błędów	Ilość błędów	% błędów
1	1	1	0,10	30000,00	288	40	7,19	36	6,49
2	1	2	0,10	30000,00	176	13	2,34	42	7,57
3	1	3	0,10	30000,00	188	13	2,34	42	7,57
4	1	4	0,10	300,00	308	21	3,78	56	10,09
5	1	5	0,10	30000,00	190	12	2,16	56	10,09
6	1	6	0,10	3000,00	234	24	4,32	62	11,17
7	1	7	0,10	30000,00	167	8	1,44	53	9,55
8	1	8	0,10	30000,00	249	31	5,58	51	9,19

cd. tab. 1

9	1	9	0,10	3000,00	218	22	3,96	55	9,91
10	1	10	0,10	3000,00	223	21	3,78	54	9,73
11	1	11	0,10	30,00	381	15	2,70	51	9,19
12	1	12	0,10	30000,00	267	43	7,73	56	10,09
13	1	13	0,10	30000,00	156	12	2,16	34	6,13
14	1	14	0,10	3000,00	218	25	4,50	35	6,31
15	1	15	0,10	30000,00	253	33	5,94	40	7,21
16	1	16	0,10	30000,00	243	31	5,58	49	8,83
17	1	17	0,10	30000,00	162	12	2,16	37	6,67
18	1	18	0,10	30000,00	245	33	5,94	34	6,13
19	1	19	0,10	30,00	332	15	2,70	32	5,77
20	1	20	0,10	30000,00	224	31	5,58	41	7,39
21	1	21	0,10	30000,00	224	29	5,22	39	7,03
22	1	22	0,10	30,00	375	15	2,70	43	7,75
23	1	23	0,10	30000,00	251	41	7,37	51	9,19
24	1	24	0,10	30000,00	249	32	5,76	53	9,55
25	1	25	0,10	30,00	358	16	2,88	43	7,75
26	1	26	0,10	30000,00	186	15	2,70	47	8,47
27	1	27	0,10	30000,00	257	34	6,12	60	10,81
28	1	28	0,10	30000,00	246	26	4,68	57	10,27
29	1	29	0,10	3000,00	223	21	3,78	56	10,09
30	1	30	0,10	30,00	361	18	3,24	45	8,11
31	1	31	0,10	30000,00	183	13	2,34	45	8,11
32	1	32	0,10	30000,00	189	15	2,70	52	9,37
33	1	33	0,10	30000,00	269	44	7,91	57	10,27
34	1	34	0,10	30000,00	254	35	6,29	59	10,63
35	1	35	0,10	30000,00	254	36	6,47	60	10,81
36	1	36	0,10	3000,00	225	23	4,14	56	10,09
37	1	37	0,10	30000,00	200	23	4,14	40	7,21
38	1	38	0,10	3000,00	315	37	6,65	60	10,81
39	1	39	0,10	30000,00	220	27	4,86	43	7,75
40	2	1	0,10	30000,00	180	20	3,60	42	7,57
41	2	2	0,10	30000,00	193	18	3,24	46	8,29
42	2	3	0,10	30000,00	207	16	2,88	50	9,01
43	2	4	0,10	30000,00	212	15	2,70	73	13,15
44	2	5	0,10	30000,00	211	16	2,88	71	12,79
45	2	6	0,10	30000,00	268	47	8,45	78	14,05
46	2	7	0,10	30000,00	272	39	7,01	72	12,97
47	2	8	0,10	30000,00	256	33	5,94	70	12,61
48	2	9	0,10	30000,00	264	39	7,01	77	13,87
49	2	10	0,10	30000,00	273	35	6,29	78	14,05
50	2	11	0,10	30000,00	195	16	2,88	44	7,93
51	2	12	0,10	30000,00	286	47	8,45	73	13,15
52	2	13	0,10	30,00	334	13	2,34	36	6,49
53	2	14	0,10	3000,00	233	29	5,22	43	7,75
54	2	15	0,10	30000,00	180	11	1,98	54	9,73
55	2	16	0,10	30000,00	200	9	1,62	77	13,87

cd. tab. 1

56	2	17	0,10	30,00	319	13	2,34	35	6,31
57	2	18	0,10	300,00	259	17	3,06	35	6,31
58	2	19	0,10	300,00	270	15	2,70	33	5,95
59	2	20	0,10	30000,00	170	11	1,98	34	6,13
60	2	21	0,10	30000,00	232	21	3,78	55	9,91
61	2	22	0,10	30000,00	193	12	2,16	52	9,37
62	2	23	0,10	30000,00	277	43	7,73	59	10,63
63	2	24	0,10	30000,00	272	35	6,29	67	12,07
64	2	25	0,10	30000,00	196	17	3,06	40	7,21
65	2	26	0,10	30000,00	207	16	2,88	59	10,63
66	2	27	0,10	30000,00	272	39	7,01	67	12,07
67	2	28	0,10	30000,00	263	34	6,12	74	13,33
68	2	29	0,10	30000,00	257	35	6,29	70	12,61
69	2	30	0,10	30000,00	199	18	3,24	46	8,29
70	2	31	0,10	30000,00	206	19	3,42	53	9,55
71	2	32	0,10	3000,00	257	44	7,91	74	13,33
72	2	33	0,10	30000,00	219	12	2,16	72	12,97
73	2	34	0,10	30000,00	276	37	6,65	62	11,17
74	2	35	0,10	30000,00	282	44	7,91	84	15,14
75	2	36	0,10	30000,00	265	34	6,12	68	12,25
76	2	37	0,10	30000,00	197	8	1,44	54	9,73
77	2	38	0,10	30000,00	258	26	4,68	74	13,33
78	2	39	0,10	3000,00	217	16	2,88	65	11,71
79	3	1	0,10	300,00	249	18	3,24	38	6,85
80	3	2	0,10	3000,00	208	18	3,24	43	7,75
81	3	3	0,10	30000,00	202	12	2,16	47	8,47
82	3	4	0,10	30000,00	247	40	7,19	56	10,09
83	3	5	0,10	30000,00	244	35	6,29	58	10,45
84	3	6	0,10	30000,00	244	38	6,83	58	10,45
85	3	7	0,10	30000,00	245	35	6,29	58	10,45
86	3	8	0,10	30000,00	243	38	6,83	63	11,35
87	3	9	0,10	30000,00	249	38	6,83	72	12,97
88	3	10	0,10	30000,00	245	41	7,37	68	12,25
89	3	11	0,10	30000,00	239	45	8,09	46	8,29
90	3	12	0,10	30000,00	249	41	7,37	56	10,09
91	3	13	0,10	30000,00	207	30	5,40	36	6,49
92	3	14	0,10	30000,00	193	24	4,32	35	6,31
93	3	15	0,10	30000,00	219	24	4,32	39	7,03
94	3	16	0,10	30000,00	222	26	4,68	51	9,19
95	3	17	0,10	30000,00	201	24	4,32	33	5,95
96	3	18	0,10	30000,00	175	22	3,96	28	5,05
97	3	19	0,10	3000,00	176	10	1,80	31	5,59
98	3	20	0,10	30000,00	178	18	3,24	35	6,31
99	3	21	0,10	30000,00	193	21	3,78	43	7,75
100	3	22	0,10	3000,00	196	18	3,24	42	7,57
101	3	23	0,10	30000,00	245	31	5,58	49	8,83
102	3	24	0,10	30000,00	241	39	7,01	59	10,63

cd. tab. 1

103	3	25	0,10	3000,00	202	19	3,42	43	7,75
104	3	26	0,10	30000,00	244	41	7,37	51	9,19
105	3	27	0,10	30000,00	245	34	6,12	72	12,97
106	3	28	0,10	30000,00	238	36	6,47	62	11,17
107	3	29	0,10	30000,00	240	36	6,47	67	12,07
108	3	30	0,10	3000,00	207	18	3,24	44	7,93
109	3	31	0,10	30000,00	203	11	1,98	48	8,65
110	3	32	0,10	30000,00	253	41	7,37	50	9,01
111	3	33	0,10	30000,00	242	44	7,91	53	9,55
112	3	34	0,10	30000,00	243	41	7,37	66	11,89
113	3	35	0,10	30000,00	249	36	6,47	69	12,43
114	3	36	0,10	30000,00	239	35	6,29	63	11,35
115	3	37	0,10	3000,00	274	41	7,37	51	9,19
116	3	38	0,10	30000,00	338	72	12,95	70	12,61
117	3	39	0,10	30000,00	217	28	5,04	55	9,91
118	4	1	0,10	300,00	255	16	2,88	31	5,59
119	4	2	0,10	30000,00	249	45	8,09	40	7,21
120	4	3	0,10	30000,00	238	43	7,73	46	8,29
121	4	4	0,10	30000,00	245	40	7,19	52	9,37
122	4	5	0,10	30000,00	251	37	6,65	60	10,81
123	4	6	0,10	30000,00	240	36	6,47	58	10,45
124	4	7	0,10	30000,00	249	32	5,76	69	12,43
125	4	8	0,10	30000,00	252	36	6,47	66	11,89
126	4	9	0,10	30000,00	247	38	6,83	63	11,35
127	4	10	0,10	30000,00	245	39	7,01	59	10,63
128	4	11	0,10	30000,00	236	43	7,73	42	7,57
129	4	12	0,10	30000,00	243	35	6,29	47	8,47
130	4	13	0,10	300,00	247	11	1,98	30	5,41
131	4	14	0,10	30000,00	187	25	4,50	26	4,68
132	4	15	0,10	30000,00	217	28	5,04	39	7,03
133	4	16	0,10	30000,00	227	26	4,68	51	9,19
134	4	17	0,10	30000,00	202	16	2,88	32	5,77
135	4	18	0,10	30000,00	180	21	3,78	32	5,77
136	4	19	0,10	30000,00	164	19	3,42	28	5,05
137	4	20	0,10	30000,00	179	20	3,60	33	5,95
138	4	21	0,10	30000,00	198	23	4,14	37	6,67
139	4	22	0,10	3000,00	192	18	3,24	36	6,49
140	4	23	0,10	30000,00	242	32	5,76	47	8,47
141	4	24	0,10	30000,00	237	31	5,58	57	10,27
142	4	25	0,10	3000,00	196	22	3,96	39	7,03
143	4	26	0,10	30000,00	246	41	7,37	55	9,91
144	4	27	0,10	30000,00	241	35	6,29	60	10,81
145	4	28	0,10	30000,00	243	26	4,68	67	12,07
146	4	29	0,10	30000,00	247	28	5,04	61	10,99
147	4	30	0,10	30000,00	245	43	7,73	41	7,39
148	4	31	0,10	30000,00	243	43	7,73	47	8,47
149	4	32	0,10	30000,00	255	40	7,19	58	10,45

cd. tab. 1

150	4	33	0,10	30000,00	240	37	6,65	62	11,17
151	4	34	0,10	30000,00	246	37	6,65	62	11,17
152	4	35	0,10	30000,00	244	32	5,76	63	11,35
153	4	36	0,10	30000,00	243	29	5,22	67	12,07
154	4	37	0,10	3000,00	277	39	7,01	57	10,27
155	4	38	0,10	30000,00	234	20	3,60	59	10,63
156	4	39	0,10	30000,00	214	23	4,14	47	8,47
157	5	1	0,10	30000,00	402	150	26,98	190	34,23
158	5	2	0,10	30000,00	352	112	20,14	169	30,45
159	5	3	0,10	30000,00	333	71	12,77	143	25,77
160	5	4	0,10	3000,00	357	86	15,47	140	25,23
161	5	5	0,10	3000,00	348	76	13,67	136	24,50
162	5	6	0,10	3000,00	338	71	12,77	137	24,68
163	5	7	0,10	30000,00	373	121	21,76	140	25,23
164	5	8	0,10	3000,00	332	62	11,15	135	24,32
165	5	9	0,10	30000,00	366	113	20,32	140	25,23
166	5	10	0,10	3000,00	333	55	9,89	139	25,05
167	5	11	0,10	30000,00	365	128	23,02	169	30,45
168	5	12	0,10	30000,00	377	125	22,48	161	29,01
169	5	13	0,10	30000,00	382	131	23,56	169	30,45
170	5	14	0,10	30000,00	379	129	23,20	169	30,45
171	5	15	0,10	30000,00	383	119	21,40	164	29,55
172	5	16	0,10	3000,00	417	152	27,34	188	33,87
173	5	17	0,10	3000,00	348	78	14,03	136	24,50
174	5	18	0,10	3000,00	367	84	15,11	136	24,50
175	5	19	0,10	3000,00	372	90	16,19	140	25,23
176	5	20	0,10	3000,00	374	90	16,19	148	26,67
177	5	21	0,10	3000,00	376	93	16,73	142	25,59
178	5	22	0,10	3000,00	358	93	16,73	146	26,31
179	5	23	0,10	30000,00	283	29	5,22	144	25,95
180	5	24	0,10	3000,00	340	74	13,31	137	24,68
181	5	25	0,10	30000,00	354	101	18,17	160	28,83
182	5	26	0,10	3000,00	356	85	15,29	138	24,86
183	5	27	0,10	30000,00	364	119	21,40	142	25,59
184	5	28	0,10	30000,00	361	116	20,86	145	26,13
185	5	29	0,10	300,00	386	93	16,73	141	25,41
186	5	30	0,10	30000,00	352	111	19,96	159	28,65
187	5	31	0,10	30000,00	325	71	12,77	144	25,95
188	5	32	0,10	3000,00	358	92	16,55	142	25,59
189	5	33	0,10	3000,00	345	78	14,03	141	25,41
190	5	34	0,10	30000,00	370	110	19,78	139	25,05
191	5	35	0,10	3000,00	333	63	11,33	139	25,05
192	5	36	0,10	30000,00	288	25	4,50	136	24,50
193	5	37	0,10	30000,00	379	105	18,88	152	27,39
194	5	38	0,10	30000,00	328	61	10,97	167	30,09
195	5	39	0,10	3000,00	342	33	5,94	132	23,78

Najmniejszy procent błędów testowania uzyskano dla sygnału z widma w zakresie 0 do 6 kHz sygnału resztkowego dla falki biorthogonal 2.4. Minimalny błąd testowania wyniósł 4,68%, a błąd uczenia 4,50%.

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

Literatura

1. P. S. Addison: Low-oscillation complex wavelets. *Journal of Sound and Vibration* 254(4)/2002.
2. Batko W., Ziółko M.: Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. AGH. Kraków 2002.
3. Baydar N., Ball A.: Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(4)/2003.
4. Białasiewicz J.: Falki i aproksymacje. WNT, Warszawa 2000.
5. H. Kim, H. Melhem: Damage detection of structures by wavelet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 26/2004.
6. Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
7. Łazarz B., Wojnar G.: Wykorzystanie analizy falkowej w diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń kół zębatych. *Diagnostyka*'30, 2004.
8. Mangasarian O. L.: Lagrangian Support Vector Machines, *Journal of Machine Learning Research*, 2001.
9. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
10. Peng Z. K., Chu F. L.: Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing* 18/2004.
11. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
12. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych. V Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów. Diag'2003. Ustroń.
13. H. Zheng, Z. Li, X. Chen: Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 16(2-3)/2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski