

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ, Piotr CZECH

WYKORZYSTANIE DYSKRETNEJ TRANSFORMATY FALKOWEJ W NEURONOWYM KLASYFIKATORZE TYPU SVM

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 dyskretnej analizy falkowej.

USING DISCRETE WAVELET TRANSFORM IN NEURAL NETWORK CLASSIFICATION

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 discrete wavelet transform (DWT) and SVM neural network.

1. WPROWADZENIE

Transformata falkowa jest obecnie jednym z najpopularniejszych i najdynamiczniej rozwijanych narzędzi analizy częstotliwościowej sygnałów niestacjonarnych [3,8,9]. Znajduje ona zastosowanie przy analizie sygnałów procesów przejściowych, które często są wynikiem zmienności w czasie parametrów i nieliniowości [1,2]. Analiza niestacjonarnych sygnałów wymaga posługiwania się oknami, które dla wysokich częstotliwości zostają zawężone, natomiast dla niskich zostają rozszerzone. Podstawową zaletą transformaty falkowej jest kompromis w doborze rozdzielczości w dziedzinie czasu i częstotliwości [1,2].

Dyskretne transformaty falkowe sygnału $x(t)$ wyznaczamy jako iloczynny skalarny $x(t)$ i ciągu funkcji falki $\psi(t)$ [2]:

$$DWT = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi(t)dt$$

Dyskretna transformata falkowa daje możliwość dekompozycji i selektywnej rekonstrukcji (syntezy) sygnału w całym przedziale analizy [1].

W wyniku wielopoziomowej dekompozycji sygnału $x(t)$ otrzymujemy aproksymację sygnału na danym poziomie a_k oraz sumę detali na kolejnych poziomach d_i [2]:

$$x(t) = a_k + \sum_{i=1}^k d_i$$

2. OPIS EKSPERYMENTU

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

Podstawowym problemem w przypadku użycia sztucznej sieci neuronowej jest odpowiedni dobór danych wejściowych [6,7]. W eksperymencie postanowiono zbadać przydatność miar statystycznych jako danych wejściowych klasyfikatora neuronowego. Wybrano następujące miary: współczynnik zmienności, współczynnik szczytu, współczynnik luzu, współczynnik kształtu, współczynnik impulsowości, współczynnik asymetrii, dyskryminanta X0, dyskryminanta X4, dyskryminanta X6, dyskryminanta X8, dyskryminanta X10, energia sygnału, odchylenie ćwiartkowe, odchylenie przeciętne, wartość skuteczna, wartość średnia arytmetyczna, wartość średnia geometryczna, wartość średnia harmoniczna, mediana, pozytywny współczynnik zmienności, kwartył pierwszy, kwartył trzeci, wariancja, odchylenie standardowe, kurtoza, wartość maksymalna, wartość minimalna, wartość międzyszczytowa, pierwszy moment centralny, drugi moment centralny, trzeci moment centralny, czwarty moment centralny, piąty moment centralny, szósty moment centralny, siódmy moment centralny, ósmy moment centralny, dziewiąty moment centralny, dziesiąty moment centralny. Na wejście sieci podawano równocześnie wszystkie wymienione miary, co w rezultacie dało sieć neuronową o 38 wejściach.

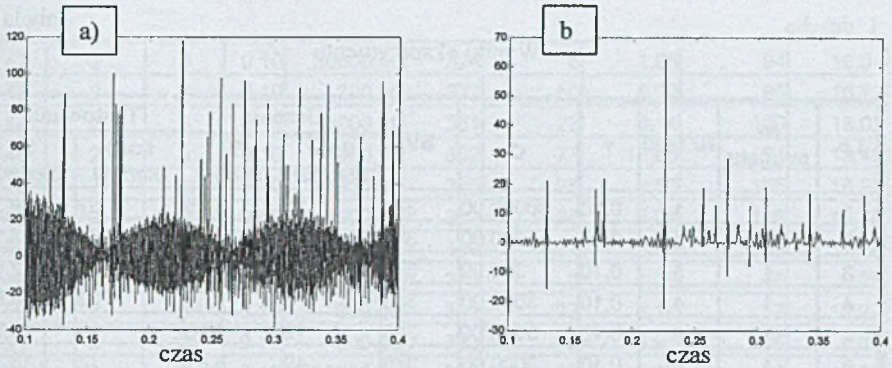
W eksperymencie wykorzystano sygnały czasowe przyspieszeń drgań poprzecznych wału zębniaka uzyskane ze zidentyfikowanego modelu przekładni FZG [4]. Obliczono 1111 symulacji, które przeprowadzono dla różnych faz stopnia podcięcia stopy zęba.

Dane wejściowe wyznaczono dla sygnałów czasowych przyspieszeń drgań poprzecznych wału zębniaka, które poddano dyskretnej analizie falkowej na piątym poziomie dekompozycji sygnału. Na rysunku 1 przedstawiono przyspieszenie drgań wału zębniaka dla koła nieuszkodzonego oraz jego postać na piątym poziomie dekompozycji DWT. Rysunek 2 przedstawia przyspieszenie drgań poprzecznych wału koła w przypadku zmiany sztywności zęba wskutek jego podcięcia u podstawy.

DWT wyznaczono dla sygnałów czasowych:

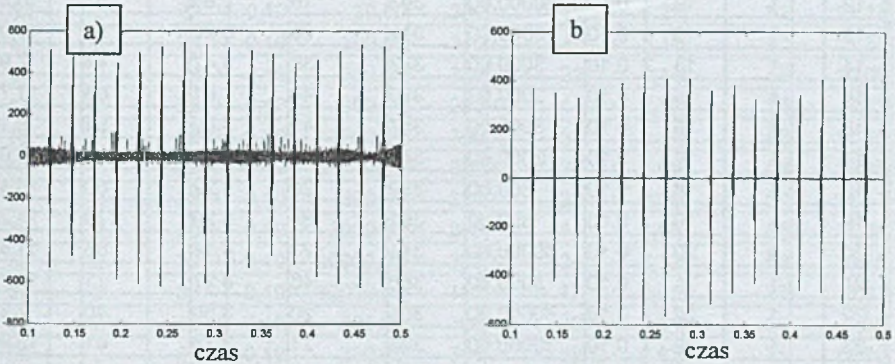
- z widma w całym zakresie częstotliwości (nr sygnału = 1),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz (nr sygnału = 2),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz sygnału różnicowego (nr sygnału = 3),
- z widma w zakresie 0 do 6 kHz sygnału resztkowego (nr sygnału = 4),
- z widma w zakresie $0,5 f_z$ do $1,5 f_z$ (nr sygnału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

Sprawdzono zależność rodzaju zastosowanej falki od wielkości błędu uczenia i testowania sieci SVM. W eksperymencie sprawdzono następujące falki: haar (nr falki = 1), db2 (nr falki = 2), db3 (nr falki = 3), db4 (nr falki = 4), db5 (nr falki = 5), db6 (nr falki = 6), db7 (nr falki = 7), db8 (nr falki = 8), db9 (nr falki = 9), db10 (nr falki = 10), bior1.3 (nr falki = 11), bior1.5 (nr falki = 12), bior2.2 (nr falki = 13), bior2.4 (nr falki = 14), bior2.6 (nr falki = 15), bior2.8 (nr falki = 16), bior3.1 (nr falki = 17), bior3.3 (nr falki = 18), bior3.5 (nr falki = 19), bior3.7 (nr falki = 20), bior3.9 (nr falki = 21), bior4.4 (nr falki = 22), bior5.5 (nr falki = 23), bior6.8 (nr falki = 24), coif1 (nr falki = 25), coif2 (nr falki = 26), coif3 (nr falki = 27), coif4 (nr falki = 28), coif5 (nr falki = 29), sym2 (nr falki = 30), sym3 (nr falki = 31), sym4 (nr falki = 32), sym5 (nr falki = 33), sym6 (nr falki = 34), sym7 (nr falki = 35), sym8 (nr falki = 36).



Rys. 1. Przyspieszenie drgań wału dla koła nieuszkodzonego: a) sygnał oryginalny, b) sygnał odszumiony

Fig. 1. Time signal of shaft toothed wheel for gear without damage: a) original signal, b) signal after analysis



Rys. 2. Przyspieszenie drgań wału dla koła z 60% zmianą sztywności: a) sygnał oryginalny, b) sygnał odszumiony

Fig. 2. Time signal of shaft toothed wheel for gear without damage: a) original signal, b) signal after analysis – drop of rigidity of mesh 60%: a) original signal, b) signal after analysis

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 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. Badaniom objęto 8820 sieci neuronowych typu SVM o różnych danych wejściowych i parametrach sieci [5,6]. 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	335	21	3,78	52	9,37
2	1	2	0,10	300,00	380	26	4,68	73	13,15
3	1	3	0,10	300,00	370	22	3,96	72	12,97
4	1	4	0,10	3000,00	346	9	1,62	83	14,95
5	1	5	0,10	3000,00	366	12	2,16	75	13,51
6	1	6	0,10	3000,00	376	49	8,81	73	13,15
7	1	7	0,10	30000,00	314	25	4,50	69	12,43
8	1	8	0,10	3000,00	375	44	7,91	62	11,17
9	1	9	0,10	300,00	371	15	2,70	76	13,69
10	1	10	0,10	3000,00	389	15	2,70	87	15,68
11	1	11	0,10	30000,00	302	21	3,78	70	12,61
12	1	12	0,10	30000,00	303	16	2,88	57	10,27
13	1	13	0,10	3000,00	319	35	6,29	56	10,09
14	1	14	0,10	3000,00	332	36	6,47	44	7,93
15	1	15	0,10	3000,00	330	44	7,91	65	11,71
16	1	16	0,10	3000,00	367	45	8,09	51	9,19
17	1	17	0,10	3000,00	340	13	2,34	56	10,09
18	1	18	0,10	300,00	389	29	5,22	80	14,41
19	1	19	0,10	300,00	381	35	6,29	79	14,23
20	1	20	0,10	30000,00	311	23	4,14	66	11,89
21	1	21	0,10	3000,00	358	46	8,27	71	12,79
22	1	22	0,10	30000,00	301	20	3,60	40	7,21
23	1	23	0,10	30000,00	301	21	3,78	61	10,99
24	1	24	0,10	3000,00	386	50	8,99	70	12,61
25	1	25	0,10	30000,00	279	23	4,14	45	8,11
26	1	26	0,10	30000,00	313	26	4,68	51	9,19
27	1	27	0,10	30000,00	313	26	4,68	69	12,43
28	1	28	0,10	3000,00	359	9	1,62	79	14,23
29	1	29	0,10	3000,00	364	15	2,70	79	14,23
30	1	30	0,10	300,00	380	26	4,68	73	13,15
31	1	31	0,10	300,00	370	22	3,96	72	12,97
32	1	32	0,10	3000,00	311	30	5,40	59	10,63
33	1	33	0,10	3000,00	371	53	9,53	64	11,53
34	1	34	0,10	30000,00	317	21	3,78	56	10,09
35	1	35	0,10	3000,00	329	27	4,86	49	8,83
36	1	36	0,10	3000,00	353	39	7,01	70	12,61
37	2	1	0,10	3000,00	331	68	12,23	97	17,48
38	2	2	0,10	30000,00	227	34	6,12	58	10,45
39	2	3	0,10	30000,00	187	17	3,06	37	6,67
40	2	4	0,10	30000,00	254	38	6,83	70	12,61
41	2	5	0,10	300,00	337	23	4,14	61	10,99

cd. tab. 1

42	2	6	0,10	30000,00	326	6	1,06	94	16,94
43	2	7	0,10	300,00	377	50	8,95	90	16,22
44	2	8	0,10	3000,00	351	23	4,14	100	18,02
45	2	9	0,10	3000,00	302	77	13,85	91	16,40
46	2	10	0,10	3000,00	335	25	4,50	105	18,92
47	2	11	0,10	3000,00	343	28	5,04	108	19,46
48	2	12	0,10	30,00	436	30	5,40	99	17,84
49	2	13	0,10	30000,00	273	6	1,08	46	8,29
50	2	14	0,10	300,00	301	23	4,14	57	10,27
51	2	15	0,10	300,00	332	33	5,94	48	8,65
52	2	16	0,10	30000,00	218	19	3,42	56	10,09
53	2	17	0,10	30000,00	365	106	19,06	133	23,96
54	2	18	0,10	30000,00	311	48	8,63	89	16,04
55	2	19	0,10	3000,00	360	21	3,78	74	13,33
56	2	20	0,10	30000,00	332	47	8,45	93	16,76
57	2	21	0,10	30000,00	301	59	10,61	71	12,79
58	2	22	0,10	30,00	359	35	6,29	62	11,17
59	2	23	0,10	300,00	345	40	7,19	63	11,35
60	2	24	0,10	300,00	323	23	4,14	56	10,09
61	2	25	0,10	300,00	298	14	2,52	54	9,73
62	2	26	0,10	300,00	305	23	4,14	58	10,45
63	2	27	0,10	30000,00	220	26	4,68	58	10,45
64	2	28	0,10	300,00	321	22	3,96	64	11,53
65	2	29	0,10	3000,00	286	11	1,98	66	11,89
66	2	30	0,10	30000,00	227	34	6,12	58	10,45
67	2	31	0,10	30000,00	187	17	3,06	37	6,67
68	2	32	0,10	300,00	306	20	3,60	53	9,55
69	2	33	0,10	300,00	364	38	6,83	71	12,79
70	2	34	0,10	3000,00	267	39	7,01	53	9,55
71	2	35	0,10	300,00	330	22	3,96	67	12,07
72	2	36	0,10	30000,00	237	30	5,40	62	11,17
73	3	1	0,10	30,00	370	24	4,32	70	12,61
74	3	2	0,10	300,00	368	10	1,80	57	10,27
75	3	3	0,10	30,00	353	19	3,42	58	10,45
76	3	4	0,10	3000,00	214	24	4,32	57	10,27
77	3	5	0,10	3000,00	243	28	5,04	65	11,71
78	3	6	0,10	300,00	343	72	12,95	107	19,28
79	3	7	0,10	3000,00	273	41	7,37	78	14,05
80	3	8	0,10	3000,00	280	49	8,81	84	15,14
81	3	9	0,10	3000,00	275	34	6,12	76	13,69
82	3	10	0,10	3000,00	259	39	7,01	85	15,32
83	3	11	0,10	30000,00	275	28	5,04	97	17,48
84	3	12	0,10	300,00	361	16	2,88	78	14,05
85	3	13	0,10	3000,00	241	34	6,12	50	9,01
86	3	14	0,10	3000,00	232	20	3,60	60	10,81
87	3	15	0,10	3000,00	253	24	4,32	56	10,09
88	3	16	0,10	3000,00	232	21	3,78	59	10,63

cd. tab. 1

89	3	17	0,10	3000,00	345	55	9,89	97	17,48
90	3	18	0,10	3000,00	310	41	7,37	93	16,76
91	3	19	0,10	30000,00	276	28	5,04	90	16,22
92	3	20	0,10	300,00	373	16	2,88	69	12,43
93	3	21	0,10	3000,00	295	56	10,07	73	13,15
94	3	22	0,10	3000,00	242	19	3,42	66	11,89
95	3	23	0,10	30000,00	275	49	8,81	55	9,91
96	3	24	0,10	300,00	272	46	8,27	62	11,17
97	3	25	0,10	300,00	309	18	3,24	65	11,71
98	3	26	0,10	30,00	355	22	3,96	61	10,99
99	3	27	0,10	300,00	314	9	1,62	68	12,25
100	3	28	0,10	3000,00	337	6	1,08	78	14,05
101	3	29	0,10	300,00	356	9	1,62	77	13,87
102	3	30	0,10	300,00	368	10	1,80	57	10,27
103	3	31	0,10	30,00	353	19	3,42	58	10,45
104	3	32	0,10	30,00	393	34	6,12	76	13,69
105	3	33	0,10	300,00	319	17	3,06	63	11,35
106	3	34	0,10	3000,00	265	24	4,32	72	12,97
107	3	35	0,10	3000,00	218	30	5,40	73	13,15
108	3	36	0,10	30,00	372	26	4,68	72	12,97
109	4	1	0,10	30000,00	250	28	5,04	76	13,69
110	4	2	0,10	3000,00	246	38	6,83	81	14,59
111	4	3	0,10	3000,00	226	20	3,60	73	13,15
112	4	4	0,10	30,00	380	28	5,04	58	10,45
113	4	5	0,10	3000,00	255	44	7,91	77	13,87
114	4	6	0,10	300,00	312	61	10,97	98	17,66
115	4	7	0,10	3000,00	280	50	8,99	83	14,95
116	4	8	0,10	3000,00	273	61	10,97	75	13,51
117	4	9	0,10	3000,00	263	34	6,12	82	14,77
118	4	10	0,10	30,00	423	45	8,09	89	16,04
119	4	11	0,10	3000,00	287	43	7,73	86	15,50
120	4	12	0,10	30,00	422	32	5,76	82	14,77
121	4	13	0,10	30,00	347	34	6,12	67	12,07
122	4	14	0,10	3000,00	251	26	4,68	75	13,51
123	4	15	0,10	30,00	359	26	4,68	60	10,81
124	4	16	0,10	30,00	388	31	5,58	66	11,89
125	4	17	0,10	3000,00	315	24	4,32	60	10,81
126	4	18	0,10	300,00	331	26	4,68	66	11,89
127	4	19	0,10	300,00	358	34	6,12	85	15,32
128	4	20	0,10	30000,00	225	29	5,22	58	10,45
129	4	21	0,10	30000,00	249	44	7,91	71	12,79
130	4	22	0,10	30,00	391	32	5,76	68	12,25
131	4	23	0,10	3000,00	240	27	4,86	55	9,91
132	4	24	0,10	3000,00	254	31	5,58	75	13,51
133	4	25	0,10	3000,00	260	42	7,55	71	12,79
134	4	26	0,10	30,00	364	27	4,86	67	12,07
135	4	27	0,10	30,00	382	30	5,40	66	11,89

cd. tab. 1

136	4	28	0,10	30,00	387	29	5,22	65	11,71
137	4	29	0,10	3,00	444	55	9,89	75	13,51
138	4	30	0,10	3000,00	246	38	6,83	81	14,59
139	4	31	0,10	3000,00	226	20	3,60	73	13,15
140	4	32	0,10	3000,00	335	7	1,26	84	15,14
141	4	33	0,10	30,00	379	26	4,68	79	14,23
142	4	34	0,10	30,00	375	24	4,32	66	11,89
143	4	35	0,10	300,00	399	13	2,34	79	14,23
144	4	36	0,10	3000,00	241	36	6,47	81	14,59
145	5	1	0,10	30000,00	399	131	23,56	182	32,79
146	5	2	0,10	30000,00	391	133	23,92	182	32,79
147	5	3	0,10	30000,00	404	136	24,46	173	31,17
148	5	4	0,10	30000,00	394	137	24,64	185	33,33
149	5	5	0,10	300,00	421	120	21,58	182	32,79
150	5	6	0,10	300,00	413	102	18,35	189	34,05
151	5	7	0,10	30000,00	414	129	23,20	191	34,41
152	5	8	0,10	30000,00	414	143	25,72	194	34,95
153	5	9	0,10	300,00	422	119	21,40	198	35,68
154	5	10	0,10	30000,00	398	137	24,64	196	35,32
155	5	11	0,10	300,00	391	109	19,60	183	32,97
156	5	12	0,10	30000,00	395	132	23,74	183	32,97
157	5	13	0,10	300,00	409	107	19,24	201	36,22
158	5	14	0,10	300,00	411	113	20,32	181	32,61
159	5	15	0,10	300,00	396	108	19,42	185	33,33
160	5	16	0,10	300,00	414	113	20,32	185	33,33
161	5	17	0,10	30000,00	393	133	23,92	189	34,05
162	5	18	0,10	300,00	402	105	18,88	187	33,69
163	5	19	0,10	300,00	419	113	20,32	182	32,79
164	5	20	0,10	300,00	414	105	18,88	191	34,41
165	5	21	0,10	300,00	395	114	20,50	161	29,01
166	5	22	0,10	300,00	408	120	21,58	179	32,25
167	5	23	0,10	300,00	410	107	19,24	177	31,89
168	5	24	0,10	30000,00	401	138	24,82	177	31,89
169	5	25	0,10	300,00	418	114	20,50	197	35,50
170	5	26	0,10	300,00	409	117	21,04	194	34,95
171	5	27	0,10	3000,00	378	63	11,33	195	35,14
172	5	28	0,10	300,00	404	110	19,78	186	33,51
173	5	29	0,10	30000,00	408	133	23,92	204	36,76
174	5	30	0,10	30000,00	391	133	23,92	182	32,79
175	5	31	0,10	30000,00	404	136	24,46	173	31,17
176	5	32	0,10	300,00	418	118	21,22	188	33,87
177	5	33	0,10	300,00	424	120	21,58	186	33,51
178	5	34	0,10	30000,00	400	139	25,00	172	30,99
179	5	35	0,10	300,00	420	119	21,40	190	34,23
180	5	36	0,10	300,00	412	115	20,68	194	34,95

Najmniejszy procent błędów testowania uzyskano dla sygnału uzyskanego z widma częstotliwości w zakresie 0 do 6 kHz dla falki db3. Uzyskano błąd testowania wynoszący 6,67% i błąd uczenia 3,06%.

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

Literatura

1. Batko W., Ziółko M.: Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. AGH, Kraków 2002.
2. Białasiewicz J.: Falki i aproksymacje. WNT, Warszawa 2000.
3. Lin J., Zuo M.: Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(6)/2003.
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. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
7. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
8. Peng Z., Chu F.: Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing* 18/2004.
9. Sung C., Tai H., Chen C.: Locating defects of gear system by the technique of wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 35/2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

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