

УДК [681.518.54+620.19](035)

С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська*Донбаська державна машинобудівна академія (м.Краматорськ)***ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ЗА КІЛЬКОМА КІЛЬКІСНИМИ
ОЗНАКАМИ ОДНОЧАСНО**

Показано, що діагностика об'єктів машинобудування передбачає обґрунтування розширення застосовуваних фізичних ефектів, орієнтованих, в першу чергу, на неруйнівного контролю параметрів продукції машинобудування. На підставі досліджень, які показують перспективність експериментальних і теоретичних доказів, доведена доцільність пошуку підтвердження інформативності частотних спектрів резонансних акустичних сигналів досліджуваних об'єктів, порушених широкопалосними резонаторами рівній амплітуди в акустичному діапазоні. Надані приклади застосування широкопалосних випромінювачів наноамплітудних впливів на досліджувані об'єкти з метою акустичної спектроскопії для створення їх ідентифікаційних моделей. Для практичного використання експериментальних результатів для ідентифікації розмірних і фізико-механічних характеристик станів діагностованих об'єктів авторами застосовані нейромережні моделі. Такі моделі служать практичним цілям діагностики станів об'єктів на основі частотних спектрів власних резонансних коливань. Доведено, якщо діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу у вигляді широкопалосного впливу постійної амплітуди, то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу. Представлені ідентифікаційні моделі, побудовані на нейромережному базисі, показали реальну можливість їх використання для створення системи діагностики об'єктів за кількома кількісними ознаками. Причому, кількість таких ознак, які можна контролювати одночасно, практично, не обмежена. Авторами роботи проведені додаткові дослідження, які показали можливість одночасного контролю не тільки геометричних характеристик об'єктів, а й їх фізико-механічних характеристик, включаючи показники напруженого стану, твердості і т.ін..

Ключові слова: акустичний резонанс, нейронні мережі, п'єзoeлектричні елементи, контроль за кількома кількісними ознаками, діагностика.

S.V. Kovalevskyy, O.S. Kovalevska**IDENTIFICATION OF MECHANICAL ENGINEERING OBJECTS AT THE SAME TIME**

It is shown that the diagnostics of engineering facilities involves the justification for the expansion of the applied physical effects, oriented primarily to non-destructive testing of the parameters of engineering products. Based on studies that show the promise of experimental and theoretical evidence, the expediency of finding information on the frequency spectra of the resonant acoustic signals of the studied objects caused by broadband resonators of equal amplitude in the acoustic frequency range is given. Examples of the use of broadband emitters for nano-amplitude impacts on the studied objects with the aim of acoustic spectroscopy and the creation of their identification models are provided. For practical use of experimental results to identify dimensional characteristics of diagnosed objects, the authors applied neural network models. Such models serve the practical purposes of diagnosing the state of objects based on the frequency spectra of natural resonance oscillations. It is proved that if the object is diagnosed relative to the reference signal in the form of a broadband constant amplitude, then this approach allows normalizing the output diagnostic signals relative to the reference. Identification models based on a neural network basis are presented, which showed the real possibility of using them to create a system for diagnosing objects using several quantitative criteria. Moreover, the number of such signs that can be controlled simultaneously is practically unlimited. The authors of the work conducted additional studies that showed the possibility of simultaneous monitoring of not only the geometric characteristics of objects, but also their physical and mechanical characteristics, including indicators of stress state, hardness, etc.

Keywords: acoustic resonance, neural networks, piezoelectric elements, monitoring by several quantitative criteria, diagnostics.

С.В. Ковалевский, Е.С. Ковалевская**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПО НЕСКОЛЬКИМ
КОЛИЧЕСТВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ ОДНОВРЕМЕННО**

Показано, что диагностика объектов машиностроения предполагает обоснование расширения применяемых физических эффектов, ориентированных, в первую очередь, на неразрушающий контроль параметров продукции машиностроения. На основании исследований, которые показывают перспективность экспериментальных и теоретических доказательств, приведена целесообразность поиска подтверждения информативности частотных спектров резонансных акустических сигналов исследуемых объектов, вызванных широкополосными резонаторами равной амплитуды в акустическом диапазоне частот. Предоставлены примеры применения широкополосных излучателей для наноамплитудных воздействий на исследуемые объекты с целью акустической спектроскопии и создания их идентификационных моделей. Для практического использования экспериментальных результатов для идентификации размерных характеристик диагностированных объектов авторами применены нейросетевые модели. Такие модели служат практическим целям диагностики состояний объектов на основе частотных спектров собственных резонансных колебаний. Доказано, если диагностика объекта проводится относительно опорного сигнала в виде широкополосного воздействия постоянной амплитуды, то такой подход позволяет нормировать выходные диагностические сигналы относительно опорного. Представлены идентификационные модели, построенные на нейросетевом базисе, которые показали

реальную возможность их использования для создания системы диагностики объектов по нескольким количественным признакам. Причем, количество таких признаков, которые можно контролировать одновременно, практически не ограничено. Авторами работы проведены дополнительные исследования, которые показали возможность одновременного контроля не только геометрических характеристик объектов, но и их физико-механических характеристик, включая показатели напряженного состояния, твердости и т.д.

Ключевые слова: акустический резонанс, нейронные сети, пьезоэлектрические элементы, контроль по нескольким количественным признакам, диагностика.

Розвиток методів діагностики об'єктів машинобудування передбачає обґрунтування розширення застосовуваних фізичних ефектів, орієнтованих, в першу чергу, на неруйнівного контролю параметрів продукції машинобудування. У зв'язку з цим особливий інтерес представляють методи, що засновані на обробці інформативних сигналів, які можуть мати місце при збудженні об'єктів діагностики для отримання відгуків у вигляді їх резонансних частотних спектрів [1,2,3]. У роботах [4,5,6] авторів представлені результати досліджень, які показують перспективність експериментальних і теоретичних доказів доцільності шукати подальші підтвердження інформативності частотних спектрів резонансних акустичних сигналів досліджуваних об'єктів, порушених широкосмуговими резонаторами рівній амплітуди в акустичному діапазоні. Мають місце приклади більш широкого застосування широкосмугових випромінювачів наноамплітудних впливів на досліджувані об'єкти з метою акустичної спектроскопії для створення їх ідентифікаційних моделей [7,8].

Основна частина

Для практичного використання експериментальних результатів для ідентифікації розмірних і фізико-механічних характеристик станів діагностованих об'єктів авторами застосовані нейромережні моделі [9, **Помилка! Невідомий аргумент ключа.**]. такі моделі служать практичним цілям діагностики станів об'єктів на основі частотних спектрів власних резонансних коливань. Ці спектри можуть бути отримані різними способами, починаючи від простих ударних впливів на об'єкт до безконтактних впливів із застосуванням електромагнітних полів.

Для реалізації такого підходу прийняті наступне:

- $W(f)$ – сигнал збудження об'єкта «білим шумом»;

- $R[W(f)]$ – реакція об'єкта на збудження «білим шумом»;

$X_k, X_1, \dots, X_r, \dots$ – властивості і параметри об'єкта (розмірні характеристики, напруження, температура і т. ін.) $R[W(f)] = F\{X_k, X_1, \dots, X_r, \dots\}$

Завданням діагностики і створення еталонної моделі об'єкта є визначення властивостей і параметрів об'єкта $X_k, X_1, \dots, X_r, \dots$ по реакції $R[W(f)]$ (рис.1).

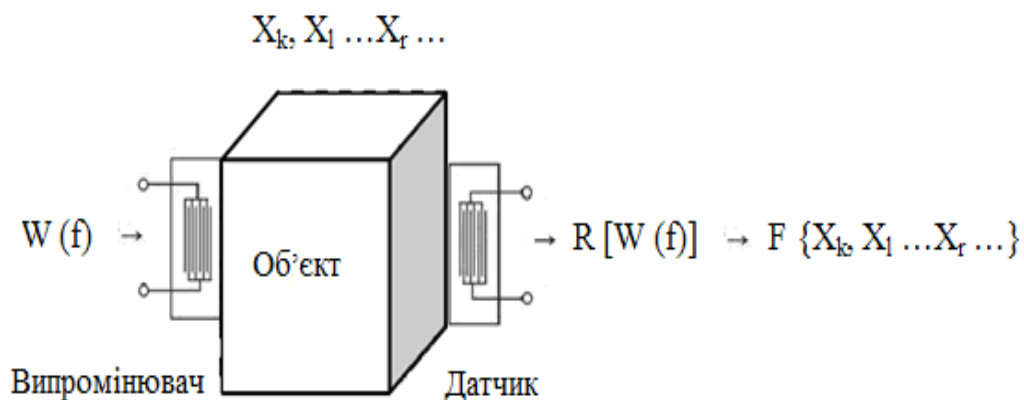


Рис. 1 Інформаційна модель визначення властивостей і параметрів об'єкта: $W(f)$ Object

$\rightarrow \rightarrow R[W(f)] \rightarrow F\{X_k, X_1, \dots, X_r, \dots\} \rightarrow X_k, X_1, \dots, X_r$

Випромінювач і приймач діагностичного пристрою є оборотні п'єзоелектричні елементи, на які подаються і з яких знімаються посилюються сигнали. Оскільки діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу у вигляді широкосмугового впливу постійної амплітуди, то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу.

Експериментальна частина

Для експериментальних підтверджень взаємозв'язку геометричних параметрів об'єктів і власних частотних спектрів використано набір експериментальних зразків з розмірними характеристиками згідно табл.1.

Таблиця 1

Лінійні розміри експериментальних зразків

	Порядковий номер експериментальних зразків									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a, мм.	7,6	7,6	7,7	7,8	7,8	7,9	7,8	7,8	7,8	7,8
B, мм.	25,3	26	25,3	25,6	26,2	27,2	25,4	27	26,2	25,6
L, мм.	12	12	11,9	12,1	12,1	11,7	12,1	12,2	12	12
d, мм.	5,5	5	5,4	5,1	5,5	5,2	5,2	5,2	5	5,4
e, мм.	18	17,5	18,2	16,4	17	16,2	17,6	18	17,6	15,7

Для кожного зразка отримані акустичні спектри за допомогою діагностичного пристрою, схема якого наведена на рис.2.

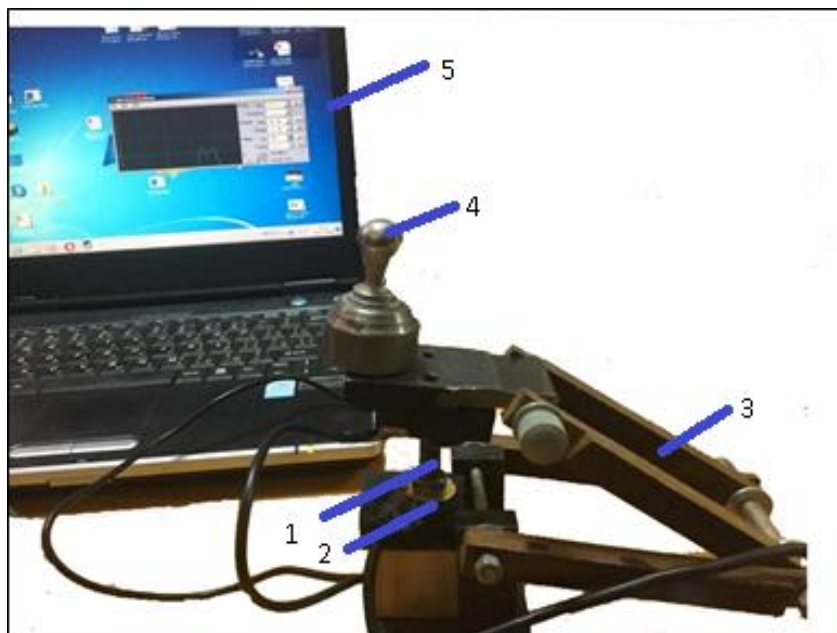


Рис.2 Експериментальний стенд: 1-зразок, 2- п'єзовипромінювач, 3-пристрій навантаження зразку, 4- постійний вантаж зразку, 5 – програмне забезпечення.

Отримані частотні спектри представлені на рис.3. А їх цифрові значення були підготовлені в форматі dbf для створення ідентифікаційної моделі за допомогою програмного пакета Neuro Pro 0,25.

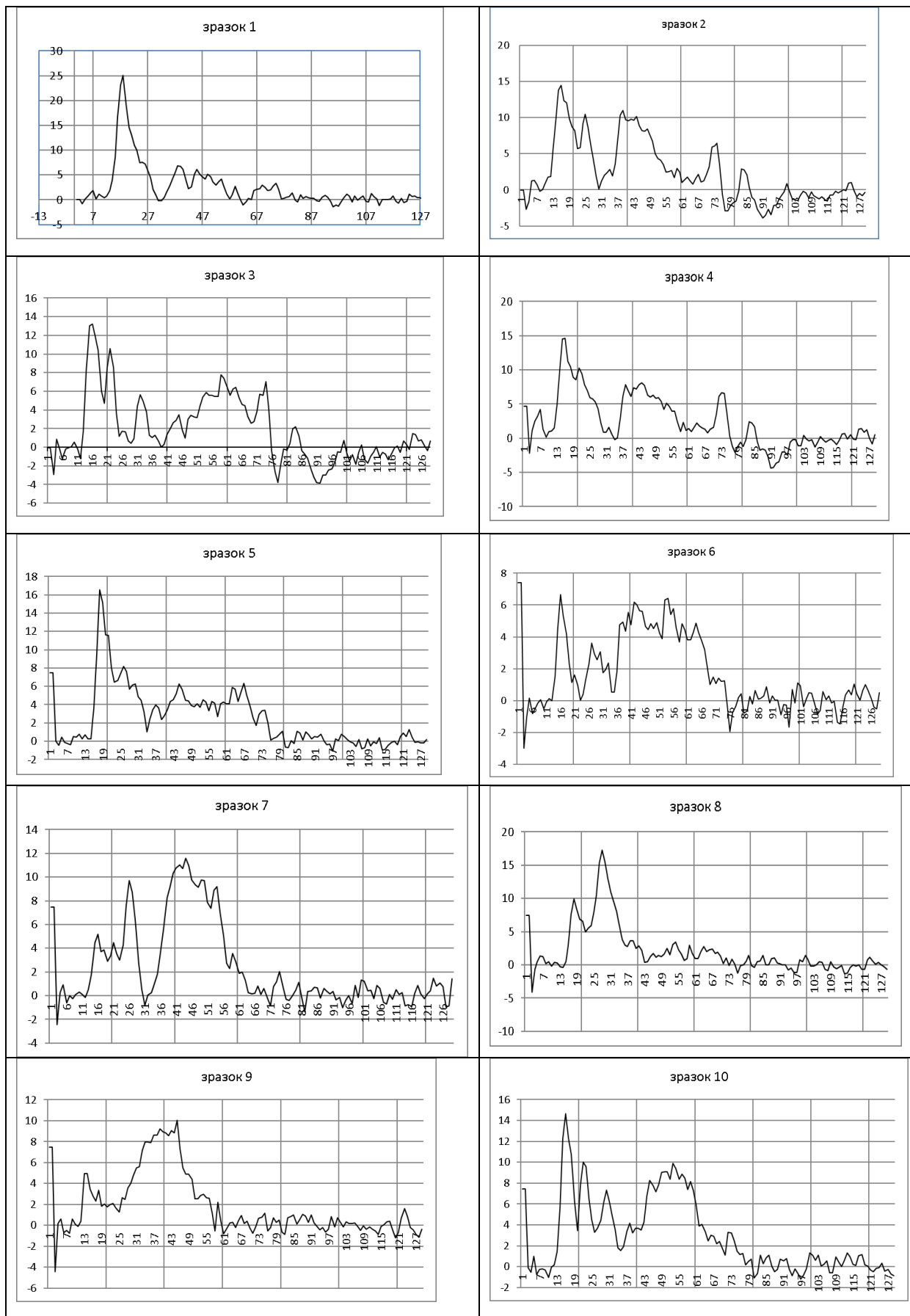


Рис.3 Акустичні спектрограми десяти зразків

В результаті обробки експериментальних даних з представленням нейромережної моделі у вигляді трьох шарової мережі, де перший шар включав – 100 нейроподібних елементів, другий шар – 50 і третій шар включав 20 штучних нейронів, отримано верифікаційний опис ідентифікаційної моделі:

Поля бази даних (вихідні симптоми):

X91

X94

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

a

B

C

d

e

Передобробка вхідних полів БД для подачі мережі:

$$X91 = (X91 - 1,665) / 2,585$$

$$X94 = (X94 - 1,335) / 1,135$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сігмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Сіндром1_1} = \text{Сігмоїда1} (-X94-1)$$

$$\text{Сіндром1_2} = \text{Сігмоїда1} (0,1789215 * X91 - X94 + 0,7786909)$$

$$\text{Сіндром1_3} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,3760698 * X94 - 0,4292016)$$

$$\text{Сіндром1_4} = \text{Сігмоїда1} (-X91 + 0,2269848 * X94 + 0,4247673)$$

$$\text{Сіндром1_5} = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,3228972 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1_6} = \text{Сігмоїда1} (-0,5381316 * X91 - 0,8220743 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1_7} = \text{Сігмоїда1} (1)$$

$$\text{Сіндром1_8} = \text{Сігмоїда1} (0,3379285 * X91 + 0,6218256 * X94 - 0,8436443)$$

$$\text{Сіндром1_9} = \text{Сігмоїда1} (-0,2617056 * X91 + X94 - 0,6350841)$$

$$\text{Сіндром1_10} = \text{Сігмоїда1} (-X91)$$

$$\text{Сіндром1_11} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,6191387 * X94 - 0,3530776)$$

$$\text{Сіндром1_12} = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,5027313 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1_13} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,8285614 * X94)$$

$$\text{Сіндром1_14} = \text{Сігмоїда1} (0,2317552 * X91 + X94 - 1)$$

$$\text{Сіндром1_15} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,2525339 * X94 - 0,4482068)$$

$$\text{Сіндром1_16} = \text{Сігмоїда1} (X91 - X94)$$

$$\text{Сіндром1_17} = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,3821623 * X94 - 1)$$

Кінцеві синдроми:

$$a = 0,1945991 * \text{Сіндром1_1} - 0,0468972 * \text{Сіндром1_2} + 0,02980304 * \text{Сіндром1_3} - 0,1515048 * \text{Сіндром1_4} + \text{Сіндром1_5} - \text{Сіндром1_6} + 0,2092688 * \text{Сіндром1_7} - 0,4198359 * \text{Сіндром1_8} + 0,4460115 * \text{Сіндром1_9} - 0,2297336 * \text{Сіндром1_10} + 0,3188157 * \text{Сіндром1_11} - 0,2057096 * \text{Сіндром1_12} + \text{Сіндром1_13} + 0,087403 * \text{Сіндром1_14} - 0,3707736 * \text{Сіндром1_15} - \text{Сіндром1_16} + \text{Сіндром1_17} + 0,2567663$$

$$B = -\text{Сіндром1_1} - \text{Сіндром1_2} - \text{Сіндром1_3} - \text{Сіндром1_4} + \text{Сіндром1_5} - \text{Сіндром1_6} - \text{Сіндром1_7} - \text{Сіндром1_8} - \text{Сіндром1_9} + \text{Сіндром1_10} + 0,1587669 * \text{Сіндром1_11} - \text{Сіндром1_12} + \text{Сіндром1_13} - 0,02372073 * \text{Сіндром1_14} - \text{Сіндром1_15} - 0,1846073 * \text{Сіндром1_16} - \text{Сіндром1_17} - 1$$

$$C = \text{Сіндром1_1} + \text{Сіндром1_2} - \text{Сіндром1_3} - \text{Сіндром1_4} - \text{Сіндром1_5} + \text{Сіндром1_6} - 0,1520165 * \text{Сіндром1_7} + \text{Сіндром1_8} - 0,1046149 * \text{Сіндром1_9} - 0,315931 * \text{Сіндром1_10} - \text{Сіндром1_11} + \text{Сіндром1_12} + 0,2087332 * \text{Сіндром1_13} - 0,3306485 * \text{Сіндром1_14} + \text{Сіндром1_15} - \text{Сіндром1_16} - 0,3866748 * \text{Сіндром1_17} + 0,008268885$$

$$d = \text{Сіндром1_1} + \text{Сіндром1_2} + \text{Сіндром1_3} + 0,1147257 * \text{Сіндром1_4} + \text{Сіндром1_5} - \text{Сіндром1_6} + 0,328462 * \text{Сіндром1_7} - \text{Сіндром1_8} + \text{Сіндром1_9} - 0,06329088 * \text{Сіндром1_10} + \text{Сіндром1_11} - 0,08574385 * \text{Сіндром1_12} + \text{Сіндром1_13} + \text{Сіндром1_14} - \text{Сіндром1_15} - 0,06077649 * \text{Сіндром1_16} + 0,6581131 * \text{Сіндром1_17} + 1$$

$$e = \text{Сіндром1_1} + \text{Сіндром1_2} - \text{Сіндром1_3} - \text{Сіндром1_4} - \text{Сіндром1_5} + \text{Сіндром1_6} - 0,1279237 * \text{Сіндром1_7} + 0,1763626 * \text{Сіндром1_8} + \text{Сіндром1_9} - 0,398913 * \text{Сіндром1_10} - \text{Сіндром1_11} + 0,3104188 * \text{Сіндром1_12} - \text{Сіндром1_13} - \text{Сіндром1_14} + \text{Сіндром1_15} + 0,6841241 * \text{Сіндром1_16} - 0,2379929 * \text{Сіндром1_17} + 0,008772251$$

Постобробка кінцевих синдромів:

$$a = ((A * 0,300000190734863) + 15,5) / 2)$$

$$B = ((B * 1,90000152587891) + 52,5) / 2)$$

$$C = ((C * 0,5) + 23,8999996185303) / 2)$$

$$d = ((D * 0,5) + 10,5) / 2)$$

$$e = ((E * 2,5000095367432) + 33,9000005722046) / 2))$$

Значення X91 і X94 мають характеристичні частоти 15679 Гц. і 16196 Гц. відповідно.

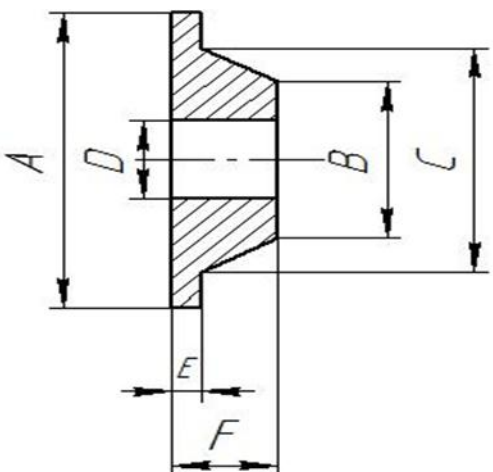
Використання цих частот я фільтрів акустичних сигналів збуджених об'єктів надає можливість отримати всі розміри разом без торкання до об'єктів.

Тестування показало, що похибка тестування на зразках не перевищує 0,2...0,6 %.

Аналогічно виконувалось створення ідентифікаційної моделі зразків, наведених в табл.2.

Таблиця 2

Вихідні дані для тренувальної множини при створенні моделі

Параметри об'єкту	Таблиця розмірів об'єкту, мм						
	A	B	C	D	E	F	
	48,33	30,35	16,27	7,70	1,73	8,97	
	46,95	30,78	15,63	8,08	2,51	10,04	
	47,90	28,90	14,80	7,91	1,90	9,41	
	47,91	27,48	14,69	7,66	1,96	8,50	
	46,92	30,37	15,44	7,70	2,08	9,55	
	46,90	29,21	14,75	7,94	2,39	10,01	
	47,84	31,66	16,24	8,44	1,73	9,45	
	46,95	30,59	15,81	7,94	2,39	10,01	
	48,63	29,59	13,70	8,13	2,17	9,97	
	47,89	29,41	14,73	7,83	1,90	9,81	
	48,34	31,57	15,43	7,68	2,81	11,17	
	48,00	28,89	16,09	7,94	2,30	8,91	
	46,79	30,72	16,06	8,11	2,48	10,06	
	48,52	28,26	14,47	7,95	2,03	9,53	
	47,02	29,50	15,65	18,05	2,51	9,75	
	48,40	32,07	16,43	8,00	1,82	10,11	
	47,51	29,30	15,55	7,89	1,97	9,12	
	48,69	27,72	17,15	8,15	2,20	8,50	
	48,31	28,84	15,93	8,10	2,06	9,22	
	47,81	31,01	16,45	7,60	1,61	9,49	
	46,71	32,80	15,51	8,00	3,05	11,60	
	47,85	29,78	15,70	7,96	1,91	8,95	
	47,38	31,20	15,60	8,02	1,69	9,22	
	47,84	32,33	17,83	8,00	1,81	8,82	
	47,74	30,40	17,35	8,21	1,59	9,43	
	46,92	31,18	15,42	7,90	2,38	10,06	
	47,43	29,85	14,97	8,14	1,54	8,24	
	46,90	31,75	15,64	8,09	2,29	10,30	
	48,48	30,41	17,19	8,02	2,34	9,07	
	47,36	30,14	16,22	8,07	1,99	8,67	
	46,88	31,00	16,20	7,98	2,31	9,97	
	47,76	28,84	15,92	7,96	2,25	9,35	
	46,89	28,91	14,42	8,03	1,74	9,38	
	48,16	29,91	13,65	7,96	1,53	9,44	

На основі таблиці прецедентів, яка була розділена на навчальне (70% всього масиву) і тестове (30% всього масиву) безлічі, була побудована ідентифікаційна модель безконтактного контролю всіх розмірів одночасно. Нейронна мережа, також, продемонструвала можливість обмежитися лише чотирма опорними частотами акустичних спектрів представлених зразків. Це частоти 8787 Гц., 10165 Гц., 15851 Гц. і 16540 Гц.

Тестування побудованої ідентифікаційної моделі показало, що середня помилка не перевищувала 0,6% (табл.3).

Таблиця 3

Результати тестування ідентифікаційної моделі

№	A	Прогноз сети	Ошибка	B	Прогноз сети	Ошибка	C	Прогноз сети	Ошибка
33	48.4	48.44065	-0.04065476	29.9	30.23416	-0.3341556	15.5	14.71071	0.7892933
34	48	47.79962	0.2003784	27.4	28.02312	-0.6231209	13.4	14.00104	-0.6010405
35	48	47.5041	0.4958954	30.8	31.06613	-0.2661297	16.8	16.07674	0.7232617
36	46.6	46.11515	0.4848457	30.4	29.80076	0.5992378	10.1	10.78918	-0.6891836
37	47.9	48.43053	-0.5305306	30	29.36971	0.6302948	11	11.87178	-0.8717775
38	48.2	47.55003	0.649974	31.4	32.0303	-0.6302963	15.6	16.22936	-0.6293567
39	46.96	47.60071	-0.6407118	30.88	30.7799	0.1001042	15.72	15.36464	0.3553636
40	48.32	48.665	-0.3449971	29.99	30.35273	-0.3627317	14.25	14.53494	-0.2849436
41	47.97	48.49156	-0.521558	31.76	32.28649	-0.5264876	17	16.98048	0.01951981
42	48.61	48.91718	-0.3071791	30.4	30.88914	-0.489143	14.6	15.44905	-0.849048
43	48.92	48.25619	0.6638126	30.17	29.51523	0.6547717	15.98	15.20192	0.7780786
44	48.3	47.66975	0.6302536	31.12	31.63974	-0.5197381	16.58	15.7285	0.8514968
		Правильно:	44 (100%)		Правильно:	44 (100%)		Правильно:	44 (100%)
		Неправильно:	0 (0%)		Неправильно:	0 (0%)		Неправильно:	0 (0%)
		Всего:	44		Всего:	44		Всего:	44
		Ср. ошибка:	0.4025835		Ср. ошибка:	0.4577485		Ср. ошибка:	0.5733256

Висновок

Таким чином, представлені ідентифікаційні моделі, побудовані на нейромережевому базисі, показали реальну можливість їх використання для створення системи діагностики об'єктів за кількома одночасного контролю не тільки геометричних характеристик об'єктів, а й їх фізико-механічних характеристик, включаючи показники напруженого стану, твердості і т.ін..

Література кількісними ознаками. Причому, кількість таких ознак, які можна контролювати одночасно, практично, не обмежена. Авторами роботи проведені додаткові дослідження, які показали можливість

1. Физическая акустика, под ред. У. Мэзона, пер. с англ., т. 2, ч. А, М., 1968, гл. 5, 6, ч. Б, М., 1969, гл. 1-3; т. 4, ч. А, М., 1969, гл. 4, ч. Б, М., 1970, гл. 4.
2. А.И. Коробов, В.А. Буров, К.В. Дмитриев, О.Д. Румянцев. Резонансная акустическая спектроскопия твердых тел. Методическая разработка спецпрактикума кафедры акустики. — М.: Физический факультет МГУ, 2012. 30 с.
3. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. — 403 с.
4. Ковалевський С. В. Дослідження способу акустичного діагностування нанопокриттів деталей машин / С. В. Ковалевський, Д. В. Коваленко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. — 2018. — № 1. — С. 84–89.
5. Ковалевський С. В. Концепція діагностики механізму мобільного верстата – робота для створення його еталонної моделі / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х. : НТУ «ХП», 2017. — № 26(1248). — С. 56–59.
6. Kovalevsky S. Acoustic Diagnostics of Lever Mechanisms with Subsequent Pro-cessing of Data on Neural Networks / S. Kovalevsky, O. Kovalevska, R. Turmanidze // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2019. — N 42. — P. 202–210.
7. Ковалевський С. В. Розробка та дослідження методу зменшення залишкових напружень в зварних конструкціях / С. В. Ковалевський, С. С. Савченко, І. А. Костюков // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. — 2018. — № 1. — С. 78–83.
8. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevsky // Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління», «Radio Electronics, Computer Science, Control». — 2018. — № 2 (45). — С. 51–59.
9. Ковалевський С. В. Актуалізація експертних моделей за допомогою нейронних мереж / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Харків, 2018. — № 34 (1310). — С. 11–14.
10. Ковалевський С. В. Управління якістю багаторізових різальних інструментів з механічним кріпленням пластин / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська, А. О. Кошевой // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2019) : матеріали тез доповідей IX Міжн. наук.-практ. конференції (м. Чернігів, 14–16 травня 2019 р.) : у 2-х т. — Чернігів : ЧНТУ, 2019. — Т. 1. — С. 71–73.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019