УДК 621.396.96

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА И ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА

Валуйский Д.В., *аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: valuyskiy.d.v@mail.ru*

VIBRATION DETECTION OF A ROTATING SHAFT USING A NON-CONTACT SENSOR AND LINEAR DISCRIMINANT ANALYSIS

Valuyskiy D.V.

The article is devoted to the study of problems of quality control of industrial machine shaft rotation using radar monitoring tools. Radar signals are reflected from a rotating industrial shaft, processed and then analyzed using a short-term Fourier transform. The signals are classified by the degree of uniformity of shaft rotation using the linear discriminant analysis method. As part of the study, an experimental stand was implemented, a set of signals was recorded and analyzed. The results of the experiments showed that the accuracy of the proposed approach to assessing the quality of shaft rotation is more than 98 %.

Key words: industrial shaft, vibrations, linear discriminant analysis, digital signal processing, classification, evaluation of rotation quality.

Ключевые слова: промышленный вал, вибрации, линейный дискриминантный анализ, цифровая обработка сигналов, классификация, оценка качества вращения.

Статья посвящена исследованию проблем контроля качества вращения валов промышленных машин с применением радиолокационных средств мониторинга. Радиолокационные сигналы отражаются от вращающегося промышленного вала, обрабатываются и затем анализируются с помощью кратковременного преобразования Фурье. Классификация сигналов по степени равномерности вращения вала осуществляется с помощью метода линейного дискриминантного анализа. В рамках проведенного исследования реализован экспериментальный стенд, записан и проанализирован набор сигналов. По итогам экспериментов показано, что точность предлагаемого подхода к оценке качества вращения вала составляет более 98 %.

Введение

Многие промышленные предприятия используют вращающиеся ролики и валы в рамках станков и другой аппаратуры на своих производственных линиях. Например, на фабриках по производству картона вращающиеся валы используются для подачи клея при формировании картона из нескольких слоев бумаги. Ролик должен вращаться очень плавно, без каких-либо вибраций и биений. В случае возникновения вибраций и неравномерностей вращения вала снижается качество производимой продукции, что влечет за собой дополнительные расходы. Кроме того, сильная разбалансировка валов может приводить к выходу из строя и разрушению промышленных станков, что помимо финансовых затрат влечет угрозу для жизни и здоровья обслуживающего персонала. Таким образом, постоянный и высокоточный контроль качества вращения валов и детектирование вибраций являются крайне важной и актуальной задачей.

Для оценки качества вращения валов может быть использован широкий спектр технических средств. В частности, виброметры, подключаемые непосредственно к вращающемуся валу, оптические датчики, камеры, лазерные виброметры. Однако, как следует из [1-2], оптические датчики и камеры подвержены пылевому загрязнению, а прямое подключение виброметра к валу может быть сложно реализуемо в условиях производственного цеха. Таким образом, использование радаров для оценки качества вращения роликов является одним из наиболее перспективных вариантов в настоящее время. Радары невосприимчивы к пылевому загрязнению и позволяют осуществлять дистанционный контроль и оценку качества вращения вала без непосредственного контакта. В большинстве работ [3-7] для оценки качества вращения валов предлагается использовать 2x и 3x компоненты спектра сигнала, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для неравномерно вращающегося вала будет наблюдаться сильное увеличение этих компонент спектра. Дальнейший анализ полученного спектра может быть проведен различными способами, например, с использованием автокорреляционных алгоритмов [3].

В данной работе рассматривается использование радиолокационного датчика в качестве источника информации о вращении вала. Вместо стандартных методов анализа с применением алгоритма БПФ, которые используют большие временные интервалы для улучшения разрешения по частоте, предлагается исследовать возможность обнаружения колебаний ролика на основе динамики параметров сигнала в пределах одного оборота.

В рамках проведенного исследования предлагается использовать спектрограммы в качестве отправной точ-

ки для дальнейшего анализа. Далее используется t-тест для выбора частотных каналов, содержащих наиболее статистически значимую информацию о вращении вала [8-11]. Предлагается сократить количество статистически значимых признаков сигнала с помощью простого статистического анализа и, наконец, использовать подход линейного дискриминантного анализа (LDA) в качестве правила принятия решения [12-15]. Для апробации алгоритма реализован экспериментальный стенд. Показана высокая эффективность алгоритма классификации, достигающая 98% выявления дефектов.

Постановка задачи

Схема радиолокационного устройства контроля вращения валов представлена на рисунке 1.

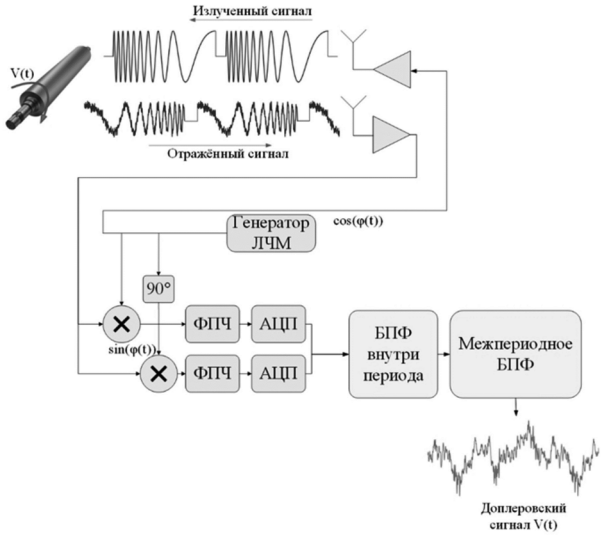


Рисунок 1. Устройство контроля вращения промышленных валов

Радар миллиметрового диапазона с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) может использоваться для дистанционного зондирования вращающегося вала. Сигнал, отраженный от вала, будет смешан с опорным сигналом от передатчика, затем оцифрован и обработан. Обработка сигнала радара состоит из применения двух последовательных операций БПФ. Первая операция БПФ используется для извлечения информации о дальности (БПФ внутри периода сигнала), а вторая операция БПФ используется для извлечения информации о доплеровском эффекте или скорости (межпериодное БПФ) [16].

Целью проводимого исследования является анализ спектра доплеровского сигнала, полученного после применения межпериодного БПФ. Информация, полученная в результате анализа спектра доплеровского сигнала, может быть использована для оценки качества вращения ролика. Таким образом, задача заключается в выявлении закономерностей и зависимостей между качеством вращения вала и закономерностями изменений спектра доплеровского сигнала. Одним из известных методов такой оценки является алгоритм линейного дискриминантного анализа [12].

Теоретические положения

Первый этап обработки сигнала – вычисление кратковременного преобразования Фурье (STFT) [18]:

$$X(k,l)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)x(n+lL)e^{-j\omega_k n}, \quad (1)$$

где $x(n)$ – входной сигнал, $h(n)$ – оконная функция, $\omega_k = 2\pi k/M\,Б \quad k=0,1,\dots M-1$ описывают индексы частот, N – размер окна в отсчетах сигнала, L – величина перекрытия сигналов при вычислении STFT. Спектрограмма сигнала определяется как $|X(k,l)|$. Спектрограмма показывает частотно-временное распределение энергии сигнала. Появление всплесков или биений в распределении энергии сигнала будет означать возникновение неравномерностей и разбалансировки вращения вала.

После обработки полного набора записанных сигналов получим N_s спектрограмм для сигналов, отраженных от исправного вала, и N_f спектрограмм, отраженных от неисправного, вращающегося с биениями вала.

Двухкомпонентный *t*-тест представляет собой параметрический тест, который используется для проверки нулевой гипотезы о статистических различиях в выборках независимых числовых последовательностей с нормальным распределением. Статистика теста рассчитывается по уравнению (2) [19]:

$$t=\frac{x-y}{\sqrt{\frac{D_x^2}{n}-\frac{D_y^2}{m}}}, \quad (2)$$

где x и y – математическое ожидание значений отсчетов, D_x и D_y – дисперсия, n и m – размеры последовательностей отсчетов сигнала.

Дисперсия может быть рассчитана в соответствии с уравнением

$$D_s=\sqrt{\frac{(n-1)D_x^2+(m-1)D_y^2}{n+m-2}} \quad (3)$$

Как правило, статистика при нулевой гипотезе имеет вид, близкий к распределению Стьюдента. Таким образом, для нормальных данных и равных дисперсий описанный выше алгоритм может быть использован с достаточной высокой точностью [19].

Перед применением любого алгоритма классификации необходимо нормализовать данные, полученные из сигналов, отраженных от поврежденных и неповрежденных роликов. Нормализацию можно осуществить по уравнению

$$s_i=\frac{s_i-M_s}{D_s}, \forall i=\overline{1,length(s)}, \quad (4)$$

где M_s определяет среднее математическое набора данных, D_s дисперсия анализируемых данных. Параметры и условия регистрации сигналов могут сильно различаться от эксперимента к эксперименту. Для нормализованных данных возможно использование типового решателя, не зависящего от условий регистрации данных.

Линейный дискриминантный анализ – метод, используемый в статистике для классификации двух или более классов по некоторым признакам. В случае классификации данных на две категории задача алгоритма LDA

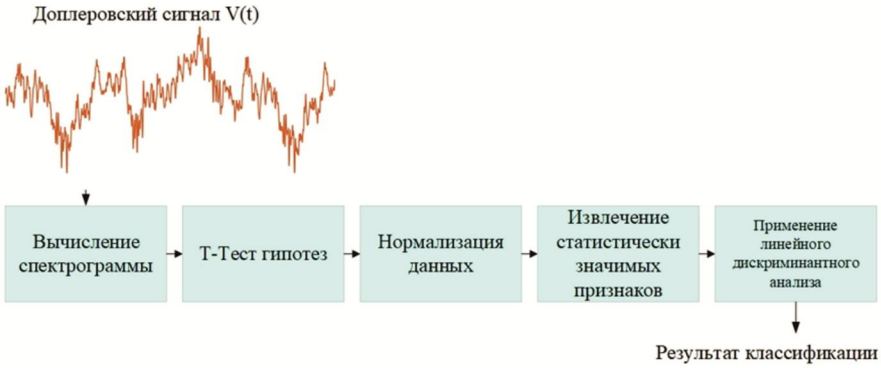


Рисунок 2. Алгоритм классификации

состоит в минимизации внутриклассовой дисперсии и, в то же время, в максимизации межклассовой дисперсии для набора данных, который можно классифицировать на два типа [11].

Межклассовая дисперсия описывается в соответствии с выражением

$$S_B = \sum_{i=1}^{2} x_i S_{B_i}, \quad (5)$$

где S_{B_i} представляет межклассовую дисперсию для i-го класса, x_i – текущий отсчет сигнала из набора данных.

Внутриклассовая дисперсия, в свою очередь, описывается выражением

$$S_W = \sum_{i=1}^{2} (x_i - M_i)(x_i - M_i)^T, \quad (6)$$

где M_i – математическое ожидание для i-го класса.

В рамках проводимого исследования в экспериментах в качестве входного набора данных для алгоритма линейного дискриминантного анализа будут использоваться доплеровские сигналы, отраженные от вращающихся валов. Сигналы будут предварительно обработаны с помощью алгоритма дискретного преобразования Фурье для извлечения информации о наличии биений во вращении вала в спектре отраженного сигнала.

Предлагаемый алгоритм

Алгоритм обработки данных и классификации промышленных роликов, в соответствии с изложенной выше теорией, можно описать в соответствии с рисунком 2. Из рисунка 1 выше видно, что результатом цифровой обработки отраженного сигнала является доплеровский сигнал. Информацию о скорости цели можно извлечь из этого сигнала с помощью БПФ или STFT для получения карты распределения энергии по времени и частоте. Затем, используя гипотезу t-теста, можно оценить статистически значимые частотные каналы сигналов.

После нормализации данных могут быть извлечены ключевые характеристики сигналов в наборе данных. Формирование характеристик основано на оценке среднего значения и стандартного отклонения спектров сигналов. Полученный набор признаков используется в качестве основы для реализации алгоритма LDA для классификации вращающихся валов.

Результатом работы алгоритма является классификация отраженного от ролика сигнала в логической форме. Неповрежденный ролик будет классифицирован алгоритмом со значением 0, поврежденный – со значением 1.

Экспериментальный стенд

Эксперименты, проводимые в ходе исследовательской работы, заключаются в регистрации, цифровой обработке и анализе сигналов, отраженных от вращающихся металлических валов. Испытательный стенд был реализован на базе токарного станка. В состав испытательного стенда также входит плата радара AWR1642boost, совмещенная с модулем регистрации сигналов DCA1000 [16, 17]. Для обработки сохраненных записей сигналов используется персональный компьютер с использованием специально подготовленного программного обеспечения.

В рамках проведенного исследования сконструирован испытательный стенд, состоящий из описанных выше компонентов. Общий вид испытательного стенда показан на рисунок 3. В ходе экспериментов необходимо было имитировать биения для моделирования неисправности вала. Неисправность промышленного вала моделируется путем нарушения соосности вращения испытательного металлического стержня. Сигналы регистрировались при различных смещениях оси ролика (0, 1,5 и 2 мм). Расстояние от радара до вращающегося ролика находится в диапазоне от 10 см до 15 см. Период повторения зондирующего сигнала может быть выбран из двух случаев: 160 или 860 микросекунд.

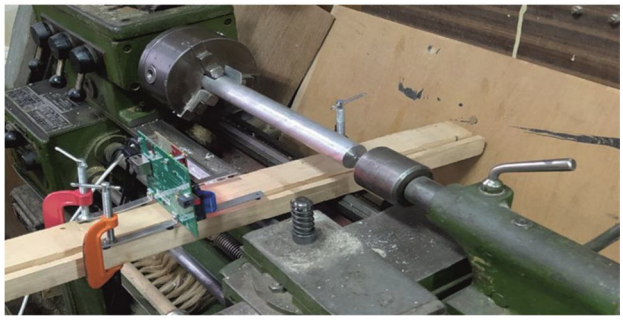


Рисунок 3. Экспериментальный стенд

Пример полученных в ходе эксперимента отраженных сигналов во временной области показан на рисунке 4.

В проведенных экспериментах используется подход, основанный на применении линейного дискриминантного анализа для классификации отраженных доплеровских сигналов, предварительно обработанных с помо-

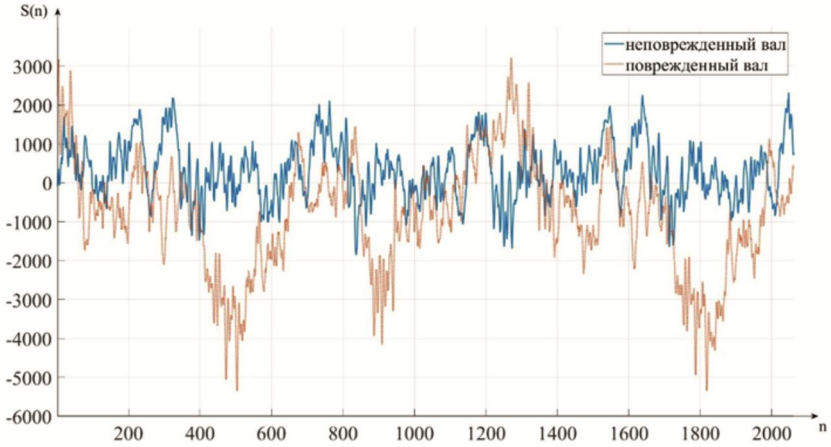


Рисунок 4. Записанные экспериментальные сигналы во временной области

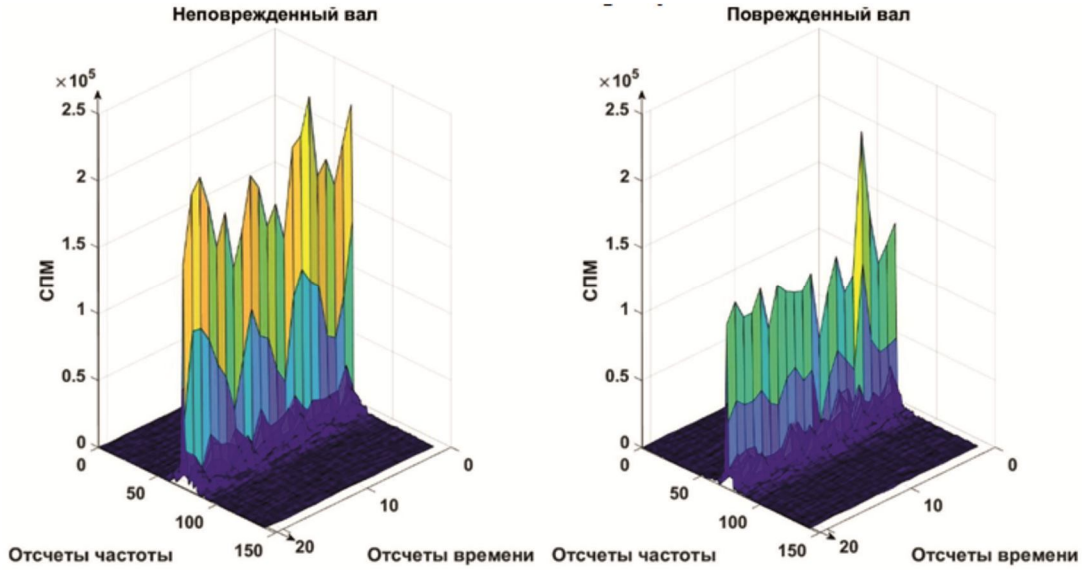


Рисунок 5. Спектрограммы отраженных сигналов

щью дискретного преобразования Фурье. Классификация выполняется по записанному набору данных сигналов, отраженных от неповрежденного и поврежденного вращающегося вала с различными параметрами радара, скоростью вращения вала и степенью нестабильности вала.

Анализ сигналов. Результаты эксперимента

Рассмотрим подход к анализу полученных в ходе эксперимента сигналов в соответствии с описанным выше алгоритмом LDA. Анализируемые сигналы имеют длительность 0,5 секунды и частоту дискретизации 3125 Гц. Такая длительность соответствует одному обороту вала, скорость вращения которого составляет 120 оборотов в минуту.

На первом этапе необходимо получить набор спектрограмм для всех сигналов, записанных для вала, вращающегося равномерно, и для вала, вращающегося с биениями. Трехмерная модель данных, полученных в результате применения кратковременного преобразования Фурье к экспериментальным записям сигналов, показана на рисунке 5.

Показанная на рисунке 5 трехмерная модель представляет собой пример спектрограммы для записанного набора сигналов, демонстрирующий обобщенную картину распределения СПМ по различным каналам частоты и времени. С помощью анализа такой обобщенной картины затем, используя *t*-тест, необходимо определить статистически значимые частотные каналы для полученных спектрограмм. Пример набора статистически значимых каналов для одного из сигналов экспериментального набора данных показан на рисунке 6.

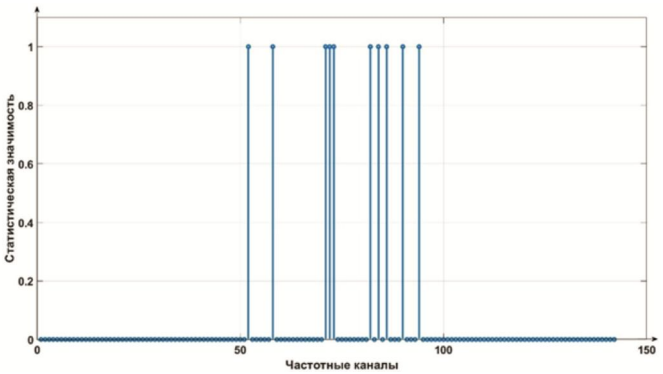


Рисунок 6. Статистически значимые частотные каналы сигнала

Из рисунка 6 видно, что статистическую значимость имеют данные в 10 частотных каналах. Таким образом,

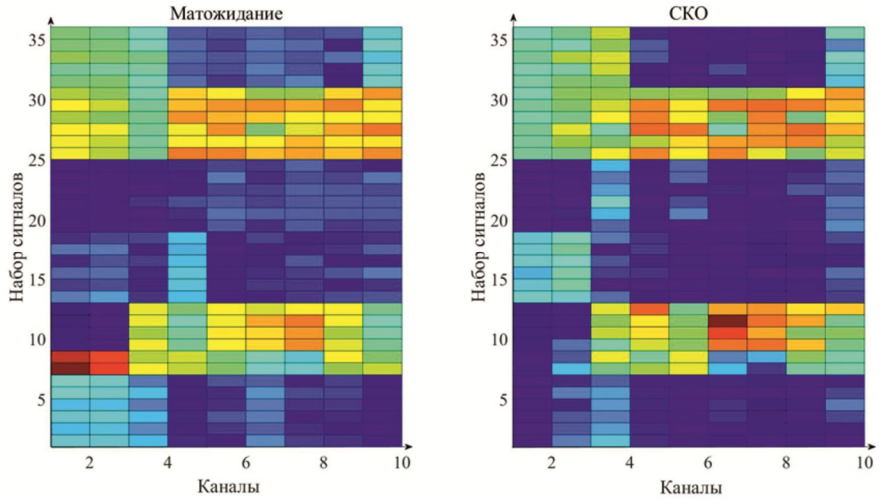


Рисунок 7. Математическое ожидание и дисперсия для статистически значимых каналов дальности

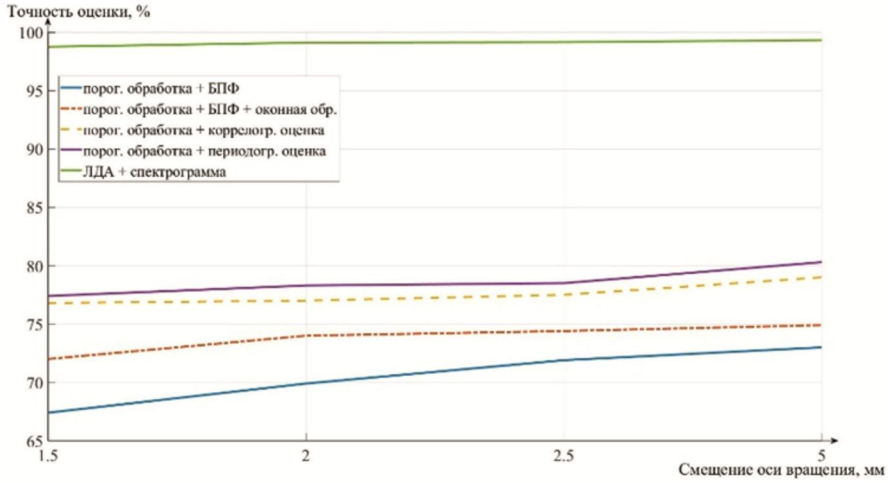


Рисунок 8. Сравнение точности оценка качества вращения вала. ЛДА и классические алгоритмы

остальные каналы, ввиду малой статистической значимости, могут быть исключены из дальнейшей обработки, что существенно снижает вычислительные затраты на реализацию алгоритма. Далее необходимо сформировать карту мягких оценок ключевых признаков сигналов в соответствии с выражениями (3)-(6), оценив математическое ожидание и дисперсию для отсчетов сигнала в статистически значимых частотных каналах. Карты ключевых признаков сигналов для математического ожидания и дисперсии в статистически значимых каналах представлены на рисунке 7.

Показанные на рисунке 7 матожидание и дисперсия для статистически значимых каналов дальности используются как входные данные для применения алгоритма линейного дискриминантного анализа. Завершающий этап анализа – применение алгоритма линейного дискриминантного анализа к полученным данным. Далее требуется оценить точность классификации с использованием сигналов, которые не участвуют в формировании оценки качества вращения вала с использованием LDA. Вероятность ошибки в результате составляет 0,0278, что соответствует более чем 98% точности классификации с использованием алгоритма линейного дискриминантного анализа.

Сравнительный анализ некоторых классических алгоритмов обработки сигнала с использованием БПФ и предложенного алгоритма ЛДА с использованием спектрограммы сигнала для выявления дефектов вала для различных значений отклонения оси вращения представлен на рисунке 8.

Как видно из рисунка 8, предлагаемый в рамках проведенного исследования алгоритм позволяет добиться повышения точности оценки качества вращения вала на величину порядка 15 % при отклонениях вала от оси вращения в пределах 5 мм.

Заключение

В рамках проведенного исследования рассмотрен ряд возможных подходов к оценке качества вращения промышленных валов. Предложен метод оценки качества вращения валов с использованием алгоритма линейного дискриминантного анализа. Рассмотрены теоретические аспекты реализации алгоритма линейного дискриминантного анализа.

Подготовлен экспериментальный стенд на базе токарного станка для моделирования промышленных валов. Записан набор экспериментальных сигналов для равномерно вращающегося вала, а также для вала с имитацией биений и разбалансировки вращения. Для полученного набора экспериментальных данных применен алгоритм классификации с использованием метода линейного дискриминантного анализа.

Экспериментально подтверждено, что динамика изменения спектра отраженного сигнала свидетельствует

о неравномерном вращении вала и может быть оценена с помощью спектрального анализа и методов статистического анализа. В частности, применение метода линейного дискриминантного анализа для классификации сигналов по признаку «поврежденный»/«неповрежденный» вал демонстрирует точность обнаружения дефектов вращения вала. Точность оценки качества вращения вала составляет порядка 98 %.

Литература

1. Radar Systems for Modern Civilian Applications: Part 1. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 36, num. 4, (2019).
2. Radar Systems for Modern Civilian Applications: Part 2. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 36, num. 5, (2019).
3. Gradzki R., Kulesza Z., Bartoszewiczoster B.: Method of shaft crack detection based on squared gain of vibration amplitude. Nonlinear Dyn 98, pp. 671-690 (2019).
4. Ma, H., Zhao, Q., Han, Q., Wen, B.: Dynamic characteristics analysis of a rotor-stator system under different rubbing forms. Appl. Math. Model. 39, pp. 2392-2408 (2015).
5. Patel, T.H., Darpe, A.K.: Vibration response of misaligned rotors. J. Sound Vib. 325, pp. 609-628 (2009).
6. L. Tang, X. Wu, D. Wang and X. Liu, «A Comparative Experimental Study of Vibration and Acoustic Emission on Fault Diagnosis of Low-Speed Bearing», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-11, 2023.
7. Bharadwaj R., et al.: Condition Monitoring Using Standoff Vibration Sensing Radar. AHS Airworthiness, CBM, and HUMS Specialists' Meeting, Huntsville, AL. (2013).
8. E. Skovlund and G. Fenstad, «Should we always choose a nonparametric test when comparing two apparently nonnormal distributions?», J Clin Epidemiol, vol. 54, pp. 86-92, 2001.
9. H.M. Park, «Comparing group means: t-tests and one-way ANOVA using Stata SAS R and SPSS», Indiana University, 2009.
10. Fei Yetai, Error theory and data processing. Beijing: China Machine Press, 2010.T-test
11. S. Balakrishnama and A. Ganapathiraju, Linear discriminant analysis-a brief tutorial, Institute for Signal and Information Processing (1998).
12. G. Baudat and F. Anouar, Generalized discriminant analysis using a kernel approach, Neural Computation 12(10) (2000), pp. 2385-2404.
13. T.-t. Feng and G. Wu, A theoretical contribution to the fast implementation of null linear discriminant analysis method using random matrix multiplication with scatter matrices, 2014.
14. J.H. Friedman. Regularized discriminant analysis, Journal of the American Statistical Association 84(405) (1989), pp. 165-175.
15. T. Hastie and R. Tibshirani, Discriminant analysis by Gaussian mixtures, Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) (1996), pp. 155-176.
16. S. Patole, M. Torlak, D. Wang, M. Ali. Automotive Radars. A review of signal processing techniques. IEEE Signal Processing Magazine. № 3, 2017. с. 22-35.
17. AWR1642 Evaluation Module (AWR1642BOOST) Single-Chip mmWave Sensing Solution User's Guide, Texas Instruments, (2020).
18. Merrill Skolnik, Radar Handbook, 3rd ed. McGraw Hill Companies, 2008.
19. Fadem, Barbara. High-Yield Behavioral Science. High-Yield Series. Hagerstown, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 2008.

У в а ж а е м ы е а в т о р ы !

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- *Текст – текстовый редактор Microsoft Word, формулы –* ***в редакции MathType****.*
- *Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.*
- *Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.*
- *Название статьи на русском и английском языках.*
- *Рукопись статьи сопровождается: краткой аннотацией на русском и английском языках; номером УДК; сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).*

2) Требования к иллюстрациям:

- *Векторные (схемы, графики) – желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.*
- *Растровые (фотографии, рисунки) – М 1:1, разрешение не менее 300 dpi, формат tiff.*