

Пересыпкин Данил Евгеньевич, студент гр. 6362, ст. лаборант НИЛ-54, danil.peresypkin.1990@mail.ru

Ворох Дмитрий Александрович, научный руководитель, к.т.н., ст. преподаватель каф. радиотехники, fallout2s@yandex.ru

УДК 620.179.18; 620.1.051

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ТУРБОАГРЕГАТОВ

А.И. Данилин, Д.С. Малахов, А.Ж. Чернявский
«Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королёва», г. Самара

Ключевые слова: ДФМ-метод, искусственная нейронная сеть.

В настоящее время становятся всё более распространённым решение прикладных задач при помощи методов машинного обучения, в особенности с применением искусственных нейронных сетей (ИНС), популярность которых постоянно растёт. Одной из актуальных задач является диагностика состояния лопаточного аппарата турбоагрегатов, так как они являются ключевыми элементами в турбомашинах.

Целью работы является оценка текущего состояния предлагаемых решений на основе дискретно-фазового метода (ДФМ) с применением ИНС.

ДФМ является наиболее перспективным для нахождения вибрационных откликов [1-2], однако, ему присущи недостатки, выражающиеся в том, что получаемые данные всегда недодескриптивизированы. Как следствие, для извлечения из ДФМ-сигнала вибрационных параметров необходимо применение алгоритма его восстановления [3].

По анализу публикаций был сделан вывод, что традиционными методами свойственен недостаток, выражающийся в необходимости обладания априорными данными, необходимыми для регуляризации решения. Помимо этого, традиционные методы позволяют судить лишь о том, повреждена лопатка или нет, но при этом сложно локализовать и установить степень тяжести повреждения самой лопатки [4].

В отличие от традиционных методов, машинное обучение требует наличия обученной модели, которая способна извлекать характерные признаки напрямую из входных данных. Таким образом, применение машинного обучения на ДФМ-данных могло бы стать новым методом для работы с недодескриптивизированным сигналом. При анализе повреждения лопаток на основе машинного обучения возможно эффективно анализировать большое количество данных, автоматически извлекать

признаки поломок и тем самым быстро выдавать решение. Сверточная нейронная сеть (СНН) является одним из наиболее эффективных методов машинного обучения, позволяющий избежать проблемы переобучения.

В открытых источниках существуют две работы [5, 6], напрямую относящиеся к поставленной задаче, решение которой было получено с использованием методов машинного обучения.

Авторский коллектив Китайского Нефтяного Университета [5] своим решением предложил использовать ДФМ в связке с СНН, которая может быть обучена на чувствительных к трещинам признаках. В связке с временными данными ВТТ используется значение зазора ТС. Частота вибрации лопадки используется как параметр, на основании которого отслеживается её состояние. На основе предложенной СНН исследуется 16 классов дефектов (отсутствие повреждений, повреждения на торцах, в середине и в корневом сечении лопадки). Из 150 наборов данных, 50 отводится на обучение модели, 100 – для верификации. Далее обученная модель дополняется статистическими ТС-данными при помощи КРСА-метода (kernel principal component analysis). Применение КРСА позволяет повысить точности модели до 95%, без - 87%. Применение же традиционного частотно-вибрационного метода (V-F) позволяет достичь только обнаружения трещин с точностью до 82%, но не локализовать дефект.

Аналогичная работа [6] в своём решении также использует ДФМ в связке с СНН, решая задачу идентификации тяжести повреждения лопадки, во много опираясь на опыт [5]. Существенным является то, что предложенный метод уже способен диагностировать сразу две трещины и их локализации одновременно, что невозможно для традиционных методов на основе ВТТ, не для традиционных методов машинного обучения, таких как Gaussian Process (GP), Support Vector Machines (SVMs), eXtreme Gradient Boosting (Xgboost), K Nearest Neighbor (KNN), Random Forests (RFs). На экспериментальных данных точность нахождения трещины составила 91.6%, локализации – 88.2%. Представлен цифровой двойник на основе параметрической вибрационной модели, что позволяет воссоздать ВТТ-сигналы, на основе которых возможна проверка эффективности методов машинного обучения.

Анализ показал, что до сих пор остаются нерешенными такие задачи, как:

- Разработка общей концепции использования СНН диагностики состояния турбоагрегата для унификации диагностических подходов – предложенные в проанализированных работах СНН построены по эвристическому принципу;
- Разработка методов и средств идентификации типа возбужденного колебания;

- Разработка методов диагностики с учётом влияния вибраций диска, изменения скорости вращения и нагрузки;
- Повышение точности за счёт использования рекуррентных нейронных сетей RNN, так как наличие обратной связи потенциально позволит предыдущие состояние системы;
- Реализация генеративных моделей по типу «параметры-сигнал».
- Реализация средств диагностики с применением устройств краевых вычислений (edge-computing).

Список использованных источников

1. Rzdkowski, R.; Rokicki, E.; Piechowski, L. Analysis of middle bearing failure in rotor jet engine using tip-timing and tip-clearance techniques. *Mech. Syst. Signal Process.* 2016, 76–77, 213–227.
2. García, I.; Beloki, J.; Zubia, J. An Optical Fiber Bundle Sensor for Tip Clearance and Tip Timing Measurements in a Turbine Rig. *Sensors* 2013, 13, 7385–7398.
3. Pan, M.H.; Yang, Y.M.; Guan, F.J. Sparse Representation Based Frequency Detection and Uncertainty Reduction in Blade Tip Timing Measurement for Multi-Mode Blade Vibration Monitoring. *Sensors* 2017, 17.
4. Di Maio, D.; Ewins, D.J. Experimental measurements of out-of-plane vibrations of a simple blisk design using Blade Tip Timing and Scanning LDV measurement methods. *Mech. Syst. Signal Process.* 2012, 28, 517–527.
5. Ji-wang, Zhang Lai-bin, Zhang Li-xiang Duan, A Blade Defect Diagnosis Method by Fusing Blade Tip Timing and Tip Clearance Information, July 2018 *Sensors* 18(7):2166
6. Guangya Zhu, Chongyu, WangChongyu, WangWei, ZhaoShow, Blade Crack Diagnosis Based on Blade Tip Timing and Convolution Neural Networks, January 2023 *Applied Sciences* 13(2):1102

Данилин Александр Иванович, д.т.н., доцент, профессор, зав. каф. радиотехники, aidan@ssau.ru.

Малахов Дмитрий Сергеевич, аспирант каф. радиотехники, fulton97.dm@gmail.com.
Чернявский Аркадий Жоржевич, к.т.н., инженер каф. радиотехники ark@vaz.ru

УДК 621.372.54

ПРОБЛЕМА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГВЗ ЧЕБЫШЕВСКИХ И ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ППФ

Е.Ю. Дяченко, А.М. Плотников
Самарский филиал – «СОНИИР» ФГБУ НИИР, г Самара

Ключевые слова: полосно-пропускающие фильтры, неравномерность в полосе пропускания, групповое время задержки, избирательность.