

УДК 621.3.049.77–048.24:537.2

ПРЕДСКАЗАНИЕ СИГНАЛОВ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ*Дановский В.Д.**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь**Научный руководитель: Ролич О. Ч. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ПИКС*

Аннотация. Исследованы спектрограммы изношенной и неизношенной топливной форсунки. Разработана предсказательная модель на основе LSTM-нейронной сети. Предложены мероприятия по улучшению предсказательной точности модели и методология использования полученных результатов.

Ключевые слова: стационарный процесс, нейронная сеть, линейное предсказание

Введение. Всякий сигнал, будь то природы звуковой, электромагнитной, сейсмической или геофизической содержит в себе информацию о предмете его породившем. Работа с подобными источниками обуславливает необходимость изучения порождаемых ими сигналов для прогнозирования их состояния, функционирования или иного критерия, требуемого для работы с ними и решения поставленной практической задачи. С развитием информационных технологий становятся популярны методы линейных предсказаний на основе различного рода нейронных сетей, вариант которой будет рассмотрен для исследования работы и оценки износа топливной форсунки и прогнозирования их функционирования в целях предотвращения аварий.

В качестве исследуемого процесса были взяты сигналы MEMS-акселерометра LIS3D, закреплённого произвольным образом на форсунке BOSCH на испытательном стенде CR Jet-4E [1].

Исследование сигналов основывается на спектральном анализе с вычислением спектрограмм. А непосредственными источниками данных выступают неизношенная и изношенная дизельные форсунки.

Линейное предсказание значений с акселерометра, при которых дизельная форсунка будет считаться изношенной позволяет путем сравнения спектрограмм оценивать примерное состояние детали в данный момент, и, в случае необходимости, упреждительно принимать меры о её замене.

Основная часть. На рисунке 1 изображены спектрограммы исследуемых сигналов MEMS- акселерометра для всех трёх его осей у изношенной (а) и неизношенной (б) форсунок. Устройство установлено непосредственно на корпусе дизельной форсунки, работающей в идентичных режимах при одинаковом давлении.

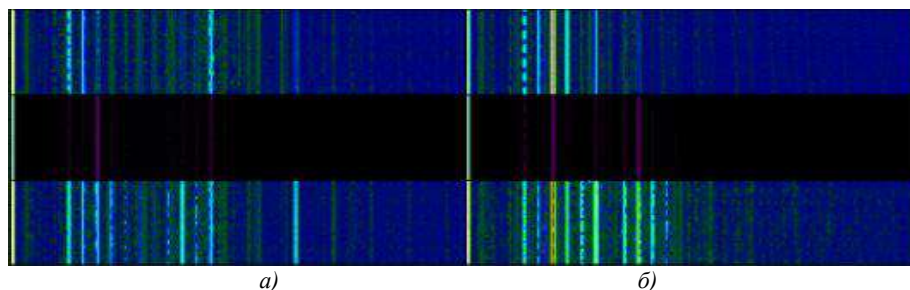


Рисунок 1 – Спектрограммы сигналов MEMS-акселерометра для изношенной (а) и неизношенной (б) дизельных форсунок.

Представленный на рисунке 1 фрагмент спектрограммы, был реализован на базе окна Хэмминга, длиной скользящей выборки 512 отсчётов, её последовательным сдвигом на 64 отсчёта и частотой дискретизации 1600 отсчётов/с. Анализируя этот фрагмент, полученный в стационарном режиме работы форсунок под давлением 158 бар следует отметить значительно

большую ширину спектра вибраций у изношенной форсунки [2]. Из-за деформации поверхности иглы распылителя и расшатывания пружины форсунки в процессе её длительной эксплуатации и износа спектры различаются наличием 16 и 8 пиков для изношенной и неизношенной форсунки соответственно, а ширина спектра изношенной форсунки на 100 Гц больше неизношенной.

Опираясь на вышеописанный пример анализа спектрограммы, таким же образом будет проводиться оценка изношенности форсунки при снятии показаний в определенный момент времени с предсказанными показаниями модели.

Так как данные с акселерометра являются временным рядом, то моделью линейного предсказания будет выступать *LSTM*-нейронная сеть. Благодаря особенностям этого вида рекуррентной нейронной сети в виде повторения модулей с комбинацией четырех слоев, взаимодействующих друг с другом, она обладает с способностью изучать долгосрочные зависимости в данных [3]. На рисунке 2 представлена схема модуля описываемой сети.

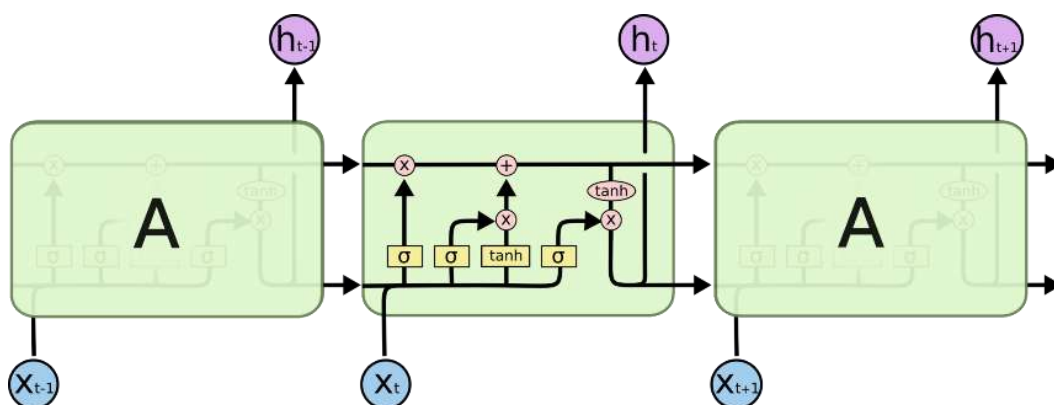


Рисунок 2 – Модуль *LSTM*-нейронной сети

Для обучения и тестирования сети были взяты те же исследуемые данные изношенной и неизношенной форсунок, разделённые в пропорциях 3 к 1 для обучающей и тестируемой выборки соответственной. Итоговыми данными является массив векторов, содержащих значения 16 отсчетов по каждой оси со сдвигом на 1 отсчет. Архитектура самой сети представляет собой 4 *LSTM*-слоя с 50 модулями в каждом и 1 полносвязный слой для выходных значений. Для оптимизации весов сети использовалась функция *Adaptive moment estimation (Adam)*, а в качестве функции ошибки - средняя квадратическая ошибка.

На рисунке 3 представлен результат сети после 25 обучающих эпох (б), при переданных данным (в) и ожидаемый результат (а).

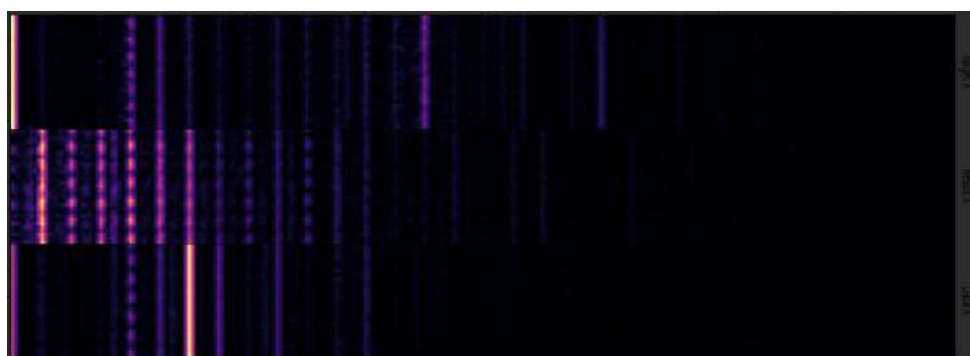


Рисунок 3 – Спектрограммы ожидаемого результата сети (а) полученного (б) и передаваемых данных дизельных форсунок по оси X

Таким образом, модель с точностью 39% предсказывает при каких значениях форсунка будет близка к своему изношенному состоянию. К сожалению, такой коэффициент точности не позволяет обобщить модель, что говорит о необходимости доработки архитектуры, дообучения (так как эффекта переобучения не наблюдается) или разработки собственной функции ошибки для валидации данных.

Заключение. Опираясь на всё вышесказанное, износ форсунки рекомендуется оценивать по ширине вибрационного спектра сигнала акселерометра, закреплённого произвольным образом на её корпусе. Таким же методом, при создании модели линейного предсказания, способной к обобщению, возможно при промежуточном снятии показаний с форсунки оценивать её состояние, анализируя полученную спектрограмму с предсказанной. Особый научный интерес представляют процессы размножения гармоник и детектирования новых частот в вибрационном спектре с оценкой износа и вычислением остаточного ресурса в реальном времени.

Список литературы

1. Жеико, А. А. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А. А. Жеико, В. Е. Тарасенко, О. Ч. Роллч, А. В. Дунаев // *Технический сервис машин*. – 2021. – Т. 59 – № 1 (142) – С. 55 – 64. – Режим доступа: <http://vintsm.ru/wp-content/uploads/2021/07/%E2%84%961-142-2021.pdf>.
2. Тарасенко, В. Е. Алгоритмы обработки сигналов в интегрированной системе виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / В. Е. Тарасенко, О. Ч. Роллч, Д. А. Михаевич // *Агропанорама*. – 2020. – № 6 – С. 38 – 41. – Режим доступа: <https://ar.bsatu.by/images/files/2020/AgroP-2020-06-int.pdf>.
3. Николенко, С. Рекуррентные нейронные сети или Как правильно кусать себя за хвост. LSTM / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. // *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. – Питер, 2018. – Гл. 6. – С. 231–248.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

PREDICTION OF STATIONARY PROCESS SIGNALS

Danovski V.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Rolich O.Ch. – PhD, assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. Were investigated spectrograms of new and worn-out fuel injector. Has been developed a predictive model based on the LSTM neural network. Measures to improve predictive accuracy of the model and methodology of using the obtained results are proposed.

Keywords: stationary process, neural network, linear prediction