

DOI:

ВЫЯВЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ СТАРЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Спиридонов С.В., Вороничев П.П., Колоколов А.С., Искаков А.Б

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва

ул. Профсоюзная д.65

ssv@ipu.ru

Аннотация: В этом докладе мы приводим результаты первичной обработки данных реального эксперимента, проведённого в Институте проблем управления в 2020 году, по исследованию старения электродвигателя U5 KV400, разработанного фирмой T-motor для применения в коптерах. По мере износа двигателя зафиксировано увеличение амплитуды вибрационного и звукового сигналов и определены частоты, на которых это происходит. В частности, повышение амплитуды вибраций и звука на частоте магнитострикции может служить информативным признаком повышенной изношенности двигателя.

Ключевые слова: диагностика, информативные признаки, износ двигателя.

Введение

Выявление информативных признаков старения двигателей представляет большой практический интерес, поскольку позволяет эффективно выявлять их изношенность. Своевременная диагностика и замена двигателей в коптерах дают возможность предотвращать аварии и падение аппаратов, которые приводят к потере как самих коптеров, так и установленного на них дорогостоящего оборудования.

В настоящее время хорошо развиты методы диагностики роторного оборудования на основе спектрального разложения вибросигналов и расчета различных характеристик спектра (среднеквадратичного значения, пик – фактора и т.д.) [1, 2, 3]. Вместе с тем, развиваются и другие подходы к диагностике состояния вращающихся частей оборудования, например, на основе оценки микровариаций вращения вала [4].

С целью исследования процесса старения синхронного электродвигателя, с начала 2020 года в Институте проблем управления проводится эксперимент, в ходе которого электродвигатель U5 KV400, предназначенный для небольшого коптера, непрерывно работает на стенде в режиме нормативной нагрузки уже в течение почти трёх месяцев. С помощью датчиков ежедневно, в течение интервалов времени примерно 10 секунд, записываются сигналы тока, напряжения, вибраций и звука, которые должны со временем начать выявлять признаки старения двигателя.

В отличие от многих других экспериментов по ресурсным испытаниям двигателей, особенность проводимого эксперимента состоит в том, что частота вращения пропеллера (100 Гц) сильно отличается от частоты питания (700 Гц). Предполагается, что такое отличие в частотах поможет зафиксировать отдельно друг от друга механические эффекты и электромагнитные эффекты в динамике состояния двигателя.

В докладе приводятся первичные результаты обработки экспериментальных данных, полученных в течение первых 2000 часов наработки двигателя. Хотя эксперимент продолжается, полученные результаты уже выявили первые систематические признаки изменения состояния двигателя, связанные с увеличением амплитуды вибрационного и звукового сигналов. В основном это увеличение наблюдается на частоте магнитострикции, что позволяет сделать предположения об изменениях, происходящих в статоре двигателя.

1 Описание эксперимента

В ходе эксперимента исследуется синхронный электродвигатель U5 KV400, разработанный фирмой T-motor для применения в коптерах. Основные характеристики двигателя следующие:

Двигатель трехфазный, обмотки соединены в треугольник;

Конфигурация – 12N14P, статор 12-ти полюсной, на роторе 14 постоянных магнита;

Мощность – 400 Вт, пиковая – 800 Вт (в течение 180 сек);

Частота вращения ротора в 7 раз меньше частоты питания;

Двигатель рассчитан на питание от 6-секционного Li-полимерного аккумулятора через специальный мостовой преобразователь, формирующий три биполярных ШИМ-модулированных напряжения, частота которых задается отдельным входным сигналом.

Для проведения ресурсных испытаний был создан стенд с жестко закрепленным двигателем. Нагрузкой служит пропеллер, создающий поток воздуха. На стенде установлены датчики, позволяющие измерять:

Вибрации статора двигателя (датчик виброускорений);

Акустические шумы двигателя (измерительный микрофон);

Скорость вращения ротора (фотодатчик фиксирующий пересечение светового потока лопастью пропеллера).

Кроме того, измеряются электрические параметры: три фазных тока датчиками на основе эффекта Холла и три фазных напряжения, снимаемых с трех делителей напряжения соединенных в звезду.

Каждый сигнал, кроме сигнала фотодатчика, пропускается через анти-элайзинговый фильтр Баттерворта 8-ого порядка, позволяющий дискретно изменять частоту среза (1, 2, 4, 8, 16 КГц). Все сигналы поступают на 16-ти разрядный АЦП. Результаты преобразования собираются в компьютере, причем каждая запись в свой отдельный файл. Частота дискретизации – 100 КГц. Длительность записи выбирается в зависимости от частоты вращения ротора так, чтобы в записи были зафиксированы результаты измерений за 1000 оборотов ротора. Период повторения записей 24 часа. На рисунке 1 приводится характерный вид записываемых сигналов.

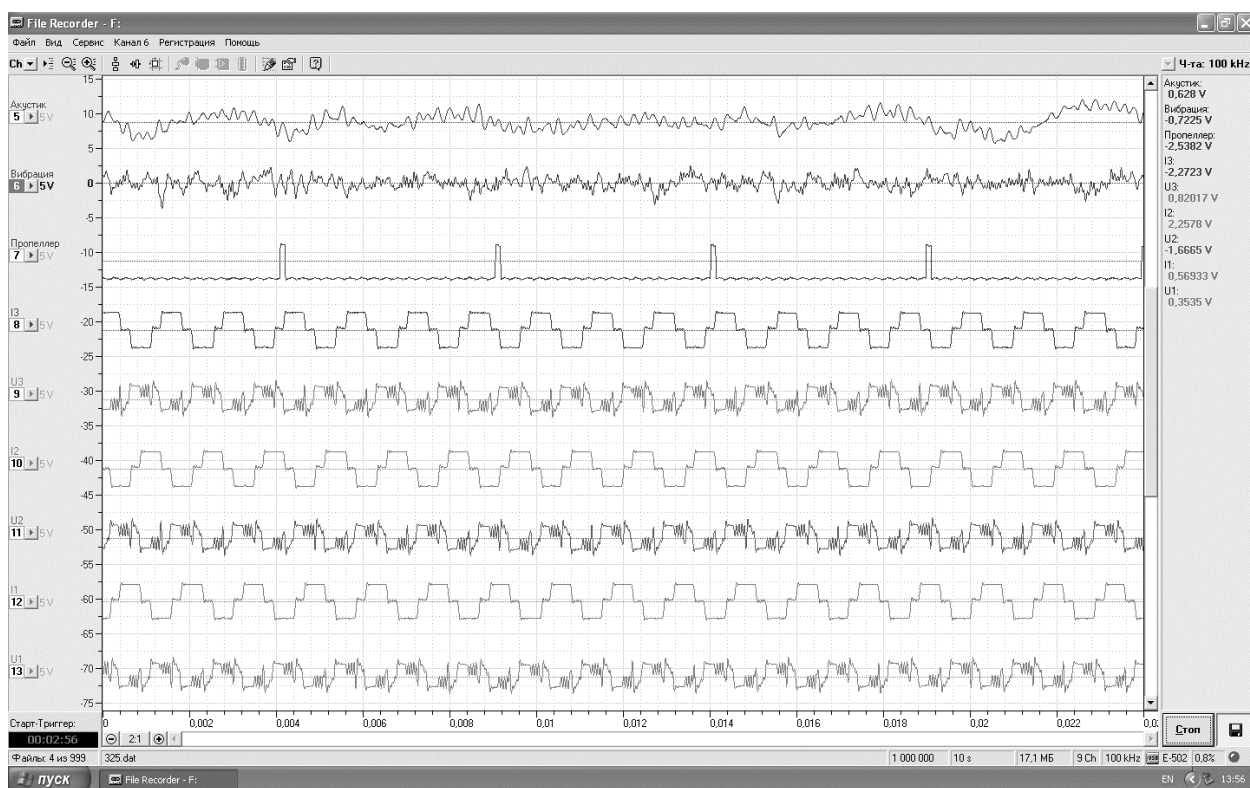


Рис. 1. Общий вид записываемых сигналов во времени. Сверху вниз показаны: звук, вибрация, фотодатчик, токи и напряжения для трёх фаз.

В настоящий момент двигатель наработал 2000 часов при гарантийной наработке 1600 часов. Первые рассмотрения спектра вибраций показали, что наибольшие амплитуды спектра принадлежат линиям соответствующим частоте питания и ее гармониками, что объясняется явлением магнитострикции в магнитопроводе статора. Причем максимальная гармоника 6-ая, а на расстоянии равном частоте вращения ротора располагаются боковые лепестки. На максимальной частоте вращения ротора (100 Гц) видны по три боковых лепестка слева и справа от 6-ой гармоники частоты питания (4200 Гц).

2 Методика обработки полученных данных

Исходные данные эксперимента были представлены в виде бинарных файлов, по одному файлу на каждую запись с учетом 9 каналов данных. Размер каждой записи в бинарном виде составляет $18 \cdot 10^6$ байт, что соответствует 2 байтам целочисленного типа и 10^6 элементов на каждом канале. Всего, за время эксперимента с учетом пропусков было собрано 390 записей и занимаемый объем составляет 6,62Гб.

Обработка исходных данных проводилась на языке программирования Python с использованием численных библиотек Numpy и Pandas для организации массива информации. Данный выбор был продиктован требованиями по скорости обработки данных и их визуализации. Также применялись среда программирования Matlab и пакет Statistica 12 для статистической обработки и разведочного анализа, однако, ограниченность в вычислительных ресурсах не позволила получить приемлемые результаты в части быстродействия обработки и визуализации. Фактически, за приемлемое время обрабатывалась одна запись, что стимулировало поиск альтернатив. Начальные данные проходили предварительную обработку – нормализацию и устранение выбросов. Нормализация считалась как разность между значением и средним по записи, деленное на стандартное отклонение. Значения, которые были выше или ниже полутора размаха квантилей 25 и 75 считались выбросами и отфильтровывались.

3 Основные полученные результаты

Самый наглядный результат, полученный при обработке данных, представлен на рисунке 2. На нём показаны графики, демонстрирующие динамику изменения средней амплитуды вибраций и звука в зависимости от номера записи. На графиках также построены сплайны 4-го порядка, отображающие среднюю тенденцию изменения. Можно видеть, что в течение 73 дней наблюдается систематическое увеличение вибрационного сигнала, а на конечном участке эксперимента – также увеличение звукового сигнала.

Амплитуды токов и напряжений, а также сигналов от фотодатчика, в основном фиксированы условиями эксперимента. Поэтому они остаются практически на одинаковом уровне.

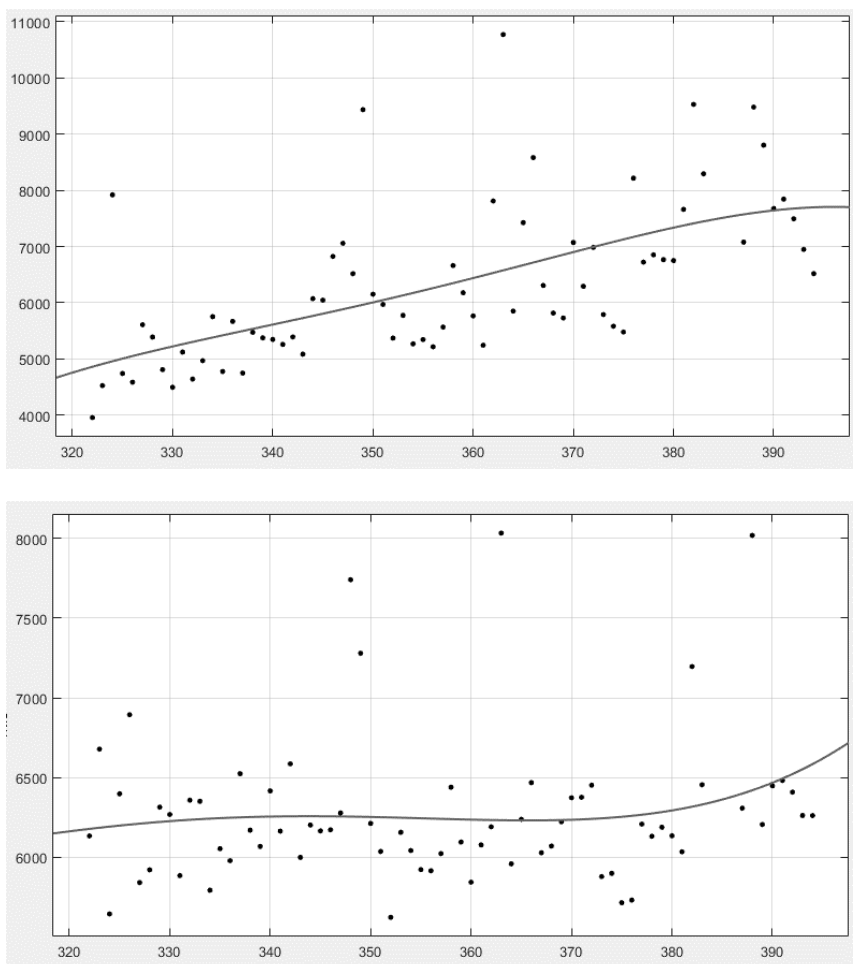


Рис. 2. Графики изменения амплитуды вибраций (сверху) и звука (снизу) в зависимости от времени эксперимента (с момента «322» по момент «394»).

Чтобы выяснить, на каких частотах в эксперименте происходило увеличение вибрационного и звукового сигнала был сделан их Фурье анализ. Для наглядности представления результатов, было отобрано два временных отрезка эксперимента, включающие по 14 записей, соответствующие

начальному этапу эксперимента (фрейм А, записи с 322 по 335) и последнему по времени этапу эксперимента (фрейм В, записи 378-394), по которому имеются данные. На рисунке 3 представлены спектры Фурье вибрационного и звукового сигнала, которые усреднены по временным отрезкам А и В.

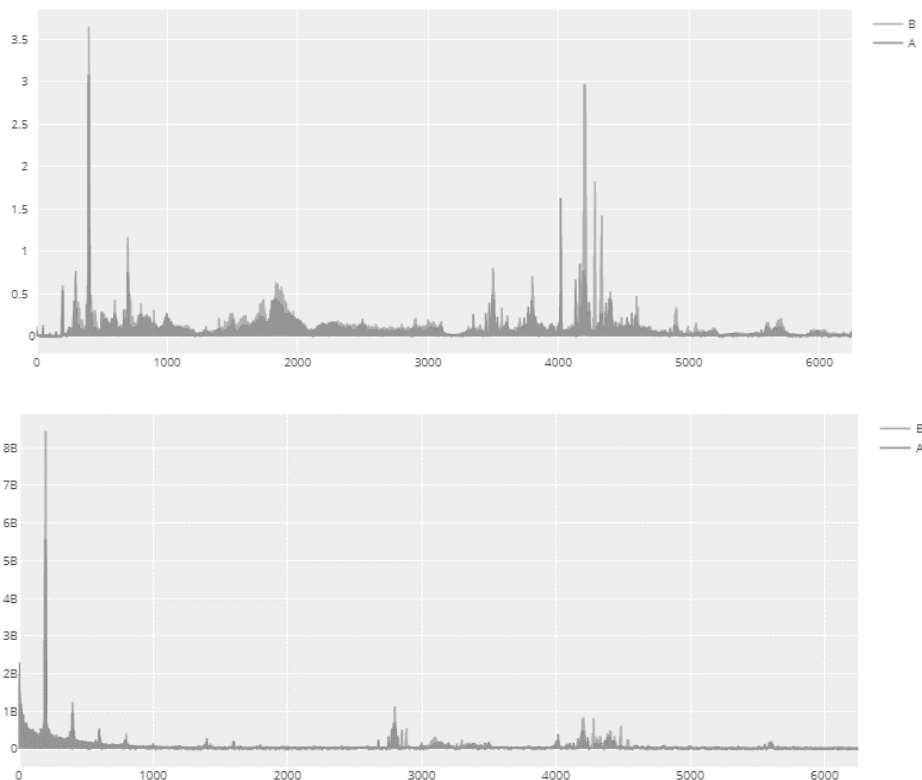


Рис. 3. Преобразования Фурье вибрационного (сверху) и звукового (снизу) сигналов, усредненных по начальному (фрейм А) и конечному (фрейм В) временным отрезкам эксперимента.

Сравнение усреднённых спектров вибрационного и звукового сигналов на рисунке 3 показывает увеличение амплитуды на отдельных частотах, и особенно, в окрестностях частоты 4200 Гц. Для используемого двигателя данная частота соответствует эффекту магнитострикции. В данном случае, под магнитострикцией мы понимаем изменение формы и других физических свойств материала (в частности, его растяжение и сжатие) под влиянием перемагничивания. В районе воздействия трёхфазного тока с частотой 700 Гц магнитное поле меняется с частотой 2100 Гц, а поскольку перемагничивание происходит 2 раза за период, то частота перемагничивания как раз и составляет 4200 Гц. Можно ожидать, что эффект магнитострикции происходит, прежде всего, в статоре двигателя. Поэтому увеличение амплитуды сигнала на этой частоте может служить информативным признаком состояния статора.

На рисунке 4 изображены те же спектры вибрационного и звукового сигналов в окрестности частоты магнитострикции 4200 Гц. Можно видеть существенное увеличение амплитуды сигналов на конечном временном отрезке эксперимента (фрейм В). Можно видеть также появление и исчезновение дополнительных пиков в окрестностях частоты 4200 Гц. Однако, являются ли эти пики систематическими или носят случайный характер отдельных всплесков, на данном этапе эксперимента определить трудно.

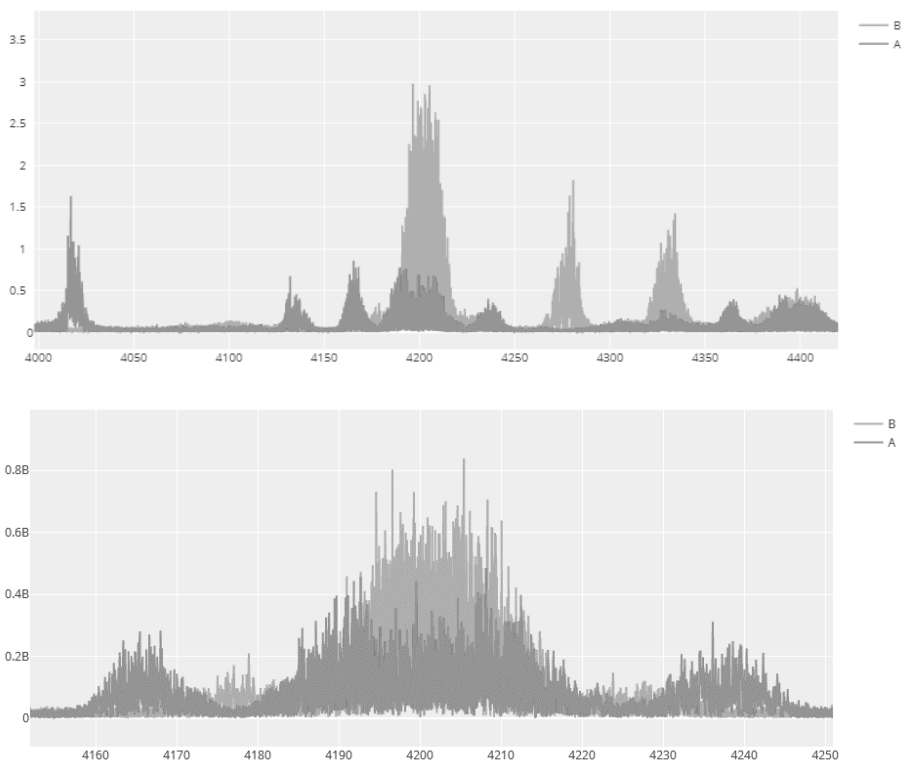


Рис. 4. Спектры вибрационного (сверху) и звукового (снизу) сигналов в окрестности частоты магнитострикции (4200 Гц), усредненные по начальному (А) и конечному (В) отрезкам эксперимента.

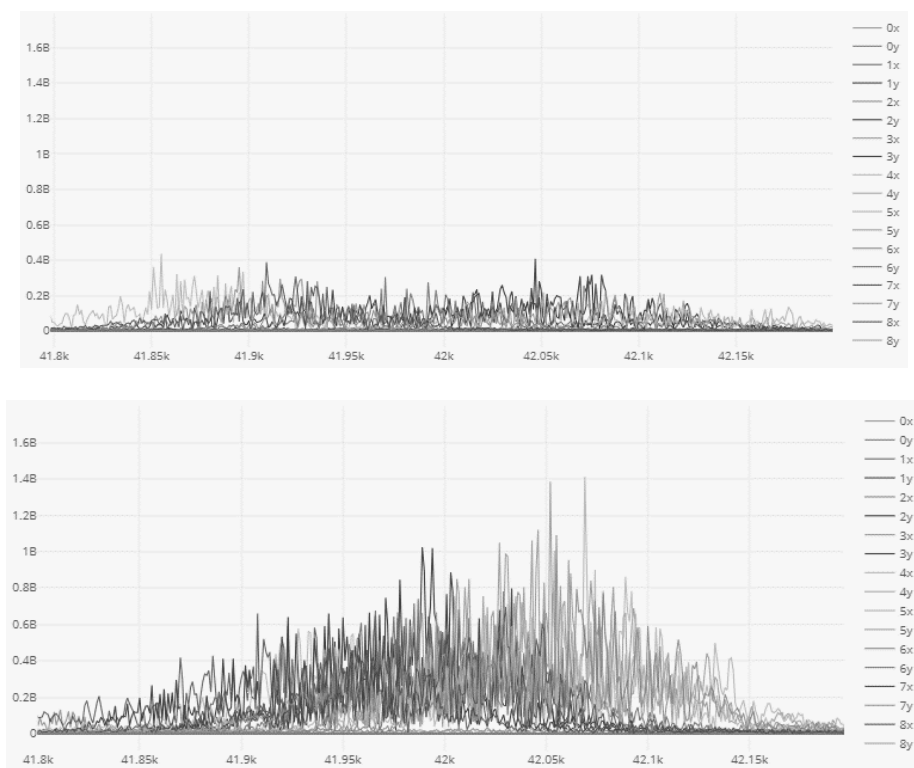


Рис. 5. Спектрограммы вибрационного сигнала построенные для нескольких последовательных моментов эксперимента в режиме А (сверху) и в режиме В (снизу), соответственно.

На рисунке 5 спектры вибрационного сигнала в окрестности частоты магнитострикции (4200 Гц), изображены без усреднения, а просто для нескольких последовательных ежедневных записей внутри

временных отрезков А и В, соответственно. Эти спектрограммы подтверждают, что наблюдаемый эффект не является результатом отдельного выброса, а носит статистический характер.

На рисунке 6 представлен типичный вид спектрограмм для тока и напряжения, которые на временных отрезках А и В практически не отличаются. В этих спектрограммах присутствуют только нечётные гармоники (первая, третья, пятая и седьмая). Это связано с выбранной формой сигнала в виде нечётной функции. Кроме того в спектре сигнала тока также отсутствует третья гармоника. Это также определяется особенностями формы выбранного сигнала.

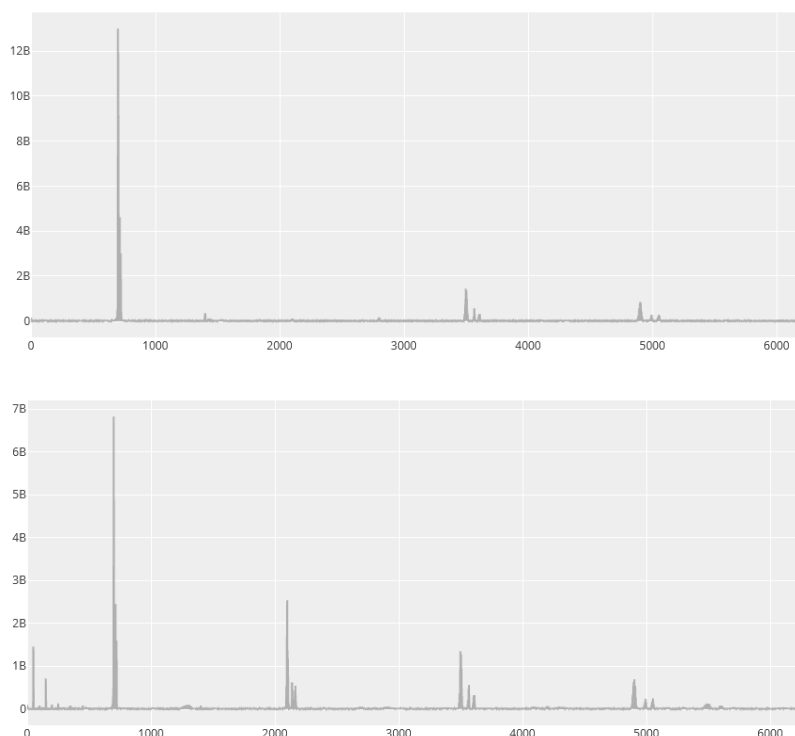


Рис. 6. Типичный вид спектрограмм для тока (сверху) и напряжения (снизу) в эксперименте.

Выводы

Перечислим основные выводы доклада и сформулируем дальнейшие рекомендации для диагностики и выявления информативных признаков процесса старения двигателя на завершающей стадии эксперимента.

В отличие от асинхронного двигателя, в котором частота питания отличается от частоты вращения ротора на величину скольжения, в исследуемом эксперименте используется синхронный электродвигатель, в котором частота питания отличается в 7 раз от частоты вращения ротора (оборотная частота двигателя). Ожидается, что такая постановка эксперимента позволит при спектральной диагностике вибросигналов легко разделить вклады от дисбаланса ротора, от деградации подшипников качения и явлений магнитострикции в статоре.

Обработка первых данных (ещё не законченного) эксперимента позволила установить, что по ходу эксперимента наблюдается систематический рост амплитуды вибрации и акустической волны. Особенно этот рост заметен на частоте магнитострикции. Можно ожидать, что увеличение амплитуды сигналов на этой частоте может служить информативным признаком состояния изношенности статора.

При проведении диагностики и мониторинга на завершающей стадии эксперимента целесообразно наблюдать дальнейший рост вибраций и звука на частоте магнитострикции. Особое внимание следует также уделить появлению и росту дополнительных пиков в окрестностях частот **кратным частоте** вращения и частоты магнитострикции, мониторингу спектра в «традиционном» диапазоне механических дефектов между 1000 Гц и 2000 Гц, а также выявлению признаков появления микровариаций при вращении вала двигателя.

Благодарности

Доклад подготовлен при поддержке гранта РФ № 19-19-00673.

Литература

1. *Колобов А.Б.* Вибродиагностика: теория и практика. Инфра-Инженерия, 2019, 252 с.
2. *Русов В.А.* Диагностика дефектов вращения оборудования по спектрам вибросигналов. Вибро-Центр, 2012, 215 с.
3. *Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б.* Диагностика технологических систем, Часть 2. Томский политехнический университет, 2014, 128 с.
4. Патент РФ 2670702. Колоколов А.С., Любинский И.А., Голованова В.В., Земсков А.А., Панов С.С. Способ диагностики механизмов, агрегатов и машин на основе оценки микровариаций вращения вала.