

1 – исходная модель; 2 – оптимизация по R_{A-B} ; 3 – оптимизация по R_{A-E} ;
 4 – оптимизация по $R_{A-Ж}$; 5 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B$;
 6 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B, L_D$; 7 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B, L_D, L_Ж$
 Рисунок 3 – Зависимость $T_{кон}$ от среднего давления в цикле для всех этапов расчета оптимизации модели

В результате оптимизации модель установки будет иметь следующие конструктивные параметры (табл.5). Расчетное значение эффективного холодильного коэффициента ϵ как отношение холодопроизводительности Q_C к подводимой к альтернатору электроэнергии $W_{эл}$ для пульсационного охладителя составило 3 % ($Q_C = 4 \text{ Вт}$, и $W_{эл} = 120 \text{ Вт}$).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gifford, W.E. and Longworth, R.C., Pulse tube refrigeration, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, paper No. 63-WA-290, August 1964.
2. Swift, G.W. Thermoacoustic engines, J. Acoust. Soc. Am., 84, 1145-1180 (1988).
3. Farouk, B., Dion, A. Experimental and numerical investigations of cryogenic pulse tube refrigerators // VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources". Minsk, Belarus, September 12–15, 2011.

УДК 620.004.5

КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Парфиевич А.Н., Драган А.В.

Брестский государственный технический университет,
 Брест, Республика Беларусь

Введение. Для определения технического состояния исследуемых объектов акустическая диагностика использует информацию, содержащуюся в акустическом сигнале и включающую не только акустическое поле объекта, но и другие колебательные процессы, сопровождающие его функционирование. При исследовании широко используется информация, содержащаяся в колебательных процессах узлов и отдельных деталей машины, распределение колебательных процессов в рабочих средах работающих узлов и т.п. Акустический подход, ос-

нованный на рассмотрении колебательных явлений в механических конструкциях как волнового процесса, является наиболее универсальным, так как он базируется на закономерностях, общих для упругих волн в любой среде.

Основная часть. Одним из наиболее распространенных методов акустической диагностики является спектральный анализ который получил широкое распространение при исследованиях процессов шумообразования и оценки качества изготовления зубчатых пар при производстве. Данный способ обладает хорошей информативностью, что выражается в наличии чрезвычайно большого количества значащих частотных составляющих на спектре. Это в свою очередь ведет к тому, что предъявляются повышенные требования к специалисту, производящего анализ полученного результата. Одним из вариантов облегчения восприятия картины спектра является уменьшение степени его разрешенности, что может привести к утрате данных и является недопустимым при диагностике состояния оборудования.

Для разбора спектра акустического сигнала и устранения недостатков спектрального анализа возможно применение кепстрального анализа, используемого для исследования акустических сигналов, содержащих в сигнале большое количество составляющих, принадлежащих различным гармоническим рядам. При таких сигналах трудно проследить за изменением спектра при изменении состояния механизма. Кепстр акустического сигнала позволяет выявлять наиболее дефектные зубчатые пары в многовальных приводах, сравнивать их между собой по степени поврежденности или уровню износа и вероятности наличия дефекта. Кепстр же позволяет получать компактную и наглядную информацию [1,2,3].

Кепстром называют квадрат преобразования Фурье логарифмического спектра мощности шума [1]:

$$K(\tau) = \left\{ \int_0^{\infty} \lg |F(\omega)|^2 \cos(\omega\tau) d\omega \right\}^2, \quad (1)$$

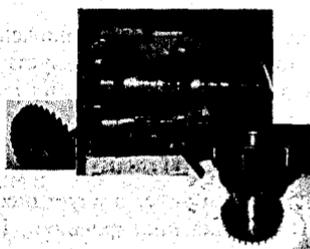
где $F(\omega)$ — спектр мощности сигнала; τ - независимая переменная, носит название квефренси (искажение от английского "фреквенси" - частота) и имеет размерность времени

Отличие кепстра от спектра заключается в том, что логарифмическое преобразование делает его менее чувствительным к неоднородностям преобразуемого сигнала (изменениям общей формы и ширины полос). Поэтому кепстр имеет отличные от нуля значения только при значительных периодических составляющих.

Для реализации сущности кепстрального анализа в качестве объекта исследования был подготовлен объект — коробка передач универсального токарного станка СН-401/501 из парка станочного оборудования БрГТУ (рис. 1) и разработана методика мониторинга технического состояния с использованием аппаратно-программного комплекса.



а)



б)

Рисунок 1 – а) Общий вид универсального токарного станка СН-401/501; б) Вид коробки передач с демонтированной крышкой с указанием расположения экспериментальных зубчатых колес 2-го вала в составе привода (слева - экспериментальная шестерня $z=43$, на которой моделировался дефект в виде скола зуба; справа - экспериментальный блок зубчатых колес $z=38$, $z=35$, $z=32$ 3-го вала привода, на котором моделировались погрешности профиля зубьев)

Для проверки методики оценки зубчатых приводов и компьютерной системы проведены эксперименты, предусматривающие моделирование различных отклонений отдельных зубчатых колес от нормального состояния и проверку акустического сигнала с применением диагностических признаков, известных из литературных источников и установленных в ходе выполнения самостоятельных исследований.

В соответствии с программой экспериментальных работ по измерению акустических характеристик зубчатых передач в составе многовальных приводов проведены замеры акустических параметров на различных режимах. Замеры производились на всех передачах. Результаты, полученные при использовании серийных колес, приняты в качестве эталонных.

На рисунках 2 [4] приведены спектр и полученный из него кепстр акустического сигнала. На кепстре четко различима рахмоника, имеющая значение квефренси 67,73мс, а также менее выраженную – со значением квефренси 71,15 мс. Их наличие свидетельствует о том, что изменении спектра мощности шума посредством преобразования Фурье на полученном кепстре присутствует ряд гармонических частот, отстоящих друг от друга на величину 14,8Гц, и ряд гармоник на расстоянии 12,9Гц друг от друга. При расчете частот вынужденных колебаний были установлены приведенные выше значения, соответствующие частотам вращения первого и второго вала привода, на которых установлены экспериментальная шестерня (с локальным дефектом зуба) и экспериментальный блок зубчатых колес (с погрешность профиля). Причем явно выраженное значение квефренси на 67,73мс на кепстре свидетельствует о том, комбинированные составляющие от погрешности зуба шестерни на втором валу вносят больший вклад в формирование окончательного акустического сигнала от исследуемого дефектного зубчатого колеса. Эта же информация может быть получена и в результате спектрального анализа в ходе анализа большого количества составляющих спектра от различных источников.

Результаты акустических исследований приводов с различного рода дефектами показали, что есть следующие закономерности, проявляющиеся в кепст-

рах анализируемых сигналов. Положения, соответствующие периодам гармонических составляющих спектра акустического шума, и величины пиков кепстра, определяющиеся размером амплитуд всех составляющих гармонического ряда, являются диагностическими признаками дефектов исследуемых зубчатых колес и также требуют проверки в ходе экспериментальных работ.

Заключение. Практически любое отклонение состояния зубчатых колес от нормы приводит к отклику в акустическом сигнале, что может быть успешно использовано при диагностировании. На основании этого применение кепстрального анализа довольно перспективно при изучении текущего состояния привода, т.к. данный метод обладает высокой степенью помехозащищенности, в силу нечувствительности к изменениям фазы исследуемых сигналов, но в свою очередь требует высокой подготовленности и большого опыта специалиста, чтобы правильно интерпретировать результаты и делать верные выводы о состоянии исследуемого объекта.

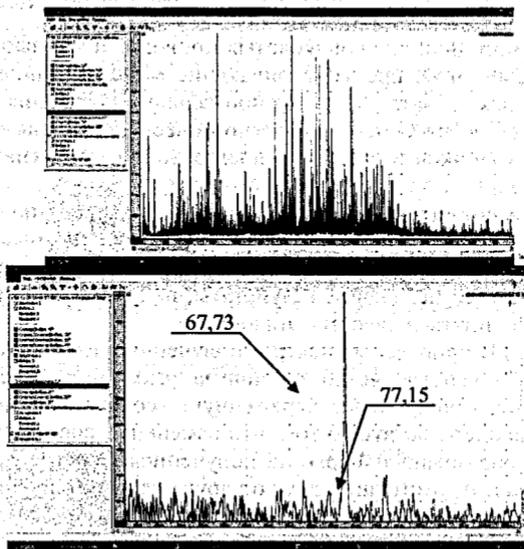


Рисунок 2 – Спектр и кепстр акустического сигнала многовального привода с дефектом зуба и погрешностью профиля зубчатых колес на разных валах (сверху вниз) [4]

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Артоболовский, И.И. Введение в акустическую динамику машин / И.И. Артоболовский, Ю.И. Бобровницкий, М.Д. Генкин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
2. Коллакот, Р.А. Диагностирование механического оборудования; перевод с английского. – Л.: Судостроение, 1980. – 296 с.
3. Попков, В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении / В.И. Попков, Э.Л. Мишинский, О.И. Попков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
4. Разработка методов и мобильных средств диагностики механических систем автотракторной техники в процессе ее эксплуатации: отчет о НИР №ГБ11/101 (заключительный) / Брестский государственный технический университет; руководитель работы А.В. Драган; № госрегистрации 20111589. – Брест, 2013. – 162с.