

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 78

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА
СИНХРОННОГО ТИПА ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОЙ
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Ю.А. Абрамов.

Горький - 1975 г.

А н н о т а ц и я

Приводятся результаты по применению специально разработанных анализаторов спектра для оценки зубцовой погрешности агрегатов, содержащих зубчатые передачи. Показана перспективность таких приборов при лабораторном и цеховом контроле.

Спектральные характеристики виброакустической активности механизмов являются наиболее информативными показателями их качества. Знание частотного состава виброакустического сигнала позволяет сделать правильный вывод о причинах повышенной вибросактивности отдельных узлов или всего механизма. Интенсивность характерных спектральных линий может служить объективным параметром оценки качества.

Если в лабораторных условиях спектральный анализ может быть проведен стандартной аппаратурой, то в полевых условиях её применение крайне затруднительно. К тому же зачастую в подробном изучении спектра нет необходимости — достаточно измерить интенсивность ряда характерных для данного механизма гармонических составляющих спектра. Такая ситуация имеет место, например, при контроле зубчатых передач, лопастных систем, турбин. Специфика таких агрегатов связана с тем, что нагрузки, возникающие при их работе и приводящие к генерации шума и вибраций, носят явно выраженный периодический характер. Этим обусловлено наличие в спектре виброакустического сигнала зубцовых и лопастных частот. В зубчатых передачах, кроме того, кинематические погрешности зубчатых колес тоже носят периодический характер, что связано с особенностями их нарезания и обработки. Этим объясняется появление в спектре зубчатых передач таких частот, как накопленные и циклические

Таким образом, в спектре виброакустического сигнала, сопровождающего работу зубчатых передач, проявляется

ся угловой спектр кинематических погрешностей. Наиболее подробно связь частотного состава с возможными погрешностями изготовления колес рассмотрена в [1]. Ограничимся лишь указанием основных составляющих спектра виброакустического сигнала зубчатой пары, образованной ведущим колесом с числом зубьев z_1 и ведомым — с числом зубьев z_2 . Частота вращения ведущего вала n об/мин, значения всех частот в Гц. Частота, обусловленная наличием накопленной погрешности ведущего колеса,

$$f_{H1} = \frac{n}{60} \quad (1)$$

Частота, обусловленная наличием накопленной погрешности ведомого колеса,

$$f_{H2} = \frac{z_1}{z_2} f_{H1} \quad (2)$$

Частота, обусловленная зубцовой погрешностью колес,

$$f_z = z_1 f_{H1} = z_2 f_{H2} \quad (3)$$

Частоты, обусловленные погрешностями зубофрезерных станков, на которых нарезаются колеса (циклические частоты),

$$\begin{aligned} f_{C1} &= z_{g1} f_{H1} \\ f_{C2} &= z_{g2} f_{H2} \end{aligned} \quad (4)$$

Чаще всего z_g — число зубьев делительного колеса станка. Учитывая импульсный характер процесса нагружения зубьев при пересопрежении, в спектре могут проявляться более высокие гармоники указанных частот. Для краткости, будем называть составляющие спектра, обусловленные наличием погрешностей и их гармоники, линиями соответствующей погрешности, например, составляющую, обусловленную второй гармоникой зубцовой погрешности — линией второй зубцовой.

Спектр агрегата, содержащего несколько ступеней, более богат: каждому колесу соответствуют свои линии

циклических и накопленных частот, каждой паре колес - свои линии зубцовых.

Важно, что значение частот всех характерных линий целочисленно частотам вращения зубчатых колес. Это открывает возможность создания простого генератора, выдающего колебания, совпадающие по частоте с частотами характерных линий в спектре виброакустического сигнала. Простейшим генератором такого типа, на котором мы и остановились в своих работах, является генератор фотоэлектрического типа, узлом, задающим частоту которого, является диск, вращающийся с частотой испытуемого зубчатого колеса. На диске нанесена система отверстий, расположенных по концентрическим окружностям. Число отверстий в ряду совпадает с множителем, определяющим связь частоты линии, подлежащей выделению, с частотой вращения колеса. Например, для получения сигналов, совпадающих по частотам трех первых гармоник зубцовой частоты, число отверстий в рядах равно соответственно z , $2z$, $3z$. С одной стороны диска расположены лампочки, с другой - фотоприемники. При вращении диска переменный световой поток, падающий на фотоприемник, создает на его нагрузке сигнал, требуемой частоты. Совпадение частот сохраняется и на переходных режимах, поскольку диск жестко связан с колесом и вращается с той же частотой.

Сравнительная простота создания такого генератора опорных частот, которым можно оснастить стенд испытания агрегатов, делает наиболее перспективным применение при анализе виброакустической активности зубчатых агрегатов анализаторов спектра синхронного типа, частота настройки которых совпадает с частотой опорного сигнала. Идея этого метода анализа дана в [2], а один из вариантов построения схемы в [3]. Технические параметры и особенности конструкций анализаторов, разработанных специально для целей технической диагностики зубчатых передач, приведены в [4].

Ниже приводятся конкретные результаты, полученные при контроле зубцовой погрешности различных агрегатов.

Контроль зубцовой погрешности пар шестерен коробов передач автомобиля "Волга" [6].

Для отработки методики контроля зубцовой погрешности пары первичный вал — блок шестерен коробки перемены передач автомобиля "Волга" использовался синхронный измеритель гармоник, разрешающая способность которого в диапазоне рабочих частот 5—3000 Гц равна 1,5 Гц. В ходе исследования были измерены общие уровни вибраций и уровни трех первых гармоник зубцовой частоты у нескольких сот пар шестерен. Одновременно с этими измерениями контролером завода по субъективному восприятию шума на слух давалась оценка качества пары: годная, с заметным, но допустимым уровнем призвука зубцовой частоты (предельная) и бракуемая пара. Необходимо отметить, что уровни третьей гармоники, как правило, были слабыми, поэтому разбраковка проводилась только по уровням двух первых гармоник. Обращает на себя внимание тот факт, что различие в уровнях зубцовых частот значительно больше, чем различие общих уровней. Разбраковка по общему уровню поэтому малоэффективна. Так для группы из 60 пар. максимальное отличие общего уровня составляло 7 дБ, в то время как уровни второй зубцовой отличались на 17 дБ. Достоверность объективной разбраковки оценивалась по методу ранговой корреляции [5], для чего были рассчитаны значения коэффициента ранговой корреляции оценок по следующим параметрам ρ_{co} — субъективная оценка и общий уровень, ρ_{c1} — субъективная оценка и уровень первой зубцовой, ρ_{c2} — субъективная оценка и уровень второй зубцовой. Для каждой партии пар рассчитывалось также так называемая значимая величина ρ_{3H} (с уровнем значимости 0,05). Данные для четырех партий пар шестерен приведены в табл. 1. Напомним, что если значение ρ превышает ρ_{3H} , то это означает, что с вероятностью 0,95 сравниваемые оценки коррелированы.

Видно, что зачастую оценки по общему уровню и уровням первой зубцовой слабо коррелируют с оценкой контролера, в то время как оценка по второй гармонике всегда достаточно уверенная. По результатам исследования были установлены предельные значения уровней I и II гармоник, определяющих границ объективной разбраковки.

Таблица № 1.

Число пар в партии	$\rho_{с0}$	$\rho_{с1}$	$\rho_{с2}$	$\rho_{зн.}$
21	0,25	0,1	0,7	0,44
51	0,39	0,22	0,8	0,27
57	0,36	0,14	0,49	0,26
12	0,37	0,26	0,8	0,6

В дальнейшем эта методика была апробирована на большей партии пар шестерен, выборочно взятых с конвейера сборки и содержащей примерно одинаковое число признаваемых оператором годным (101), забракованных (83) и предельных (82) пар. Независимо от этой оценки партия была разбракована по уровням зубцовых частот, при этом число совпадающих оценок было 152 (82 в группе годных и 73 в группе брака). Пропущено из числа бракованных в годные всего 7 пар, забраковано из числа годных по субъективной оценке 27 пар. При выборе границ разбраковки нами учитывалось, что пропуск бракованной пары экономически более опасен, чем отнесение годной пары в брак. Время контроля 15–20 секунд. Результаты апробации методики и аппаратуры можно признать хорошими, аналогичные результаты были получены и при оценке зубцовой погрешности пар шестерен автомобиля ГАЗ–24.

Контроль задних мостов в сборе [7].

Методы виброакустического контроля наиболее эффективны при контроле агрегатов в сборе на стадии заключительной приемки. Синхронный измеритель гармоник был применен для контроля зубцовой погрешности силовой пары заднего моста, являющейся основным источником шума, особенно резко проявляющегося на режимах, при которых частоты зубцовой погрешности совпадают с собственными частотами картера моста. Для иллюстрации возможных различий в уровнях зубцовых частот на фиг. 1 приведены записи напряжения на выходе синхронного из-

мерителя гармоник при контроле двух мостов: экспортного (нижний ряд) и бракованного (верхний ряд). На записях указаны значения скорости, измеренные по спидометру стенда (км/час), номер гармоники и направление вращения вала (передний или задний ход). Мост разогнался достаточно медленно, чтобы успевали установиться вынужденные колебания. Из спектрограмм видно, что для бракованного моста на скоростях 60–80 км/час резко возрастают уровни зубцовых частот, в то время как для экспортного моста такого роста не наблюдается. Различие в уровнях достигает 20 и более дБ, общие уровни вибраций отличаются не столь значительно. Методика разбраковки мостов по уровням зубцовых частот проверена на большом числе мостов. Для группы из 50 мостов ГАЗ–21 в диапазоне скоростей 30–60 км/час получено совпадение в 70% случаев. Из партии в 100 мостов ГАЗ–24, отобранных по объективному методу, ни один не был возвращен после заводских испытаний автомобилей. В настоящее время контроль с помощью синхронного измерителя гармоник внесен в технологический процесс контроля мостов на Горьковском автозаводе.

Контроль зубцовой погрешности редукторов РЦД–400 [8].

Для контроля двухступенчатых редукторов РЦД–400 был специально разработан прибор–анализатор виброактивности редукторов, позволяющий в диапазоне 6–22000 Гц производить измерение уровней линий зубцовой и циклической погрешности с разрешающей способностью 0,4 Гц. Кроме того в приборе предусмотрена возможность анализа низкочастотного сигнала, модулирующего зубцовые и циклические составляющие спектра вибраций, что дает возможность оценить накопление погрешности зубчатых колес.

Данные виброакустического контроля зубцовой погрешности сравнивались с оценкой по пятну контакта, по которой все редукторы делились на четыре группы: I – контакт не более 30% длины зуба, II – контакт 30 – 60%, III – 60–80%, IV – более 80% длины зуба. В таблице 2 приведены средние значения общего уровня вибрации (L)

и уровней двух первых гармоник зубцовой частоты (L_{31} , L_{32}) для большой партии редукторов с передаточным отношением 10 и 40. Данные таблицы еще раз показывают, что различие в уровнях зубцовых частот значительней различия общего уровня. Действительность вибрационного контроля и корреляция его с данными контроля по пятну контакта оценивались по методу ранговой корреляции.

Таблица 2.

Передаточное отношение и ступень	10, Быстроход.			10, тихоходная			40, быстроход.		
	L	L_{31}	L_{32}	L	L_{31}	L_{32}	L	L_{31}	L_{32}
Группа по пятну контакта \ Уровень дБ									
I	90,5	77	78,5	84,5	91	69	80,5	75	68,5
II	80,3	73,5	77,5	88,5	81,5	60	77,5	70	62,5
III	89	73,5	77,5	88	78,5	66	77	68	63
IV	90,5	69	73	88,5	75	60	78	64	63
Среднее по всем группам	90	73	76	90	84	65	79	72,5	66

В табл. 3 приведены значения коэффициентов ранговой корреляции при сравнении оценок по следующим параметрам:

R_{0k} - общий уровень и пятно контакта, R_{3k} - уровень первой зубцовой и пятна контакта.

Таблица 3

Передаточное отношение, ступень	10, быстроходная	10, тихоходная	40, быстроходная
R_{0k}	0,25	0,32	0,38
R_{3k}	0,54	0,64	0,66
R_{32k}	0,36	0,36	0,44

Во всех случаях корреляция уровней зубцовой с пятном

контакта несомненна, в то время как корреляция общего уровня с пятном контакта менее четкая.

По результатам проведенного исследования Горьковский филиал ВНИИНМаш разрабатывает в настоящее время аппаратуру цехового контроля редукторов, а также методику диагностирования зубчатых механизмов по их виброакустическим свойствам методами характеристических гармоник.

Автор считает приятным долгом выразить искреннюю благодарность А.А.Грачеву и В.А.Звереву за интерес к работе, а также Г.П.Болотову и Г.Д.Швецовой за творческое участие в проведении заводских испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лифшиц Г.А. Труды ЦНИИТМаш, 21 (1981).
2. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Физматгиз. М., 1982.
3. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Зверев В.А. "Радиотехника", 25, 12, 87 (1970).
4. Абрамов Ю.А. Анализаторы спектра синхронного типа. Препринт НИРФИ, Горький, 1975. № 79.
5. Дьякова Д.Г. Круг Г.К. Труды МЭИ, вып.87, 7 (1966).
6. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Козлов М.С. Аппаратура для измерения отдельных гармонических составляющих в спектре вибраций зубчатых агрегатов. Труды 1У Всесоюз. конф. по виброметрии. (Датчики и виброизмерительная аппаратура). Киев. 1969.
7. Отчет НИРФИ "Изготовление прибора для измерения интенсивностей линий в спектре шумов зубчатых агрегатов с целью контроля их качества", Горький, 1968. (Гос. регистр. № 6934197).
8. Отчет НИРФИ "Создание рабочего макета для целей объективного цехового контроля редукторов РЦЦ-400 по уровню вибраций и разработка методики контроля", Горький, 1972.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Зависимости интенсивностей гармоник зубцовой частоты от скорости /верхний ряд-бракуемый мост, нижний-экспортный/.

