

УДК 621.833:534.1.001

А.А.Авраменко, Н.А.Камынин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Динамические процессы, происходящие в зубчатых передачах при пересопряжении зубьев, создают интенсивные шум и вибрацию. Изменения в состоянии отдельных элементов зубчатого механизма приводят к изменениям в их динамике и, следовательно, в шуме и вибрации редуктора. В вибрационной диагностике эти изменения используются в качестве признаков для оценки состояния механизма. Выбор наиболее чувствительных к тому или иному виду дефекта признаков обеспечивает высокую вероятность обнаружения дефекта.

Контактные разрушения — одна из наиболее распространенных причин выхода из строя быстроходных поверхностей упроченных колес хорошо смазываемых закрытых передач. Так для зубчатых колес авиационных двигателей 70% дефектов из общего количества связано с контактными разрушениями материала на зубьях [1].

Известно [2], что возникновение подобных дефектов приводит к появлению дополнительных импульсов сил, действующих в зацеплении, и появлению периодического диагностического сигнала (в частном случае импульсного), период которого равен периоду вращения дефектной шестерни. Возможными признаками состояния зубчатого механизма для такого диагностического сигнала являются [3]:

- 1) появление периодических изменений формы и амплитуды временной реализации вибрации корпуса;
- 2) изменение уровня составляющих в спектре вибрации на частоте пересопряжения зубьев и кратных ей частотах (на первой и высших зубцовых гармониках);

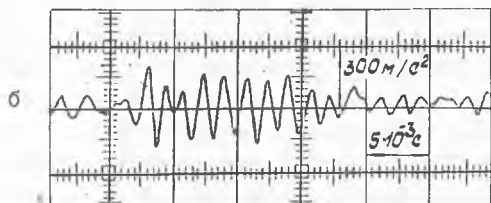
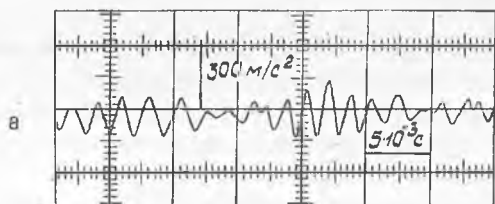
3) появление или изменение уровня составляющих в спектре вибрации с частотами, кратными частоте вращения дефектной шестерни, за исключением зубцовых гармоник;

4) появление или изменение уровня составляющих в спектре (спектре логарифма спектра мощности вибрационного сигнала), соответствующих периоду вращения дефектной шестерни.

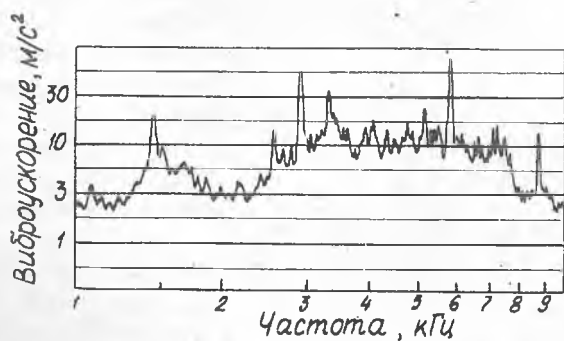
Наличие различных резонансных элементов конструкции, вибрационных сигналов от других источников и от поврежденного зубчатого зацепления в исправном состоянии существенно ограничивает возможности теоретической оценки чувствительности различных признаков в реальных условиях.

Для выделения наиболее информативных признаков выкрашивания рабочих поверхностей зубьев проведено экспериментальное исследование вибрации корпуса редуктора при имитации выкрашивания. Для этого на рабочей поверхности одного из зубьев ведущей шестерни ($m = 2,5$ мм; $Z = 21$.) в районе поляса зацепления наносилась по всей длине зуба поперечная канавка шириной 2 мм с различной глубиной. Экспериментальный редукторный стенд позволяет проводить исследование вибрации при скоростях вращения ведущего вала от 50 до 120 с⁻¹ и удельной нагрузке на зуб $(0,2-0,5) \cdot 10^5$ Н/м. Примененный комплекс аппаратуры для регистрации и анализа вибрации предусматривает выделение всех четырех возможных признаков выкрашивания. Для этого на корпусе редуктора устанавливается пьезоакселерометр типа КД12, сигналы с которого после усиления подаются на электронный осциллограф, спектроанализатор с полосой пропускания 30 Гц и записываются на магнитофон для последующего анализа на специализированном вычислительном комплексе. На комплексе проводится спектральный анализ с полосой 10 Гц в диапазоне частот до 10 кГц и централь- ный анализ.

Сравнение осциллограмм вибрации при различных скоростях вращения и нагрузках показало, что временная реализация вибрационного сигнала исправного редуктора имеет довольно сложную форму, существенно изменяющуюся с изменением скорости вращения и нагрузки. При появлении дефекта при скоростях вращения до 70 с⁻¹ и нагрузке, близкой к максимальной, во временной реализации появляются периодические импульсы с частотой заполнения 6 кГц, соответствующей резонансной частоте дефектной ступени редуктора (рис.1). Амплитуда этих импульсов в 2-3 раза превышает амплитуду колебаний в исправном состоянии, период следования равен времени одного оборота дефектной шестерни.



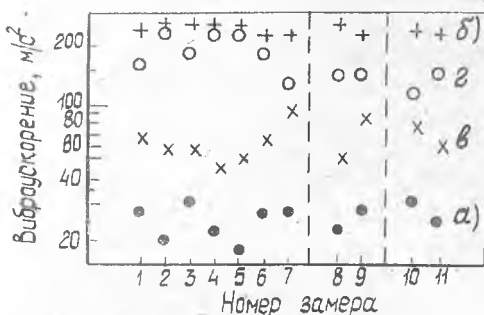
Р и с. 1. Осциллограммы вибрации корпуса:
 а - исправное состояние; б - с дефектом



Р и с. 2. Спектр вибрации корпуса в исправном состоянии

При больших скоростях вращения и меньших нагрузках изменений в форме временной реализации сигнала не наблюдается. Таким образом, изменение временной реализации вибрационного сигнала может служить диагностическим признаком выкрашивания только в очень ограниченном диапазоне нагрузок и скоростей вращения.

На спектрограммах вибрации в исправном состоянии существенно выделяются из широкополосного шума зубцовые гармоники первой ($f_{31}^a = K 21 f_B$) и, несколько слабее, второй ($f_{32}^m = m 36,75 f_B$) ступеней редуктора (рис. 2). Изменение полосы фильтра с 30 до 10 Гц дает только незначительное улучшение отношения сигнал/шум для зубцовых гармоник, не выявляя новых составляющих, поэтому исследование спектральных признаков проведено для полосы пропускания фильтра, равной 30 Гц. При нанесении дефекта уровни зубцовых гармоник неисправной ступени не изменяются (рис. 3). В то же время

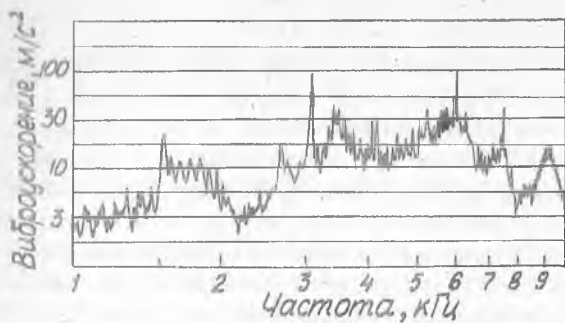


Р и с. 3. Изменение уровней зубцовых гармоник (замеры 1-7 - без дефекта) 8-9-0,1 мм 10-11 - 0,2 мм): а-1-я гармоника; б - 2-я гармоника; в - 3-я гармоника; г - 4-я гармоника

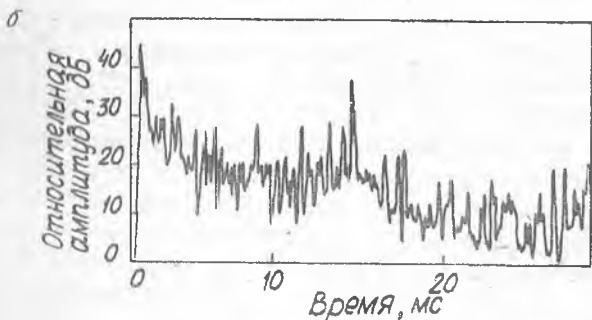
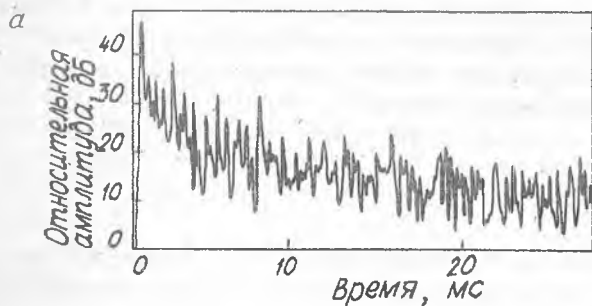
в спектре вибрации корпуса появляется (или возрастает) ряд новых составляющих с частотами, кратными частоте вращения поврежденного колеса (рис. 4). Это хорошо заметно при всех скоростях вращения и нагрузках около первой зубцовой гармоники

($f_{31}^a = 21 f_B$) и особенно вокруг шестой ($f_{31}^b = 126 f_B$), где на спектрограммах вибрации

проявляются все гармоники, начиная со 116 f_B и кончая 136-138 f_B . Наибольшее изменение в уровне наблюдается для составляющей 132 f_B и составляет 3-5 дБ при глубине дефекта 0,1 мм и 9-12 дБ при глубине 0,2 мм. Следовательно, в качестве спектральных признаков появления выкрашивания могут использоваться изменение состава спектра (появление целого ряда составляющих с частотами, кратными частоте вращения дефектной шестерни) или изменение уровня одной из таких составляющих, в то время как уровни зубцовых гармоник нечувствительны к такому виду повреждения поверхностей зубьев.



Р и с. 4. Спектр вибрации корпуса при глубине дефекта 0,2 мм



Р и с. 5. Кепстрограммы вибрации: а - исправное состояние; б - с дефектом

На кепстрограмме вибраций при дефекте диагностический признак хорошо выделяется для всех скоростей вращения и нагрузок, в то время как при исправной передаче он практически отсутствует (рис. 5).

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что при локальном дефекте шестерни возникает периодический диагностический сигнал. Обнаружение данного вида дефекта можно проводить, выявляя последовательность спектральных компонент и оценивая степень изменения их интенсивности. Однако выявление таких компонент путем визуального анализа спектра порой является весьма трудоемким и в реальных условиях часто затруднено наличием различных помех.

Применение кепстрального анализа позволяет сформировать признак, характеризующий в среднем интенсивность диагностических спектральных компонент, т.е. энергию диагностического сигнала. Положение признака однозначно определяется на кепстрограмме периодом вращения шестерни. Все это обеспечивает высокую чувствительность данного признака к локальным дефектам.

Л и т е р а т у р а

1. К о р а б л е в А.И., Р е ш е т о в Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач.—М.: Машиностроение, 1968.

2. Б а л и ц к и й Ф.Я., Г е н к и н М.Д., К о б р и н с к и й А.А. и др. О математическом моделировании колебаний прямозубых колес в связи с задачей их акустической диагностики. — В кн.: Акустическая динамика машин и конструкций.—М.: Наука, 1973.

3. А р т о б о л е в с к и й И.И., Б о б р о в н и ц к и й Ю.И., Г е н к и н М.Д. Введение в акустическую динамику машин.—М.: Наука, 1979.