

УДК 629.562 : 621.83.061.1

Ю.А. Корнейчук

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ДИАГНОСТИКА ГЛАВНОГО СУДОВОГО РЕДУКТОРА

Анализируется диагностика судовых редукторов. Она касается диагностических способов обнаружения неисправности редуктора. Измерений вибрации редуктора не хватает для получения полной диагностической информации. Следует использовать другие способы диагностики редуктора.

Ключевые слова: редуктор, надежность, диагностика, вибрация.

Y.A. Korneychuk

MAIN MARINE GEARBOX DIAGNOSTICS

The paper is devoted to marine gearbox diagnostics. It deals with the methods of gearbox diagnostics fault detection. Measuring of gearbox vibration is not enough to receive full diagnostic information. Different methods of gearbox diagnostics should be used.

Key words: gearbox, reliability, diagnostics, vibration.

Большинство судов промыслового флота оснащено дизель-редукторными агрегатами (рис. 1). Главный редуктор, по данным фирм-изготовителей, обладает повышенной надежностью, оцениваемой безотказной работой $P(t) = 0,9999$. Однако опыт их эксплуатации не совпадает с этими утверждениями. Так, из трех плавбаз типа «Содружество» на одном из редукторов наблюдалась трещина ведущего вала. Отсюда оценка $P(t) = 0,66$. Малое число наблюдений не позволяет получить точные оценки надежности.

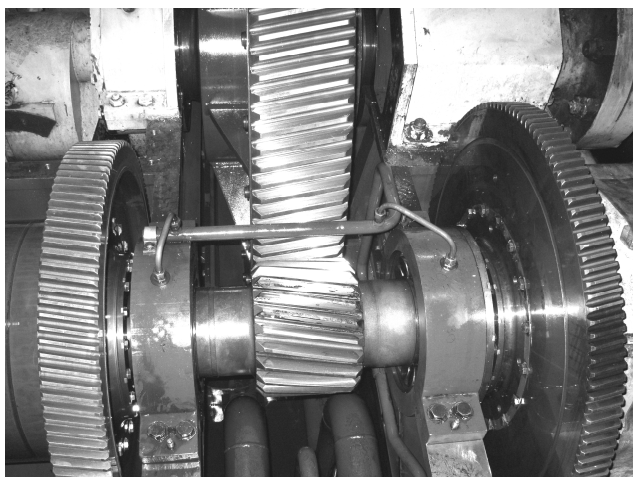


Рис. 1. Редуктор Valmet V2NC-1300+2PC
Fig.1. Gearbox Valmet V2NC-1300+2PC

Обследование 32 редукторов ТКГ2-03 СТМ типа «Атлантик-333» [1] показало, что за период эксплуатации 69 % редукторов находятся в нормальном состоянии, 22 % имеют потенциальные отказы подшипников качения, 6 % – эксплуатационный отказ из-за нарушения системы смазки, 3 % – технологический отказ (монтаж и сборка). Вероятность безотказной работы составила $P(t) = 0,90$.

ГОСТ Р 50891-96 [2] рекомендует для редукторов проводить диагностирование:

- зубчатых колес по вибрационным параметрам;
- подшипников редукторов по уровню ударной вибрации.

На этапе настройки формируются векторы диагностических признаков, характеризующие нормальное (бездефектное) состояние сопряженных зубчатых колес для каждой i -й ($i = 1, 2, \dots$) ступени диагностируемого редуктора. Компонентами векторов являются числовые значения следующих четырех параметров вибрации i -го зубчатого зацепления:

- 1) общий уровень вибрации с частотой пересопряжения зубьев;
- 2) суммарный уровень гармонических составляющих частоты вращения ведущего зубчатого колеса;
- 3) то же ведомого зубчатого колеса;
- 4) уровень составляющей на частоте зацепления зубьев в спектре сигнала огибающей амплитуды высокочастотной вибрации редуктора.

При формировании диагностических признаков применяется метод синхронного накопления сигналов вибрации как на периоде зубцовой частоты диагностируемой ступени (параметры 1 и 4), так и на периодах частот вращения сопряженных зубчатых колес (параметры 2 и 3). В качестве синхронизирующего используется пилот-сигнал с датчика оборотов выходного вала, требуемое значение частоты следования импульсов которого предварительно формируется в блоке преобразования частоты пилот-сигнала. Этот метод легко реализуется для переборных редукторов, значительно сложнее – для планетарных.

Этап диагностики состоит в периодическом съеме вибрационной информации, определении значений диагностических параметров, сравнений текущих значений с пороговыми и принятии решений при их превышении.

Прогрессирующий износ зубьев сопряженных зубчатых колес диагностируемой ступени редуктора приводит к значительному возрастанию величины диагностического параметра

Появление усталостных повреждений на отдельных зубьях (выкрашивание, скол, трещина у основания, поломка) обуславливает рост значений параметров 2 и 3, распространение усталостных повреждений по зубчатым венцам сопряженных зубчатых колес (например, выкрашивания) приводит к возрастанию величины параметра 4.

Методика позволяет не только проводить дифференцированную диагностику повреждений зубчатых колес, но и на основе анализа изменения трендовых характеристик диагностических признаков осуществлять прогнозирование остаточного ресурса зубчатых зацеплений по предельным состояниям эксплуатационных повреждений зубьев зубчатых колес.

Для оценки ударной вибрации, возникающей при первых признаках выкрашивания, следует применять приборы, которые, в основном, чувствительны к высокочастотным ударным импульсам в области частот, превышающих 20 кГц.

Возникновение нарастания показаний прибора показывает либо на нарушение подачи смазки, появление в ней посторонних частиц, либо на появление первых признаков выкрашивания. Освоение особенностей работы прибора позволяет разделять указанные явления.

При появлении отмеченного нарастания следует резко сократить интервалы между проверками. В случае подтверждения нарастания ударной вибрации необходимо произвести останов редуктора и смену подшипника.

Значительное число отказов главных редукторов наблюдалось на промысловых судах Балтийского бассейна. Для решения этой проблемы проведены исследования [3] главных редукторов: LS-2200 судов проекта 1332 типа «Баренцево море», MAV-90-30 судов проекта В-408 типа «И Бочков», TKG2-0350 судов типа «Атлантик-333», 10 AD-2х1400х3,27 типа «Атлантик-488», «Киев», судов проекта 503 типа «Альпинист», LS2-3500 судов проекта 1386 типа «Горизонт». Они показали, что наибольший эффект в контроле состояния главных редукторов рыбопромысловых судов достигается от совместного применения методов и средств трибо- и вибродиагностики.

Вибрация нормально функционирующих редукторов, входящих в состав главной энергетической установки (ГЭУ) промышленных судов, не может быть причиной их усталостного разрушения. Большинство случаев аварийного разрушения деталей и узлов редукторов могут быть вызваны либо нарушениями условий их эксплуатации, либо дефектами монтажа.

В целях повышения достоверности диагноза дополнительно предусмотрен анализ продуктов износа в масле главных редукторов и двигателей. Рентгеновский флуоресцентный анализ обеспечивает контроль содержания в масле примесей железа, хрома, меди, олова и свинца.

Разработана технология диагностирования главных редукторов рыбопромысловых судов [3], которая описывает режим и объем контроля, требования к применяемой аппаратуре, критерии оценки технического состояния редуктора, периодичность и сроки проведения контрольных замеров, постановку редуктора на хранение и профилактические работы. Принятая методика включает в себя контроль третьоктавных спектров виброускорения на опорах валов редуктора, сравнение их с выработанной статистической нормой и контроль спектра огибающей высокочастотной компоненты вибрации на подшипниках качения. В целях повышения достоверности диагноза дополнительно предусмотрен анализ продуктов износа в масле главных редукторов. Это позволяет обнаруживать дефекты на ранней стадии развития, наблюдать и прогнозировать их развитие, планировать ремонт машины, т.е. перейти на обслуживание и ремонт машин по фактическому состоянию.

Интересен зарубежный опыт диагностической службы фирмы Stork. Она использует для измерения вибрации корпуса редуктора портативный анализатор спектра CSI, а для оценок характеристик смещения геометрической оси применяет многоканальный виброанализатор в режиме реального времени Nevada Bently.

Кроме исследований вибрации, фирма Stork дополнительно измеряет:

- вращающий момент;
- термографическое инфракрасное излучение с измерением температур металлов и неметаллов в диапазоне 0-2500 °С, используя инфракрасный термометр ThermoView™ Raytek Ti30;
- высокоточные геометрические измерения инструментом FARO Arm platinum из категории мобильных координатно-измерительных машин (КИМ). Полученные данные могут использоваться, чтобы определить полную геометрию деталей редуктора. Данные передаются в программу 3D CAD и анализируются. Трехмерное измерение может также использоваться для центрирования редукторов и турбин. Используя новейшее лазерное оборудование, могут быть выполнены точные измерения с погрешностью 0,01 мм, такие, как: центрирование валов, плоскостность, прямолинейность, перпендикулярность, центрирование втулок, параллельность.

Обязательными являются тщательные осмотры редукторов с использованием промышленного эндоскопа и съемкой повреждений цифровым фотоаппаратом.

Рассмотрим пример диагностирования дизель-редукторных агрегатов (ДРА). Два ДРА с дизелями «Згода-Зульцер 6ZL 40/48» мощностью по 2355 кВт работают через 2 редуктора «Замех Лиааен» с передаточным числом 3,1786 на две линии валов при номинальной частоте вращения винтов регулируемого шага 185 мин⁻¹. Дизели установлены на специальной амортизированной платформе. Для передачи вращающего момента от двигателя, имеющего возможность перемещаться к жестко закрепленному редуктору, на маховике закреплена эластичная муфта Холсет.

При несении вахты второй механик обнаружил необычный шум и вибрацию в кормовой части редуктора правого главного двигателя, работавшего в режиме полного переднего хода. Остановили правый дизель. Осмотром зубчатого зацепления редуктора через лючок обнаружили:

- выкрашивание 7 зубьев в виде глубокого питтинга и трещины на 6 зубьях в кормовой части на днище от 30 до 90 мм с торца зуба ведущего вала-шестерни;
- ролики опорного подшипника вала-шестерни со стороны двигателя не вращаются, а скользят по внутренней обойме;
- ведомая шестерня редуктора дефектов не имела;
- масло в редукторе более темного цвета, на магнитных подушках едва видимая металлическая пыль, не ощущаемая пальцами. Фильтры чистые. Индикатор загрязненности большого перепада не показывает.

Свинцовыми выжимками проверили зазоры в зацеплении. Они оказались в пределах норм. Заводские специалисты произвели механическую обработку зубьев. Качество шлифовки и проверка дефектных участков на наличие трещин проверялось «Суперчеком».

Основной этап диагностирования ДРА проводится на ходовых испытаниях. Следует тщательно контролировать шум и вибрацию, температуру подшипниковых узлов проверенными точными приборами, подачу смазки в соплах (трубках) к точкам смазки и зацеплению. На ходовых испытаниях для измерения уровня вибрации использовали японский вибронализатор МК-310, а для измерения ударных импульсов на подшипниках редукторов – шведский прибор SPM-43A.

Предварительно была разработана карта замеров уровней ударных импульсов и вибрации (рис. 2).

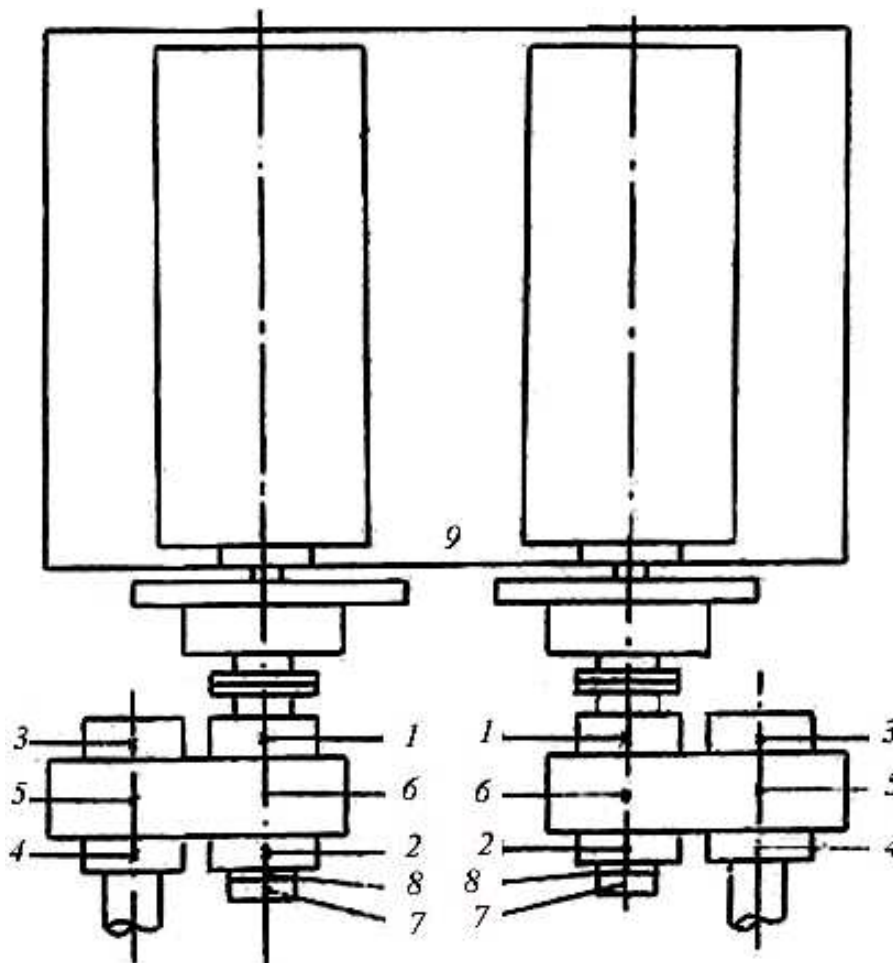


Рис. 2. Точки измерений ударных импульсов и вибрации
 Fig. 2. Points of measurements of shock impulses and vibration

Таблица 1

Вертикальная вибрация редуктора в точке 1 при частоте вращения дизеля $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

Table 1

Vertical vibration of a gearbox point 1, diesel engine speed $n = 400 \text{ RPM}$

[DATA No. 1V]			[DATE ' : 9-11-09 10:03]
[MODE VEL] [RANGE 5.0 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 1.560 cm/s
1	195 Hz	0.782 cm/s	
2	110	0.490	
3	125	0.185	
4	220	0.120	
5	240	0.107	
6	160	0.105	
7	230	0.097	
8	890	0.097	
9	140	0.090	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 2

Горизонтальная вибрация редуктора в точке 1 при частоте вращения дизеля $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

Table 2

Horizontal vibration of a gearbox at point 1, diesel engine speed $n = 400 \text{ RPM}$

[DATA No. 1H]			[DATE ' : 9-11-09 10:08]
[MODE VEL] [RANGE 1.5 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 1.2457 cm/s
1	195Hz	0.7320 cm/s	
2	475	0.1717	
3	175	0.1687	
4	110	0.12971132	
5	415	0.1132	
6	770	0.1125	
7	75	0.1117	
8	125	0.1072	
9	235	0.1005	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 3

Вертикальная вибрация редуктора в точке 2 при частоте вращения дизеля $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

Table 3

Vertical vibration of a gearbox point 2, diesel engine speed $n = 400 \text{ RPM}$

[DATA No. 2V]			[DATE ' : 9-11-09 10:08]
[MODE VEL] [RANGE 5.0 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 1.717 cm/s
1	2	3	4
1	195Hz	0.995 cm/s	
2	110	0.665	
3	125	0.287	

Окончание табл. 3

1	2	3	4
4	165	0.175	
5	15	0.165	
6	93	0.137	
7	233	0.135	
8	325	0.105	
9	422	0.105	
10	890	0.105	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 4

Горизонтальная вибрация редуктора в точке 2 при частоте вращения дизеля $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

Table 4

Horizontal vibration of a gearbox at point 2, diesel engine speed $n = 400 \text{ RPM}$

[DATA No. 2H]			[DATE ' : 9-11-09 10:04]
[MODE VEL] [RANGE 5.0 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 1.042 cm/s
1	195Hz	0.495 cm/s	
2	130	0.342	
3	175	0.225	
4	140	0.160	
5	385	0.132	
6	75	0.117	
7	770	0.117	
8	965	0.115	
9	210	0.110	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 5

Вертикальная вибрация редуктора в точке 1 при частоте вращения дизеля $n = 315 \text{ мин}^{-1}$

Table 5

Vertical vibration of a gearbox point 1, diesel engine speed $n = 315 \text{ RPM}$

[DATA No. 1V]			[DATE ' : 9-11-09 14:38]
[MODE VEL] [RANGE 1.5 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 0.5092cm/s
1	100 Hz	0.2085 cm/s	
2	145	0.1740	
3	90	0.782	
4	155	0.480	
5	170	0.0720	
6	125	0.0675	
7	115	0.0622	
8	220	0.0547	
9	210	0.0487	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 6

Горизонтальная вибрация редуктора в точке 1 при частоте вращения дизеля $n = 315 \text{ мин}^{-1}$

Table 6

Horizontal vibration of a gearbox at point 1, diesel engine speed $n = 315 \text{ RPM}$

[DATA No. 1H]			[DATE : 9-11-09 14:40]
[MODE VEL] [RANGE 1.5 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 0.4890 cm/s
1	135Hz	0.2040 cm/s	
2	145	0.2002	
3	295	0.1740	
4	95	0.1387	
5	85	0.1230	
6	115	0.0877	
7	445	0.0637	
8	25	0.0547	
10	50	0.0487	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 7

Вертикальная вибрация редуктора в точке 2 при частоте вращения дизеля $n = 315 \text{ мин}^{-1}$

Table 7

Vertical vibration of a gearbox point 2, diesel engine speed $n = 315 \text{ RPM}$

[DATA No. 2V]			[DATE : 9-11-09 14:39]
[MODE VEL] [RANGE 1.5 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 0.7920cm/s
1	145Hz	0.3337 cm/s	
2	90	0.2925	
3	100	0.2467	
4	295	0.1192	
5	165	0.0750	
6	205	0.0645	
7	180	0.0622	
8	445	0.0622	
9	855	0.0525	
REPLAY: FFT			FFT DISPLAY

Таблица 8

Горизонтальная вибрация редуктора в точке 2 при частоте вращения дизеля $n = 315 \text{ мин}^{-1}$

Table 8

Horizontal vibration of a gearbox at point 2, diesel engine speed $n = 315 \text{ RPM}$

[DATA No. 2H]			[DATE : 9-11-09 14:40]
[MODE VEL] [RANGE 1.5 cm/s] [FREQ. 2 KHz]			
[No.]	[FREQUENCY]	[SPECTRUM]	OVERALL 0.7237 cm/s
1	2	3	4
1	150Hz	0.2415 cm/s	
2	90	0.2107	
3	115	0.2085	
4	125	0.1762	
5	295	0.1530	

Окончание табл. 8

1	2	3	4
6	65	0.0817	
7	23	0.0690	
8	50	0.0637	
9	310	0.0592	
	REPLAY: FFT		FFT DISPLAY

Таблица 9

Результаты измерения ударных импульсов подшипников

Table 9

Results of measurement of bearing shock impulses

	Левый борт		Правый борт	
Дата	12.12.90		12.12.90	
Точки измерения	dB		dB	
1	17/8		23/0	
2	31/16		22/0	
3	12/2		17/0	
4	17/9		17/0	
5	17/7		15/0	
6	22/13		18/0	
7	53/40		27/0	
8	31/21		22/0	

В результате измерений было установлено:

- уровни вибрации и ударных импульсов подшипников редуктора левого борта не превышают допустимых норм;
- уровни вибрации и ударных импульсов подшипников редуктора правого борта превышают допустимые нормы;
- раскаты дизеля левого борта в норме;
- раскаты дизеля правого борта: цилиндры 1-5 в норме, а 6 – 0,22 мм превышает на 0,07 мм допускаемое значение.

Произвели центрирование обоих ДРА путем установки прокладок на клинья под фундаментные рамы обоих дизелей.

Дефектоскописты по результатам измерений (см. табл. 1-9) определили повышенный уровень вибрации, но не смогли окончательно определить дефект. Пришлось подключиться к решению проблемы судовым механикам. Вскрыли редуктор. При тщательном осмотре обнаружили механическое ослабление подшипника. Посадочное место обоймы подшипника оказалось изношенным на 3 мм, или 1,5 мм на сторону.

Механическое ослабление подшипника ведет к ускоренному изнашиванию посадочных мест и просадке вала. Значительная величина просадки вала сказывается на равномерности изнашивания поверхности зубьев в местах контакта, рис. 3.

Технология вибродиагностики механического ослабления деталей вала представлена в работе [5].

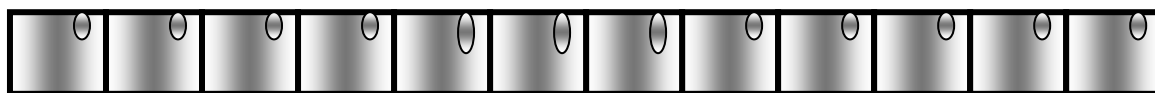


Рис. 3. Схема контактных пятен зубьев ведущей шестерни редуктора

Fig. 3. The scheme of gearbox driving gear teeth's contact stains

Выводы

Для повышения достоверности вибродиагностики главных судовых редукторов следует применять дополнительные диагностические методы. Хорошо зарекомендовал себя анализ продуктов износа в масле главных редукторов.

При ходовых испытаниях важным источником информации служат температуры деталей редуктора. Необходимо контролировать температуру, подачу и распределение масла по точкам смазки.

Для своевременного выявления механических ослаблений и усталостных трещин валов необходим тщательный осмотр деталей редуктора через лючки с использованием эндоскопов. Особое внимание уделить состоянию контактной поверхности зубьев.

Список литературы

1. Сергеев К.О. Опыт применения безразборной диагностики для определения технического состояния редукторов ТКГ2-03 СТМ типа «Атлантик-333» / К.О. Сергеев, А.С. Жуков // Вест. МГТУ. – Мурманск, 2011. –Т. 14, № 4. – С. 681-684.

2. ГОСТ Р 50891-96. Редукторы общемашиностроительного применения. Общие технические условия. Госстандарт России. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 28 с.

3. Прыгунов А.И. Виброметрия и виброакустическая диагностика главных энергетических установок рыбопромысловых судов / А.И. Прыгунов, А.А. Панкратов // Наука производству. – 2000. – № 2 (27). – С. 13-14.

4. Панкратов А.А. Анализ эксплуатационных дефектов главных редукторов рыбопромысловых судов // Наука и образование – 2003: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Мурманск, 2-16 апреля, 2003 г.: в 5 ч. Ч. 5. – Мурманск, 2003. – С. 18-19.

5. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь, 1996. – Вып. № 1. – 176 с.

Сведения об авторах: Юрий Алексеевич Корнейчук, кандидат технических наук, доцент, e-mail: korneych@mail.ru.