

ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНОЙ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.И. Николаев, д-р техн. наук, проф.

В.В. Герасиди, канд. техн. наук

А.В. Лисаченко, асп.

В статье рассматриваются результаты контроля вибрации турбокомпрессоров высокооборотных двигателей. Отсутствуют в нормативных документах значения параметров вибрации РОС турбин с частотой вращения ротора более $n_{TK} \geq 30 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Определить техническое состояние ТК можно только сравнивая вибрационные параметры ТК на аналогичных двигателях.

Ключевые слова: турбокомпрессор; дефект; вибрация; частота вращения; двигатель.

In the article the results of vibration control of high-speed engines turbochargers. Missing in the regulations of the parameter values of the vibration radial-axial turbines with rotor speed more $n_{TK} \geq 30 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$. To determine the technical condition of TC can only comparing the oscillation parameters TC on similar engines.

Keywords: turbocharger; damage; vibration; RPM; engine.

На судах морского флота, а также в различных отраслях промышленности, добывающего комплекса, жилищно-коммунального хозяйства и т.д., широко применяются современные высокооборотные двигатели (ВОД) с наддувом мощностью от 0,22 до 2 МВт таких фирм-производителей, как MWM Deutz Energy (Германия), Caterpillar (США), Perkins (Великобритания) [1].

В качестве агрегата наддува применяются турбокомпрессоры (ТК) с радиально-осевой турбиной различных производителей, например, фирмы ABB Turbo System Ltd, типа TPS с максимальной частотой вращения до $60 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ (1000 Гц).

Для оценки технического состояния ВОД с наддувом, применяемых в качестве генераторных установок в промышленности, проведены виброакустические исследования.

Объектом контроля вибрации в рассматриваемой работе являются:

1. Турбокомпрессоры с радиально-осевой турбиной фирмы ABB Turbo System Ltd типа TPS 48F33 НТ с максимальной частотой вращения $60 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ (1000 Гц), установленные на двигателе NCG2020V20 фирмы MWM мощностью 2000 кВт, 20 цилиндров, частота вращения 1500 мин^{-1} (25 Гц).
2. Турбокомпрессоры с РОС турбиной фирмы Caterpillar с минимальной частотой вращения ротора ТК $40 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, установленные на морских ВОД фирмы CAT.

В процессе контроля вибрации, поставлены следующие задачи:

- контроль технического состояния ТК по вибрационным характеристикам после ремонта;
- получение фактических значений вибрации двигателя согласно ГОСТ 31349-2007;

- определение влияния вибрации двигателя на вибрационные характеристики ТК;
- определение технического состояния по результатам контроля вибрации ТК.

Аналитический обзор руководящих документов показывает, что в настоящее время для оценки технического состояния ВОД существует:

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31349-2007 (ИСО 8528-9:1995) «Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния» [2].
2. Для морских ВОД, имеющих одинаковые конструкции ТК с РОС турбинами, допустимые значения виброскорости на оборотной частоте двигателя, согласно «Правил классификации и постройки морских судов» РМРС, являются значения среднегеометрических частот треть-октавных полос 25 Гц не более 30 мм/с [3].

Необходимо отметить, что в настоящее время нет нормативных документов для оценки технического состояния по виброакустическим параметрам РОС турбин с частотой вращения ротора более $n_{TK} \geq 30 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Существующие нормативные документы (Российский Морской Регистр Судоходства) устанавливают нормы вибрации для ТК с частотой вращения ротора менее $n_{TK} \leq 30 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, ГОСТ 31349-2007 рассматривает только замеры вибрации двигателе [2,3].

Таким образом, в связи с отсутствием нормативных документов, определить техническое состояние ТК можно только сравнивая вибрационные параметры ТК на аналогичных дви-

гателях, или результаты измерения за определенный период времени (наблюдать за трендом).

В рассматриваемом случае объектом контроля является ТК газопоршневой установки фирмы MWM модели NCG2020V20, номинальная мощность $N_{\text{ном}} = 2000$ кВт, частота вращения коленчатого вала двигателя $n = 1500$ мин⁻¹. Заказчиком был обеспечен режим работы ГПУ, равный 50% от $N_{\text{ном}}$ ($N = 1$ МВт). В качестве измерительного средства использовался анализатор шума и вибрации: портативный прибор VIBXPERTII (рисунок 1). Система сбора данных и анализа сигналов «VIBXPERT» используется в промышленности для мониторинга и диагностики состояния машин.



Рис. 1 Прибор для измерения вибрации VIBXPERTII

Результаты контроля вибрации ТК трех ГПУ с двумя ТК, расположенными в верхней точке двигателя, в направлениях x, y, z в соответствии с [2] представлены в виде зависимости виброускорения от частоты (рис. 2 – 4).

Из рисунков 2 – 4 видны ярко выраженные лопаточные частоты в районе 5000 Гц и гармоники лопаточной частоты ТК. Величина виброускорения при таких высоких частотах, как лопаточные, характеризует работу, которая связана с течением газа через лопаточный аппарат. В случае дальнейшего контроля вибрации ТК можно будет сравнить уровень виброускорения на лопаточной частоте для оценки их состояния. Вибрация корпуса и подшипников проявляется на оборотной частоте ТК, которая меняется в зависимости от нагрузки на двигатель. Например, при $N = 1$ МВт оборотная частота ротора ТК для данной ГПУ находится в диапазоне от 620 до 720 Гц. На этой частоте проявляет себя и наличие дисбаланса ротора ТК. Уровень вибрации (виброскорость) ТК в этом диапазоне частот мал и значения виброскорости на роторной частоте ТК приведены в таблице №1.

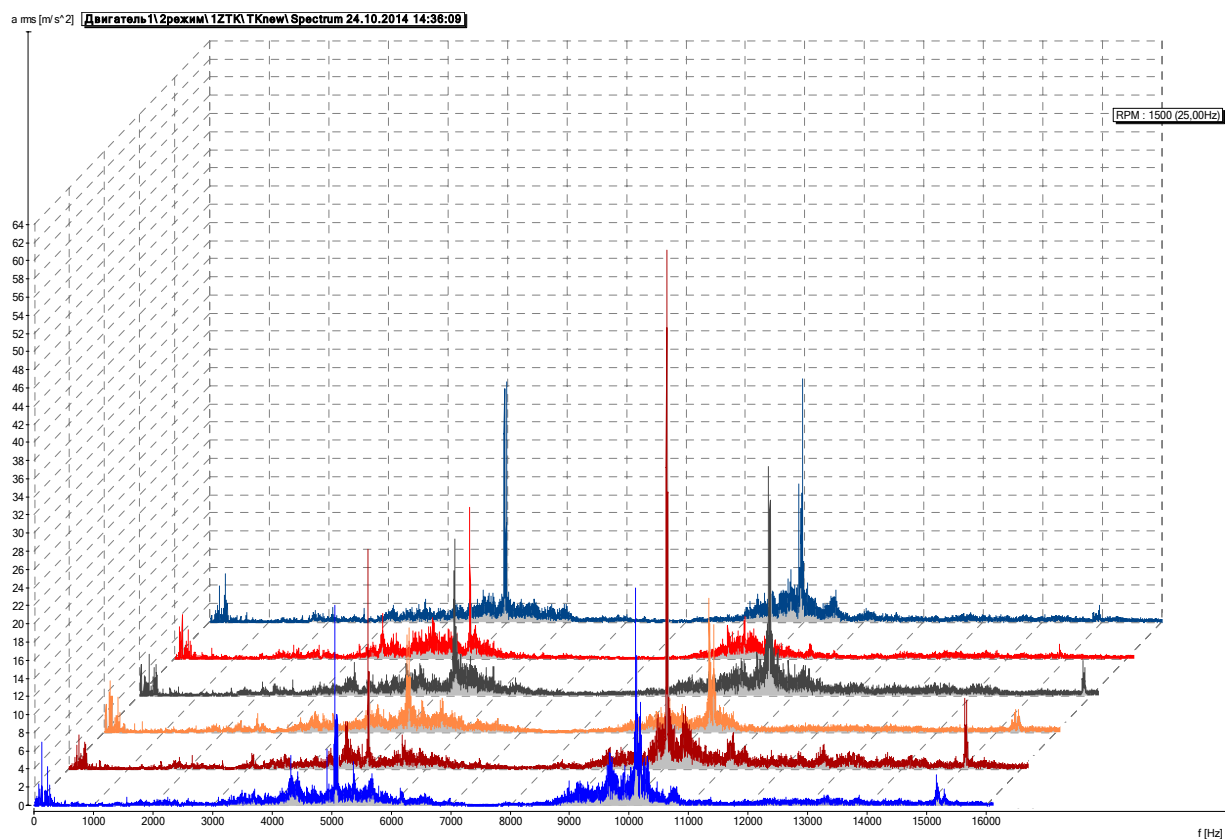


Рис. 2. Зависимость виброускорения в вертикальном направлении (z) турбокомпрессоров двигателей NCG2020V20 (MWM) при нагрузке 1МВт

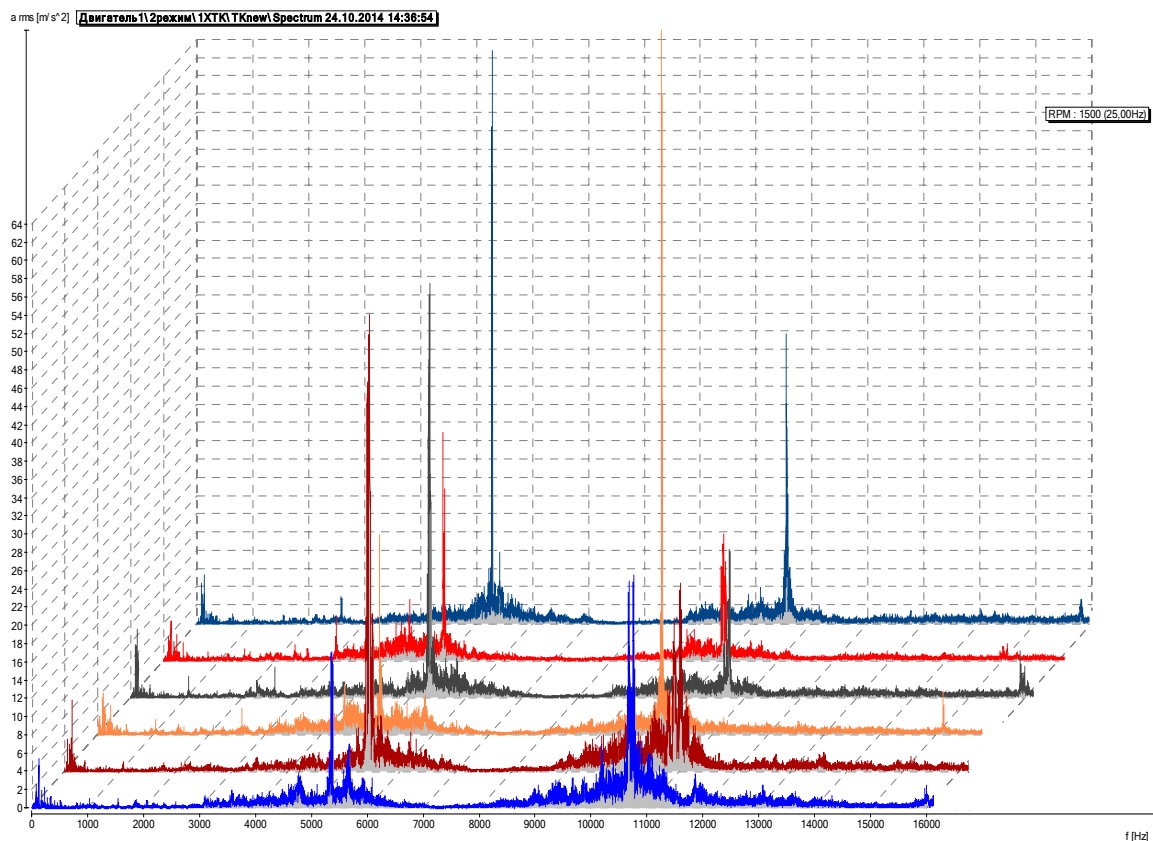


Рис. 3 Зависимость виброускорения в поперечном направлении (y) турбокомпрессоров двигателей NCG2020V20 (MWM) при нагрузке 1МВт

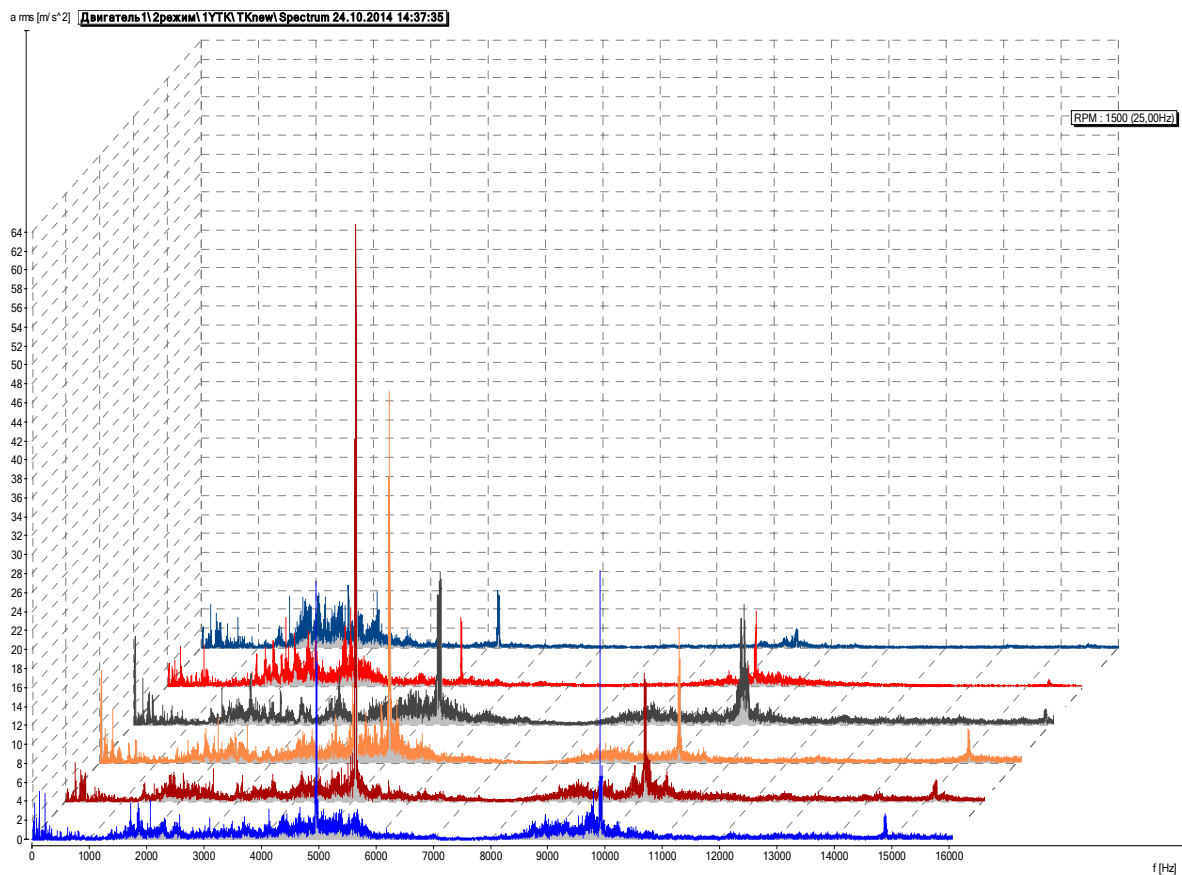


Рис. 4 Зависимость виброускорения в продольном направлении (x) турбокомпрессоров двигателей NCG2020V20 (MWM) при нагрузке 1МВт

На рисунке 5 в качестве примера представлена зависимость виброскорости ТК 3 ГПУ №2 в вертикальном направлении (z) в диапазоне частот 600-1000 Гц при нагрузке двигателя 0,5 $N_{ном}$. Из рисунка 5 виден один ярко выраженный пик оборотной частоты ТК, при котором значение виброскорости составляет 0,26 мм/с.

В таблице 1 представлены результаты замеров вибрации шести ТК фирмы ABB Turbo System Ltd., типа TPS 48F33 НТ ГПУ NCG2020V20 фирмы MWM мощностью 2000 кВт.

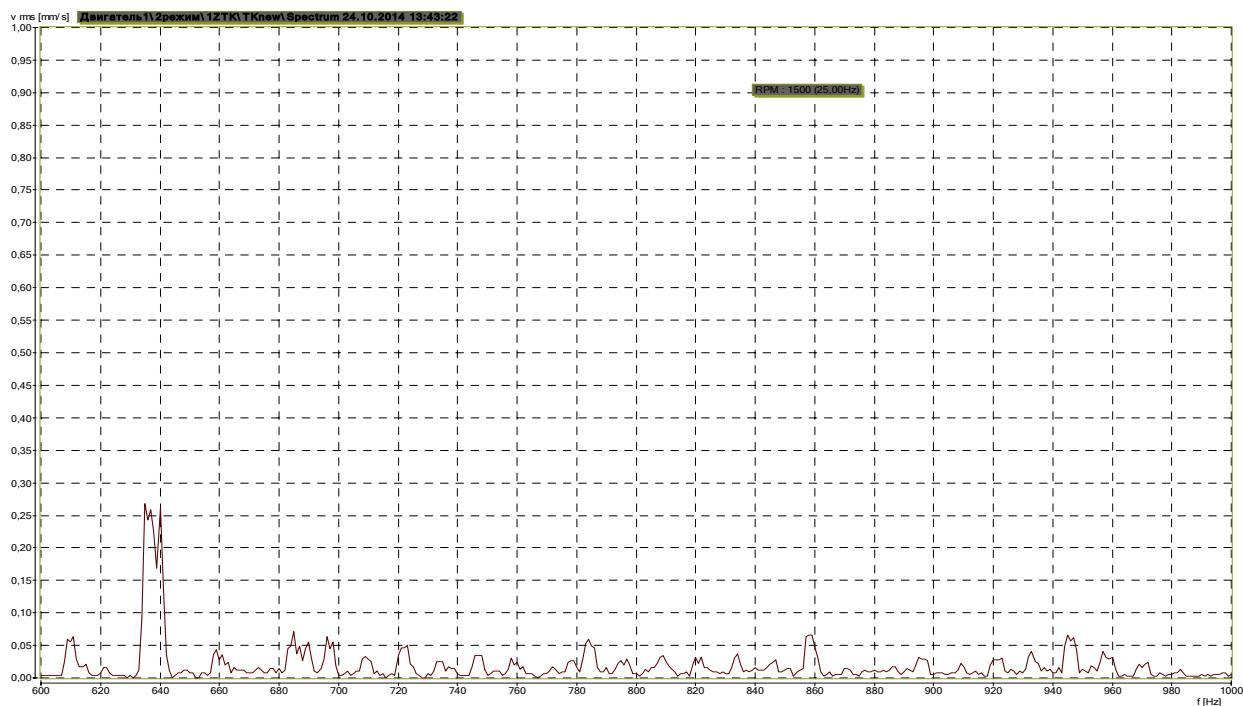


Рис. 5 Зависимость виброскорости в вертикальном направлении (z) турбокомпрессора ТК 3 двигателя NCG2020V20 (MWM) при нагрузке 1МВт

Таблица 1

Результаты измерения вибрации ТК ГПУ NCG2020V20 фирмы MWM мощностью 2000 кВт

№		Оборотная частота			Лопаточная частота ТК			Направление
ГПУ	ТК	Двигатель, Гц	ТК		Виброускорения, мм/с ²			
			Гц	Виброскорость, мм/с	Гц	1 гармоника	2 гармоника	
3	1	25	727	0,08	5052	12,5	23,97	Вертикальное (z)
	2		725	0,06	5018	23,54	48,58	
2	3		637	0,26	5120	11,49	14,74	
	4		661	0,19	5296	17,23	25,23	
4	5		620	0,29	4964	10,36	4,21	
	6		619	0,23	4947	20,68	26,28	
3	1		723	0,06	5373	14,7	22,94	поперечное (y)
	2		733	0,12	5440	47,8	18,68	
2	3		680	0,07	5037	15,38	70	
	4		723	0,09	5326	37	13,5	
4	5		635	0,09	4985	23,51	10,75	
	6		637	0,26	5268	30,3	24	
3	1		621	0,33	4958	22,96	28,37	продольное (x)
	2		635	0,21	5062	60,76	12,85	
2	3		631	0,6	5051	35,56	11,56	
	4		667	0,47	5359	14,3	11,9	
4	5		641	0,99	5133	6,59	6,36	
	6		634	0,79	5186	3,24	1,4	

Из таблицы 1 видно, как изменяются значения вибрации на оборотных частотах ТК в диапазоне 600-700 Гц: например, максимальное значение виброскорости на ТК № 6 (ГПУ № 4) в осевом направлении составляет 0,99 мм/с, а минимальное значение в вертикальном направлении ТК № 2 (ГПУ № 3) – 0,06 мм/с. Значение виброскорости исследуемых ТК 3,4 ГПУ №2 находится в пределах этих значений (0,07 – 0,49 мм/с), что говорит о примерно одинаковом техническом состоянии других ТК №1,2,5,6 ГПУ №3,4.

Оборотная частота всех ТК ГПУ 2,3,4 находится в диапазоне от 620 до 720 Гц при нагрузке двигателя 0,5 $N_{e,ном}$. Значения виброскорости во всех направлениях (z,x,y) на оборотной частоте ТК в диапазоне 620 – 720 Гц составляют не более 1 мм/с, что говорит о хорошем техническом состоянии ТК. Проведенные исследования аналогичных ТК морских ВОД представлены в таблице 2. Из таблицы видно, что при частоте вращения двигателя от 16 до 25 Гц, оборотная частота ТК лежит в диапазоне 563-881 Гц и значение виброскорости ТК не превышает 1 мм/с.

Таблица 2

Результаты измерения вибрации ТК морских ВОД

Объект		Оборотная частота			Лопаточная частота ТК			Направление
Название	№ ТК	Двигатель, Гц	ТК		Виброускорения, мм/с ²			
			Гц	Виброскорость, мм/с	Гц	1 гармоника	2 гармоника	
М/Б «1»	1	16	568	0,07	2952	0,74	0,04	
			566	0,1	2862	2,47	0,28	
	2		616	0,12	2794	0,38	0,32	
			626	0,071	2796	0,65	0,84	
	1	22	762	0,06	4150	4,2	1,39	
			714	0,12	4080	7,4	1,52	
	2		712	0,15	4308	5,8	3,67	
			714	0,05	4372	8,89	20,26	
	1	25	800	0,21	6402	7,07	9,9	
			804	0,13	6448	55,48	25	
	2		834	0,13	6668	9,37	5,99	
			842	0,32	6696	3,65	15,54	
М/Б «2»	1	16	568	0,03	2826	0,8	0,24	
			568	0,08	2818	0,77	0,35	
	2		566	0,05	2752	0,82	0,24	
			572	0,04	2980	0,46	0,56	
	1	22	728	0,1	4154	11,4	9,75	
			728	0,08	4140	1,47	2,79	
	2		736	0,06	4254	7,59	5,16	
			736	0,06	4270	5,39	1,12	
	1	25	804	0,53	6430	5,28	10,2	
			836	0,12	6442	11,4	2,86	
	2		828	0,08	6624	7,17	12,1	
			836	0,08	6630	6,9	13,6	
М/Б «3»	1	16	563	0,25	2494	0,12	0,38	
			571	0,08	2886	0,39	0,33	
	2		581	0,16	2804	0,24	0,16	
			585	0,12	2928	0,16	0,1	
	1	22	703	0,1	4888	0,27	0,72	
			715	0,05	4484	0,26	0,75	
	2		783	0,14	2938	0,48	0,6	
			749	0,08	2967	0,38	0,14	
	1	25	881	0,15	5361	6,1	1,59	
			853	0,19	5231	6,17	3,87	
	2		842	0,2	4908	1,34	1,67	
			838	0,21	4923	6,72	3,55	
М/Б «4»	1	16	580	0,1	2750	1,38	0,25	
		22	749	0,64	4498	1,3	0,8	
		25	875	0,12	6185	2,53	1,03	

Таким образом, согласно ГОСТ, который не включает точки на ТК и правила РС – необходимо разработать методику оценки, которая должна оценить общее техническое состояние ГПУ с упругими опорами крепления к раме контейнера и жестко установленных ТК к двигателю.

Причиной разрушения изоляции ТК является вибрация двигателя. Причиной этого может быть не отрегулированы опоры двигателя, превышены зазоры в подшипниковых узлах коленчатого вала двигателя (опорно-упорный подшипник и рамовые подшипники).

В связи с выше изложенным, перед нами стоит задача создания методики определения уровней вибрации, позволяющих разрабатывать критерии оценки технического состояния современных ТК и собирать статистику для формулирования рекомендаций по расширению норм вибрации на ТК современных ВОД.

Заключение

В соответствии с выполненной работой, можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время, нормативных документов контроля технического состояния по вибрационным параметрам ТК с частотой вращения ротора более $n_{тк} \geq 30 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ ВОД не су-

ществует. Обратная частота ТК находится в диапазоне от 600 до 700 Гц при нагрузке двигателя $0,5 N_{e_{ном}}$. Значения виброскорости во всех направлениях (z,x,y) на оборотной частоте ТК в диапазоне 620 – 720 Гц составляют не более 1 мм/с, что говорит о хорошем техническом состоянии ТК.

2. Причиной разрушения изоляции газова-ыхлопного тракта за ТК является вибрация двигателя. Необходимо провести проверку и регулировку опор двигателя, проверку подшипниковых узлов коленчатого вала двигателя (опорно-упорный подшипник и рамовые подшипники).

3. Для ГПУ необходимо разработать методику контроля вибрации ТК, двигателя и генератора.

Литература

1. <http://www.tehsovet.ru/article-2011-1-1-1379>.
2. ГОСТ 31349-2007 (ИСО 8528-9:1995) «Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния».
3. Российский морской регистр судоходства / Правила классификации и постройки морских судов; Том 2- НД «2-020101-077», 2013.

УДК 629.5.015

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УПРУГИХ СИСТЕМ В МАШИННЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ СУДОВ

Н.А. Тарануха, д-р техн. наук проф.,

С.А. Худяков, канд. техн. наук, доц.

Рассматриваются вынужденные колебания упругих систем в машинных отделениях транспортных судов от воздействия полного спектра неуравновешенных моментов главных малооборотных дизелей.

Ключевые слова: судно, дизель, упругие системы, вынужденные колебания.

The forced vibrations of elastic systems in machinery spaces of cargo ships from the effects of the full range of unbalanced moments of the major low speed diesel engines.

Keywords: ship, diesel, flexible systems, forced vibration.

Анализируя вибрацию главных малооборотных дизелей (МОД) и упругих подсистем в машинных отделениях (МО) транспортных судов, необходимо учитывать ряд факторов, основными из которых являются полный спектр неуравновешенных моментов дизелей и основные формы колебаний основной упругой системы «дизель-днище» (ДД) [1, 2, 3]. При этом на стадии проектирования судна следует рассматривать следующие задачи:

1) определение полного спектра неуравновешенных моментов устанавливаемого МОД,

который изменяется в широких пределах в зависимости от числа цилиндров и порядка их работы (особенно гармонические составляющие горизонтального скручивающего момента M_{xy});

2) расчет частот и форм свободных колебаний основной упругой системы ДД (формы вполне определенные – 1-я, Н и Х, которые хорошо изучены и могут быть определены только с использованием метода конечных элементов);