

УДК 629.5.00

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПРАВИЛ РС И ЗАРУБЕЖНЫХ НОРМ

Николай Иванович Николаев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые тепловые двигатели
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Михаил Викторович Гриценко

кандидат технических наук, ведущий специалист
ООО «КБ Инжиниринг»
353901, г. Новороссийск, ул. Сакко и Ванцети, 18
e-mail: gmluft@kbinov.ru

Виктор Васильевич Герасиди

кандидат технических наук, доцент кафедры судовые тепловые двигатели
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93
e-mail: gerasidi@rambler.ru

Аннотация

В данной статье приводится сравнение некоторых полученных результатов контроля вибрации судовых технических средств в эксплуатации с нормами вибрации по Правилам РС, рекомендациями других Классификационных обществ, международными документами ISO и производителей судовых технических средств. В работе приведены результаты контроля технического состояния электродвигателей, генераторов, центробежных насосов с различной компоновкой по параметрам вибрации в соответствии с требованиями Правил РС и зарубежных норм в течение эксплуатации. Анализ полученных результатов показывает, что при контроле вибрации судовых технических средств в эксплуатации необходимо учитывать компоновку агрегатов (их связь с другими агрегатами) и оценивать техническое состояние как на характерных частотах, так и в широком диапазоне частот. На основании проводимых специалистами исследований вибрации СТС морских судов в эксплуатации и необходимо подготовить рекомендации по нормированию вибрации в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: судовые технические средства, электродвигатель, контроль технического состояния, Классификационные общества, вибрация

RESULTS OF VIBRATION CONTROL OF SHIP TECHNICAL MEANS IN OPERATION IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE RS RULES AND FOREIGN NORMS

Nikolay I. Nikolaev

the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of department of marine heat engines
Admiral Ushakov State Maritime University
Lenin's avenue, 93, 353918, Novorossisk, Russian Federation
St. Sacco and Wanceti, 18, 353918, Novorossisk, Russian Federation

Mikhail V. Gritsenko

Can..Sci.Tech.leading specialist
KB Engineering
St. Sacco and Wanceti, 18, 353918, Novorossisk, Russian Federation
e-mail: gmluft@kbinov.ru

Viktor V. Gerasidi

Can..Sci.Tech., the docent of department of marine heat engines
Admiral Ushakov State Maritime University
Lenin's avenue, 93, 353918, Novorossisk, Russian Federation
e-mail: gerasidi@rambler.ru

Abstract

This article presents a comparison of some of the results of vibration control of ship technical means in operation with the vibration standards According to the rules of the RS and recommendations of other Classification societies and manufacturers of ship technical means. The paper presents the results of monitoring the technical condition of electric motors, generators, centrifugal pumps with different configurations for vibration parameters in accordance with the requirements of the RS Rules and foreign norms during operation. The analysis of the obtained results shows that when controlling the vibration of ship technical means in operation, it is necessary to take into account the layout of units (their connection with other units) and assess the technical condition both at characteristic frequencies and in a wide range of frequencies. On the basis of the research conducted by specialists of vibration of sea vessels in

operation and it is necessary to prepare recommendations for the regulation of vibration in a wide range of frequencies.

Keywords: ship technical means, electric motor, technical condition control, Classification societies, vibration

Введение

Российский морской регистр судоходства (РС) все шире вводит в практику методы освидетельствования судов на основе данных о фактическом состоянии судовых технических средств (СТС) в период эксплуатации между Классификационными ремонтами судна. Базой для таких данных являются результаты технического контроля параметров, характеризующих состояние СТС, с применением методов и средств технического диагностирования. Внедрение системы технического контроля и оценки состояния СТС позволяет перейти от оценки "годность" по результатам вскрытия СТС и предъявления в разобранном виде инспектору РС к безразборному освидетельствованию [1,2].

В документах РС и других Классификационных обществ (КО: DNVGL [3], BV и др.), рекомендациях зарубежных производителей СТС приводятся нормы вибрации СТС с которыми необходимо сравнивать результаты контроля вибрации СТС в эксплуатации и дать оценку состояния, как, например, в [1]:

"А" – состояние механизмов и оборудования после изготовления (постройки) или ремонта судна;

"В" – состояние механизмов и оборудования во время нормальной эксплуатации;

"С" – состояния механизмов и оборудования, при котором оно требует проведения технического обслуживания или ремонта.

Объекты исследования

Авторы имеют многолетний опыт контроля технического состояния различных СТС (электродвигателей, насосов, генераторов электрического тока, дизелей и т.д.) морских судов. В процессе выполнения таких исследований авторы столкнулись с тем, что оценка результатов контроля СТС по параметрам вибрации при оценке их состояния по нормам РС и нормам приведенных в других источниках (например, DNVGL, производителей СТС и т.п.) отличаются. Причем следует отметить, что отсутствует одинаковый подход при выборе контролируемого параметра вибрации и диапазона частот. В качестве таких параметров принимают:

а) средне-квадратичное значение виброскорости $V_{скз}$, мм/с в диапазоне частот, например, 10-1000 Гц [4] или 2-400 Гц [3];

б) значение виброскорости $V_{1/3}$, мм/с, в 1/3 октавной полосе частот на соответствующей основной (оборотной) частоте вращения СТС;

в) размах (двойная амплитуда колебаний) вибрации на основной частоте вращения S_{p-p} , мкм.

В данной статье авторы приводят сравнение некоторых полученных результатов контроля вибрации СТС в эксплуатации с нормами вибрации по Правилам РС и рекомендациями других Классификационных обществ и производителей СТС.

При проведении исследований по контролю вибрации СТС применялись анализаторы шума и вибрации, которые сертифицированы и имеют свидетельство о признании РФ, ежегодно проходят поверку и калибровку:

– «SVAN 958» «Svantek Ltd» (Польша);

– «VIBXPERT II VIB 5.310» (Германия).

1. Гребной электродвигатель (ЭД) мощностью 450 кВт предназначен для привода главной винторулевой колонки (ГВРК) самоходного плавучего крана (рисунок 1).

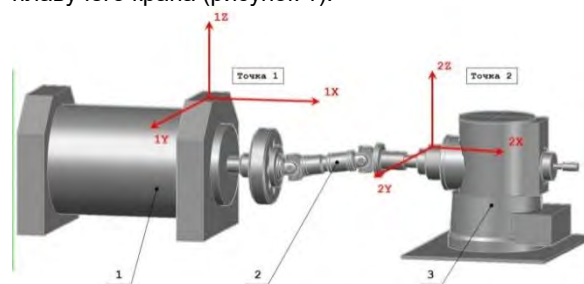


Рис. 1. Точки измерения вибрации на ГВРК с электроприводом

1 – приводной электродвигатель; 2 – карданный вал; 3 – ГВРК типа ZF

Соединение ЭД и ГВРК осуществляется карданным валом, с углом около 8 градусов к горизонтальной плоскости со стороны ЭД устанавливается эластичная муфта. При частоте вращения ЭД 1625 мин⁻¹ (25Гц в 1/3 октавной полосе). На рисунке 2 приведены уровни вибрации на характерных частотах в 1/3 октавных полосах.

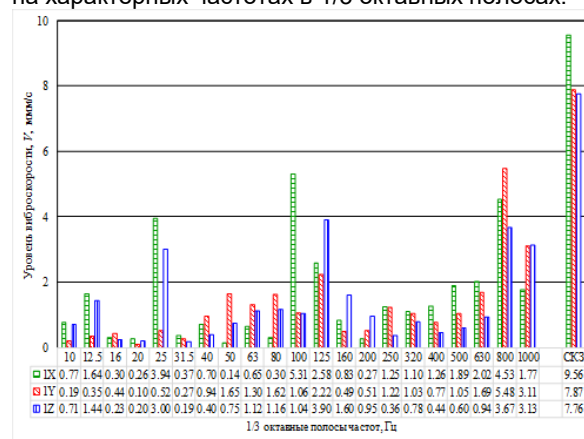


Рис. 2. Уровни вибрации в 1/3-октавном спектре и СКЗ на гребном (приводном) электродвигателе ГВРК в точке 1

Из рисунка 2 видно, что на частоте 25 Гц (1/3 октавной полосы) значение виброскорости в осевом направлении x составляет примерно 4 мм/с. Сравнение с нормами вибрации (категория "В", $V_{1/3} \leq 10$ мм/с) приведенными в [1,2] показывает, что ЭД находится в хорошем техническом состоянии. Однако оценка состояния ЭД в соответствии с рекомендациями [1] на

основной частоте в 1/3 октавной частоте полосе не учитывает наличие в конструкции пропульсивного комплекса карданного вала, который в силу кинематических особенностей генерирует значительную осевую силу и крутильные колебания. Это оказывает влияние на уровень вибрации в широком диапазоне частот 10-1000 Гц (как это рекомендуют ГОСТ ИСО [4], и, например, DNVGL [3]) и $V_{скз}$ в осевом направлении составляет примерно 9,8 мм/с. В связи с изложенным выше следует оценивать работу ЭД по параметрам вибрации в условиях эксплуатации с учетом компоновки его с другими агрегатами. В правилах РС норм при такой оценке вибрации гребного ЭД нет, а КО DNVGL рекомендует диапазон частот 4-200 Гц [3].

2. Электродвигатель привода компрессора системы управления для кондиционирования воздуха, $N_e = 12.65$ кВт, основная частота вращения 1760 мин⁻¹ (рисунок 3). На рисунке 3 представлена судовая холодильная установка с указанием элементов и точек контроля вибрации.



Рис. 3. Фото холодильной установки с указанием точек контроля и направление

В таблице 1 приведены результаты контроля вибрации электродвигателя компрессора, которые сравнены с нормами [1,3,4] и рекомендациями завода изготовителя [5]. Из таблицы 1 видно, что:

- на частоте вращения ЭД 31,5 Гц (1/3 октавной полосы) значение виброскорости в зависимости от направления измерения вибрации и опоры ЭД составляет 2,7-5,36 мм/с, категория "А/В" [1];
- значение виброскорости $V_{скз}$ измеренное в диапазоне частот 10-1000 Гц [4] и 4-200 [3] имеет значения больше рекомендованных норм [3,4] и ЭД необходимо ремонтировать;
- размах вибрации на оборотной частоте вращения S_{p-p} , мкм, составляет в зависимости от направления измерения вибрации и опоры ЭД от 28 до 48 мкм; сравнение с рекомендациями завода-изготовителя (таблица 2) и документами РС [1] позволяет сделать вывод о том, что состояние электродвигателя соответствует категории "В" [1].

Таблица 1

Параметры вибрации ЭД $N_e = 12.65$ кВт холодильной установки

Виброскорость в 1/3 октавной полосе частот 31.5 Гц, мм/с												
	Передний подшипник (отбор мощности)			Задний подшипник			Передняя опора			Задняя опора		
Напр.	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X
	5,36	5,29					4,6	4,13	2,7	4,7	3,2	2,7
Категория состояния согласно Правил РС РФ [1]							«A/B»					
Виброскорость в широкой полосе частот 10-1000 Гц V_{rms}												
Напр.	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X
	6,66	14,02					6,9	11,1	6,26	7,2	9,1	6,8
ISO 10816-3: 2002 [4]							«D»					
Виброскорость в широкой полосе частот 4-200 Гц V_{rms}												
Напр.	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X
		6,67	14,01				6,9	11,10	6,26	7,20	9,11	6,81
KO DNVGL [3]							не более 7 мм/с					
Размах (двойная амплитуда колебаний) вибрации на оборотной частоте вращения S_{p-p} , мкм												
Напр.	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X
		48	46				40	36	40	44	28	44
Рекомендации завода изготовителя [5]							«B» (см. таблицу 2)					

Таблица 2

Рекомендаций завода изготовителя по нормам вибрации электрических машин HYUNDAI ELECTRIC [5]								
Размах (двойная амплитуда колебаний) вибрации на оборотной частоте вращения S_{p-p} , мкм								
Основная частота вращения	горизонтального исполнения вала S_{p-p} , мкм				вертикального исполнения вала S_{p-p} , мкм			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1770-1800 rpm	<30	<55	<80	>80	<45	<75	<112	>112
1100-1200 rpm	<59	<85	<125	>125	<68	<105	<150	>150
«A/B» – уровни вибрации во время эксплуатации. «B/C» – предупреждение; «C/D» – вывод машины эксплуатации								

На рисунке 4 приводится спектр вибрации ЭД судовой холодильной установки. В спектре присутствует несколько пиков в диапазоне частот от 20 до 200 Гц, которые характеризуют наличие ременной передачи от ЭД к компрессору. Такая конструкция, наличие ременной передачи, оказывает влияние на уровень вибрации в широком диапазоне частот 10-1000 Гц. В данном примере необходимо отрегулировать ременную передачу: натяжение, перекус и т.п.

3. Генераторы электрического тока находят широкое распространение с приводом от ДВС на современных морских судах, компоновка

которых показана на рисунке 5. На рисунке 6 показаны зависимости $V_{1/3}$ от мощности генераторов с частотой вращения 1500 мин⁻¹, в эксплуатации и приведены нормы вибрации [1,3].

Техническое состояние генераторов ДГ (рисунок 6) в большинстве приведенных примеров по уровню вибрации можно оценить в соответствии с категории "A/B". Также на рисунке 4 значками (*) показаны высокие уровни вибрации генераторов (категории "C"). На рисунке 6 представлены спектры виброскорости $V_{1/3}$ генераторов ДГ, у которых после проведенных исследований и ремонта были выявлены неисправности (плохая центровка генератора и двигателя).

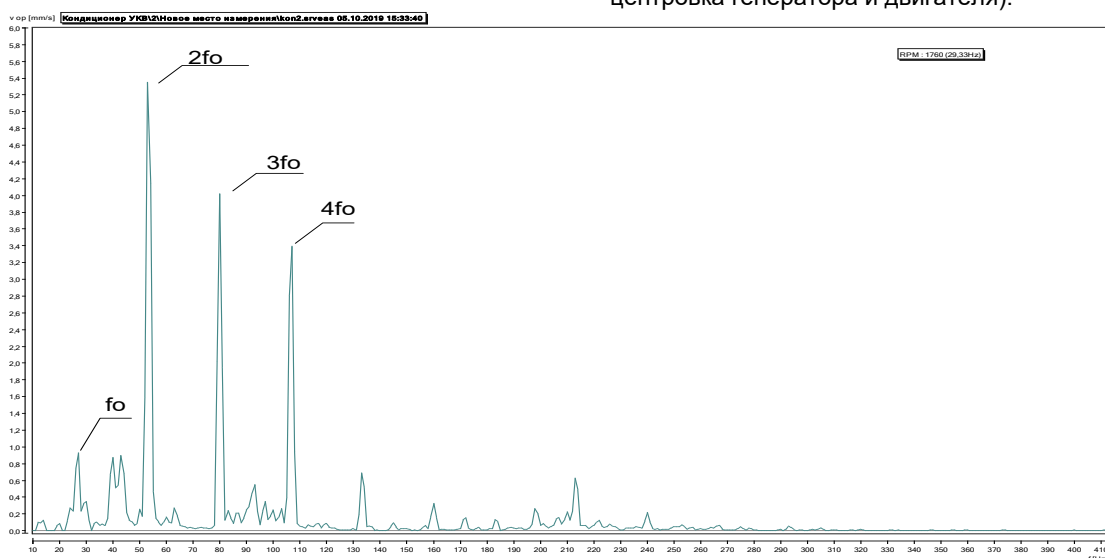


Рис. 4. Спектр виброскорости электродвигателя HYUNDAI ELECTRIC мощность 12,65 кВт судовой холодильной установки

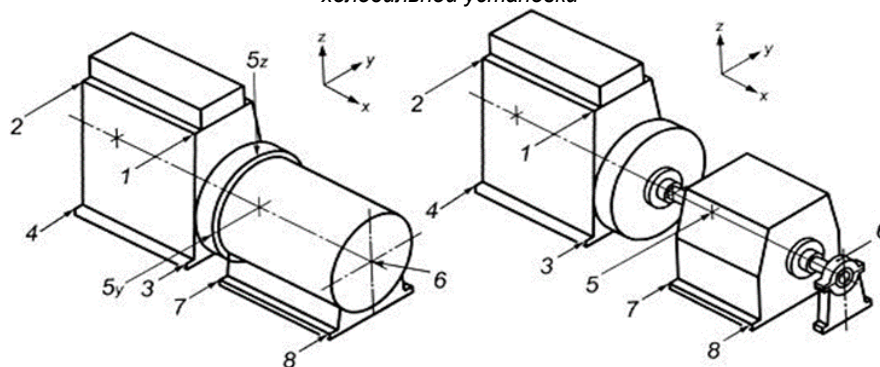


Рис. 5. Компоновка ДГ и расположение точек измерения в соответствии [6]

а) Генератор с приводом от ДВС, жестко соединенный через фланцевый щит

б) Генератор с приводом от ДВС соединенный через упругую муфту

1, 2 - передняя и задняя верхние грани кожуха двигателя; 3, 4 - передняя и задние части основания двигателя; 5, 6 - корпус главного подшипника генератора; 7, 8 - основание генератора

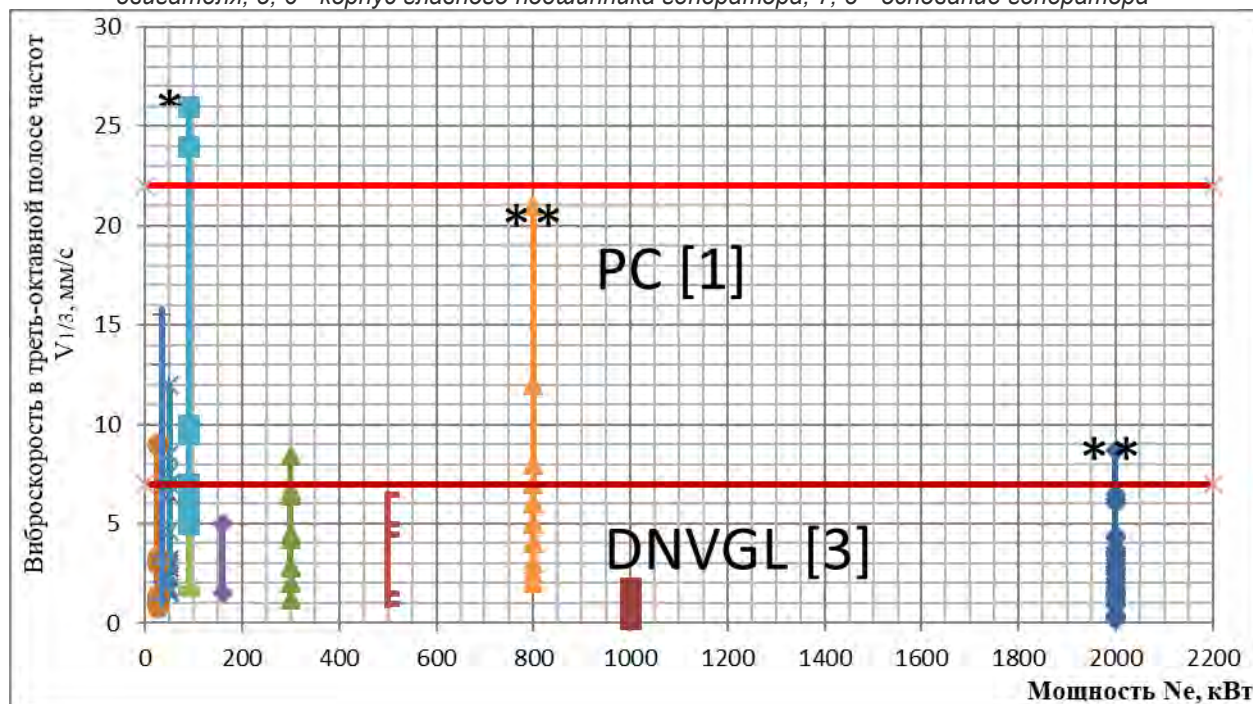
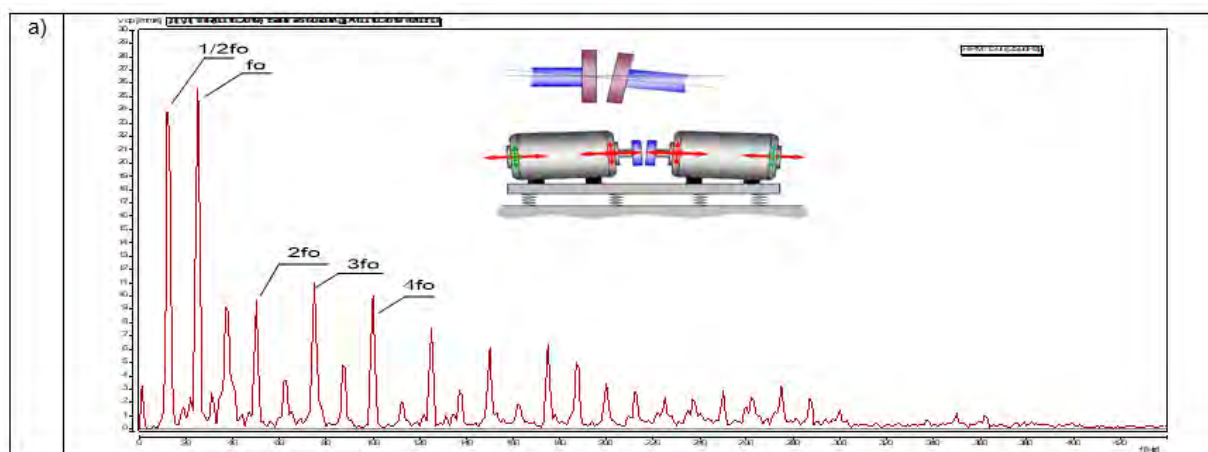


Рис. 6. Зависимость виброскорости в треть-октавной полосе частот от мощности генераторов дизель-генераторов (ДГ)

На рисунке 7 представлены спектры виброскорости $V_{1/3}$ генераторов ДГ, у которых после проведенных исследований и ремонта были выявлены неисправности (плохая центровка генератора и двигателя). Из рисунка 7 видно, что значения виброскорости $V_{1/3}$ на: полуоборотной и оборотной частоте вращения генератора максимальные и превышают остальные гармоники примерно в два раза (рисунок 7,а); на второй гармонике максимальное и превышает остальные гармоники (рисунок 7,б).

3. Балластные центробежные насосы
производительностью 2500 м³/час производятся от ЭД мощностью 300 кВт, расположены в помповом отделении танкера дедвейтом 100 тыс. тон и приводятся от ЭД, находящегося в машинном отделении. ЭД и балластные насосы соединены промежуточными валами. Ось вращения – вертикальная.

Измерения вибрации выполнялись на корпусе насоса. В таблице 3 приведены результаты контроля вибрации двух балластных насосов и сравнение их с нормами.



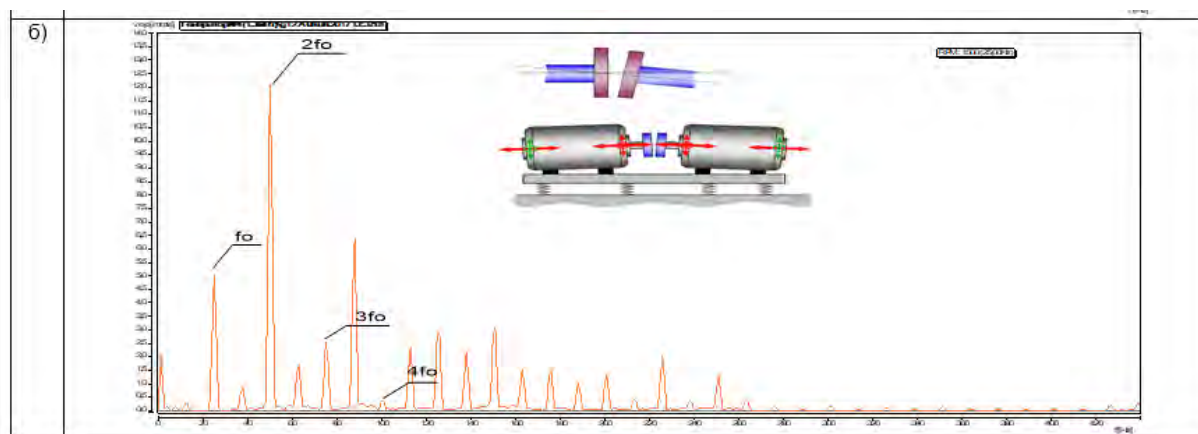


Рис. 7. Спектры виброскорости генератора ДГ
а) мощностью 90 кВт (рисунок 3,а); б) мощностью 2000 кВт (рисунок 3,б)

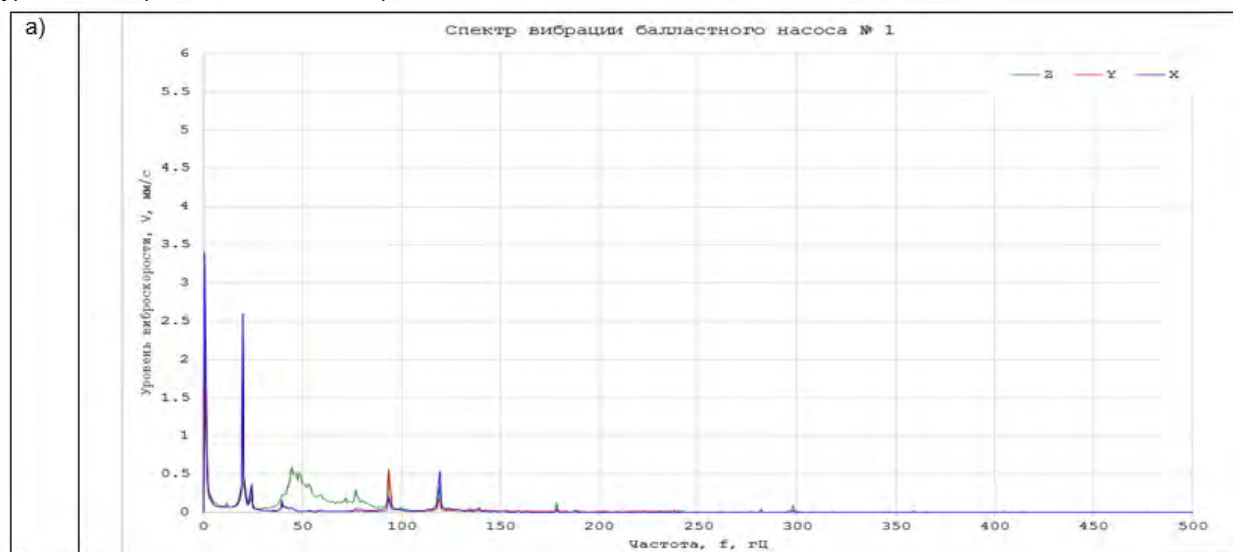
Таблица 3

Параметры вибрации балластных насосов производительностью 2500 м³/час						
Уровни вибрации в 1/3 октавной полосе частот $V_{1/3}$, мм/с				Общий уровень вибрации $V_{\text{свз}}$, мм/с		
Основная частота 25 Гц				Диапазон 10-1000 Гц		
Напр.	x	z	y	x	z	y
№1	2,69	1,96	2,56	2,86	3,08	2,75
№2	2,32	5,59	5,7	3,2	5,82	5,88
Категория состояния согласно Правил РС РФ [1] №1 "В", №2 "В"				ISO 10816-3: 2002 [4] №1 "С", №2 "С"		

Из таблицы 3 видно, что балластные насосы по нормам Правил РС [1] соответствуют категории "В", а по международному стандарту [4] категории соответствуют "С". Оценка состояния [4] по параметрам вибрации охватывает широкий спектр частот. В связи с этим рассмотрим спектр частот вибрации балластного насоса, рисунок 8. Из рисунка 8 видно, что на основной частоте 20 Гц у насоса №2 (рисунок 8,б) значение виброскорости в 2 раза превышает значение виброскорости у насоса №1. Это может быть связано с плохой центровкой ЭД, промежуточного вала и насоса, дисбалансом вала ротора насоса и т.п. Сравнение уровней вибрации насосов в широком диапазоне

частот показывает, что на всех частотах, кроме основной, уровни вибрации (спектр) примерно одинаковые, отличие только по уровню вибрации на основной частоте, которые по нормам Правил РС [1] допустимы.

4. Питательные центробежные насосы вспомогательных котлов производительностью 86 м³/час приводятся от ЭД мощностью 110 кВт. Ось вращения насоса – горизонтальная. Измерения вибрации выполнялись на корпусе подшипников насоса. В таблице 4 приведены результаты контроля вибрации двух питательных насосов и сравнения их с нормами.



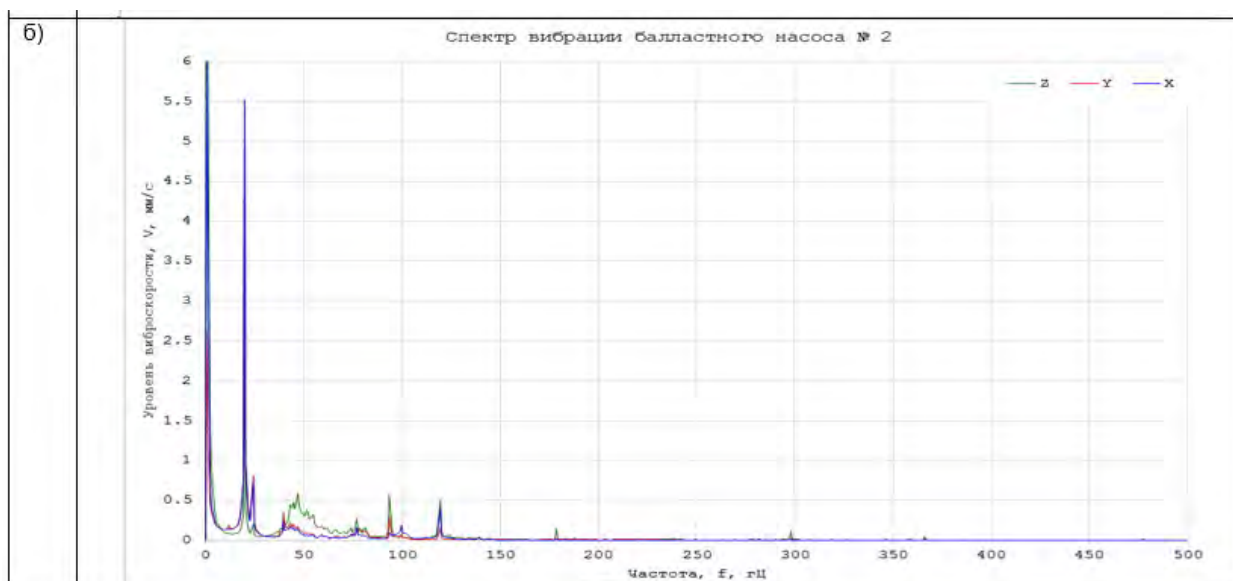


Рис. 8 Спектры виброскорости балластных насосов производительностью 2500 м³/час
а) №1; б) №2

Таблица 4

Параметры вибрации питательных центробежных насосов производительностью 86 м³/час

	Уровни вибрации в 1/3 октавной полосе частот $V_{1/3}$, мм/с			Общий уровень вибрации $V_{скз}$, мм/с		
	Основная частота 63 Гц			Диапазон 10-1000 Гц		
	Передняя опора (входной вал)					
Напр.	x	z	y	x	z	y
№1	29,22	8,30	4,99	30,38	10,15	7,50
№2	5,84	16,79	13,01	7,18	18,26	14,48
	Задняя опора					
№1	30,16	11,49	26,05	31,33	12,44	27,15
№2	15,66	34,33	10,96	17,13	36,16	12,312
Категория состояния согласно Правил РС РФ [1] №1 "В", №2 "С"				ISO 10816-3: 2002 [4] №1 "С", №2 "С"		

Заключение

Приведенные примеры и работы авторов [7,8] показывают, что при контроле вибрации СТС в эксплуатации необходимо:

– учитывать компоновку агрегатов (их связь с другими агрегатами) и оценивать техническое

состояние, как на характерных частотах, так и в широком диапазоне частот;

– на основании проводимых специалистами исследований вибрации СТС морских судов в эксплуатации и необходимо подготовить рекомендации по нормированию вибрации в широком диапазоне частот.

Литература

- НД 2-020101-104. Правила классификации и постройки морских судов т.1. Часть VII, Механические установки, раздел 9. СПб. Российский Морской Регистр Судоходства, 2018 г.
- НД 2-030101-033. Руководство по техническому наблюдению за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий. Раздел 10, Приложение 6, табл. 2. СПб. Российский Морской Регистр Судоходства, 2018 г.
- DNVGL. Rules for classification ships. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch8.pdf>.
- ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹. Идентичен (ISO 10816-3:1998 "Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ"). М.: Стандартинформ, 2007.
- HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd. Manual. Instruction manual for marine motor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hyundai-electric.com/elec/en/customer/downloadList.jsp>.
- ГОСТ 31349-2007 (ИСО 8528-9:1995) Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния Модифицированный ISO 8528-9:1995 "Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets - Part 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations").

7. 1. Контроль вибрации генератора AVK DIG 130/k4 мощность 2000 кВт газопоршневой установки NCG2020V20 фирмы MWM / Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Башуров Б.П. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 1. № 2 (43). С.121-126
8. Мониторинг вибрационного состояния главных винторулевых колонок с механическим приводом морских судов в эксплуатации / Николаев Н.И., Гриценко М.В., Каракаев А.Б. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 1. № 2 (43). С. 91-103.

References

1. ND 2-020101-104. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov t.1. Chast' VII, Mehanicheskie ustanovki, razdel 9. SPb. Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva, 2018 g.
2. ND 2-030101-033. Rukovodstvo po tehničeskemu nabljudeniju za postrojkoj sudov i izgotovleniem materialov i izdelij. Razdel 10, Prilozhenie 6, tabl. 2. SPb. Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva, 2018 g.
3. DNVGL. Rules for classification ships. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch8.pdf>.
4. GOST ISO 10816-3-2002. Vibracija. Kontrol' sostojanija mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashhajushhihsja chastjah. Chast' 3. Promyshlennye mashiny nominal'noj moshhnost'ju bolee 15 kVt i nominal'noj skorost'ju ot 120 do 15000 min-1. Identichen (ISO 10816-3:1998 "Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ"). M.: Standartinform, 2007.
5. HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd. Manual. Instruction manual for marine motor. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.hyundai-electric.com/elec/en/customer/downloadList.jsp>.
6. GOST 31349-2007 (ISO 8528-9:1995) Jelektroagregaty generatornye peremennogo toka s privodom ot dvigatelja vnutrennego sgoranija. Izmerenie vibracii i ocenka vibracionnogo sostojanija Modificirovannyj ISO 8528-9:1995 "Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets - Part 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations").
7. Kontrol' vibracii generatora AVK DIG 130/k4 moshhnost' 2000 kVt gazoporshnevoj ustanovki NCG2020V20 firmy MWM / Gerasidi V.V., Lisachenko A.V., Bashurov B.P. // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. Т. 1. № 2 (43). С.121-126
8. Monitoring vibracionnogo sostojanija glavnyh vintorulevyh kolonok s mehanicheskim privodom morskih sudov v jekspluatacii / Nikolaev N.I., Gricenko M.V., Karakaev A.B. // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. Т. 1. № 2 (43). С. 91-103.