

К. О. Сергеев, А. А. Панкратов

Особенности безразборной диагностики судовых роторных насосов

В судовых энергетических установках получили большое распространение роторные насосы, обеспечивающие перекачку различных вязких сред: топлива, масел и т. п. Как и все судовые механизмы, насосы нуждаются в соответствующем обслуживании и контроле технического состояния. Целесообразным является обслуживание и ремонт, проводимый по "состоянию" по результатам проведенной безразборной диагностики. Наибольшее распространение для диагностики насосов получили методы вибродиагностики. Вибродиагностика роторных насосов имеет ряд особенностей, обусловленных характером и состоянием перекачиваемых сред. Для нормирования вибрации и диагностики технического состояния роторных насосов используются нормы Российского морского регистра судоходства (РМРС). Для выяснения особенностей вибродиагностики роторных насосов были проведены измерения на специальном стенде, позволяющем имитировать различные режимы работы судовых насосов: различное давление в системе и температуру перекачиваемой среды. В результате измерений получены третьоктавные и узкополосные спектры вибрации насосов при различных развиваемых давлениях и температурах перекачиваемой среды. Проведенный анализ результатов показал, что нормы РМРС для диагностики судовых роторных насосов имеют недостаточную информативность ввиду того, что не учитывают зависимость спектра вибросигнала от развиваемого давления и температуры перекачиваемой среды. Характер полученных сигналов показывает, что уровни третьоктавного спектра виброскорости существенно зависят от температуры перекачиваемой среды, это необходимо учитывать при применении норм РМРС. Большое влияние температура среды оказывает на характер узкополосного спектра виброускорения в области средних частот, меньшее – на характер спектра виброскорости. В результате проведенной работы делаются выводы о целесообразности использования для диагностики технического состояния роторных насосов узкополосных спектров виброскорости и спектров огибающей высокочастотной компоненты вибросигнала, при этом следует опираться не на абсолютные значения уровня вибрации, а на наличие характерных частот и присутствие их модуляций, порождаемых различными дефектами.

Ключевые слова: диагностический параметр, безразборная диагностика, судовые насосы, огибающая, нормы вибрации.

Введение

Роторные насосы получили широкое распространение в судовых энергетических установках. Как правило, они используются для перекачки вязких жидкостей – топлива, масел, жидкостей для гидросистем. Насосы применяются в системах смазки судовых дизелей как транспортные насосы в системах перекачки топлива и масел и как насосы гидравлических приводов. Роторные насосы применяются в ответственных судовых системах и нуждаются в своевременном ремонте и обслуживании. Наиболее рациональным методом эксплуатации роторных насосов является обслуживание и ремонт по "состоянию", когда техническое обслуживание и ремонт проводятся по результатам определения технического состояния методами безразборной диагностики. При проведении безразборной диагностики часто используются и методы прогнозирования остаточного ресурса агрегата [1; 2]. Поэтому большое значение имеет методика проведения диагностики, а также достоверность и точность полученных результатов. Наиболее распространенным методом диагностики роторных насосов является вибродиагностика [3; 4]. Применительно к роторным насосам в судовых условиях она имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при определении их технического состояния.

Цель работы состоит в определении влияния температур и давлений перекачиваемой среды на вибродиагностические параметры объемных насосов для последующей корректировки существующих норм.

Материалы и методы

Основные требования к измерению вибрации насосов, соответствию норм и, следовательно, определению технического состояния насосов приведены в правилах РМРС¹ "Часть VII. Механические установки". Нормы вибрации указаны на рис. 1.

Другие существенные требования к проведению диагностики изложены в "Инструкции по использованию достоверных показаний встроенных и переносных средств диагностирования и неразрушающего контроля при освидетельствовании объектов на судах"².

¹ Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД № 2-020101-095 / Рос. мор. регистр судоходства. СПб. : Рос. мор. регистр судоходства, 2017. 64 с.

² Приложения к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009 / Рос. мор. регистр судоходства. СПб. : Рос. мор. регистр судоходства, 2017. 292 с.

Норма построена для третьоктавного спектра виброскорости (среднеквадратичное значение) в диапазоне до 500 Гц и имеет три категории технического состояния.

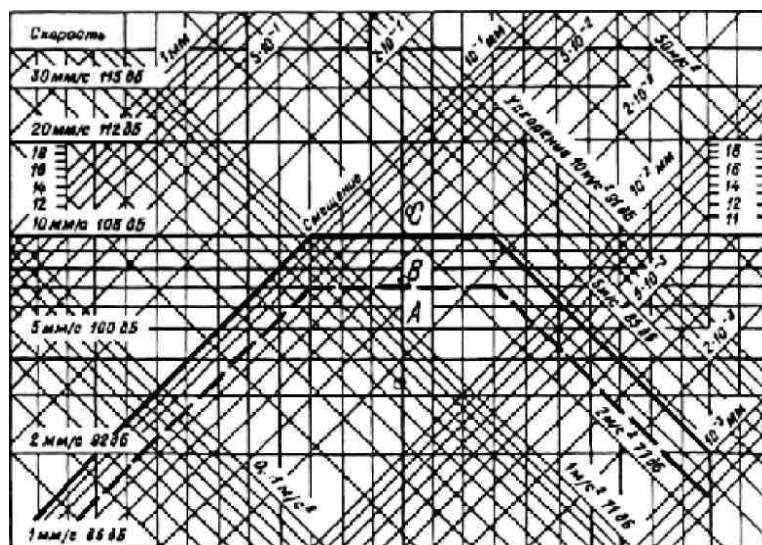


Рис. 1. Нормы вибрации насосов³
Fig. 1. The standards of pumps' vibration

Указанная норма распространяется на все типы насосов, независимо от их конструктивных особенностей, корректируется только по мощности (две градации) и способа монтажа насоса (горизонтальное расположение или вертикальное). Это является недостатком указанного нормирования. У роторных насосов (шестеренных и винтовых) уровень вибрации значительно зависит от вязкости масла и развиваемого насосом давления. Давление насоса в конечном итоге зависит от сопротивления системы и вязкости. Вязкость в условиях эксплуатации определяется температурой перекачиваемой среды.

Целью проведения диагностики роторных насосов является определение неисправностей подшипников насоса, состояния центровки с приводным двигателем, дефектов зацепления в шестернях и винтовых парах. Все указанные дефекты проявляются на характерных частотах, которые возбуждаются силами, действующими при работе насоса. Как правило, контролируются частоты равные и кратные частоте вращения (состояние центровки), зубцовые частоты (модуляция зубцовых частот может возникать как следствие дефектов зубьев) и их высшие гармоники, частоты вращения винтов [3]. Диагностика подшипников насоса или его электропривода может проводиться по анализу огибающей вибросигнала [3; 5].

Для выявления влияния развиваемого давления на диагностические параметры шестеренного и винтового насосов были проведены измерения на лабораторном стенде, позволяющем имитировать различные условия работы насосов путем регулировки давления в системе и изменения температуры перекачиваемой среды. Схема стенда приведена на рис. 2, внешний вид – на рис. 3.

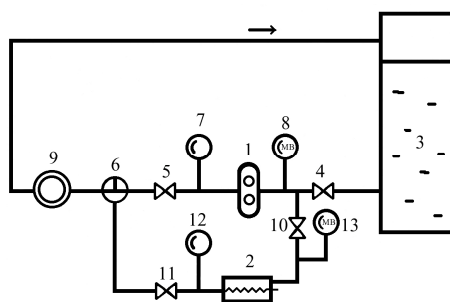


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: 1 – насос шестеренный; 2 – насос винтовой; 3 – бак расходный;
4, 5, 10, 11 – запорные клапаны; 6 – клапан трехходовой; 7, 12 – манометр;
8, 13 – мановакуумметр; 9 – расходомер

Fig. 2. The scheme of the laboratory stand: 1 – the pump gear; 2 – the pumps' screw; 3 – the waste tank;
4, 5, 10, 11 – the check valves; 6 – the three-way valve; 7, 12 – the manometer;
8, 13 – the pressure and vacuum gauge; 9 – the flowmeter

³ Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД № 2-020101-095 / Рос. мор. регистр судоходства. СПб. : Рос. мор. регистр судоходства, 2017. С. 49.

Стенд позволяет проводить испытания шестеренного и винтового насосов. При испытаниях давление в магистрали регулируется клапанами 5 или 11. Для предотвращения повреждения трубопроводов системы клапана имеют перепускные каналы. Краткие характеристики насосов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры насосов
Table 1. The parameters of pumps

Наименование параметра	ШФ5-25-36/4	А1 3В16/25-20/6,3Б
Число зубьев шестерен (заходов винта)	20	2
Подшипники двигателя:		
– левый	306	310
– правый	306	310
Подшипники насоса	скольжения	скольжения
Частота вращения, об/мин	1 430	2 740



Рис. 3. Лабораторный стенд для испытания роторных насосов
Fig. 3. The laboratory test bench for testing rotary pumps

Измерения проводились с использованием анализатора спектра ZET 017-U4 с последующей обработкой сигнала пакетом программ ZETLab.

Проведение измерений

Перед проведением измерений определялись частоты основных возбуждающих сил, характеризующих техническое состояние насоса и подшипников приводного электродвигателя. Частоты определялись по известным формулам (здесь не приводятся) [3; 5; 6]. Частоты вращения насосов равны частотам вращения электродвигателей. Полученные частоты сведены в табл. 2.

Таблица 2. Частоты основных возбуждающих сил
Table 2. The frequencies of the main excitatory forces

Частота вращения	Обозначение	Шестеренный насос ШФ5-25-36/4	Винтовой насос А1 3В16/25-20/6,3Б
		f_p	23,83
Двойная частота вращения (расцентровка)	$2f_p$	47,66	91,32
Зубцовая	f_z	476,66	91,33
Перекачивания шариков подшипника по наружному кольцу:			
– левый подшипник электродвигателя	$f_{НК}$	76,8	76,8
– правый подшипник электродвигателя	$f_{НК}$	76,8	76,8
Собственных колебаний втулок (заеданий)	–	>5 000	>5 000
Сетевая	$2f_{СТ}$	100	100

Измерения вибрации проводились на подшипниковых шитах насосов в трех направлениях (вертикальном, траверсном и продольном). Результаты оформлялись в виде третьоктавных спектров виброускорения, виброскорости, узкополосного спектра и огибающей высокочастотной компоненты сигнала вибрации (рис. 4–11).

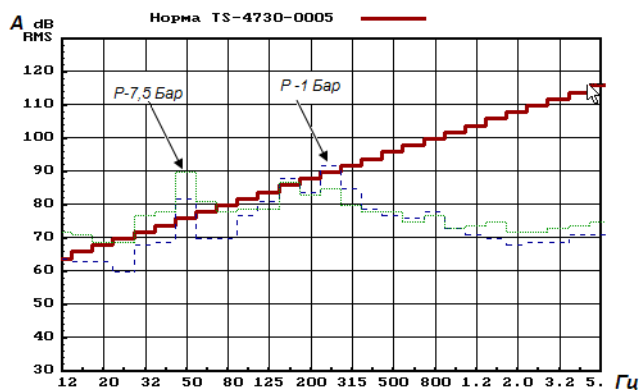


Рис. 4. Насос винтовой, спектр виброускорения до 5 кГц.
Сравнение режимов при давлении 1 и 7,5 бар
Fig. 4. The pump screw, the spectrum of vibration acceleration up to 5 kHz.
The comparison of modes at the pressure of 1 and 7.5 bar

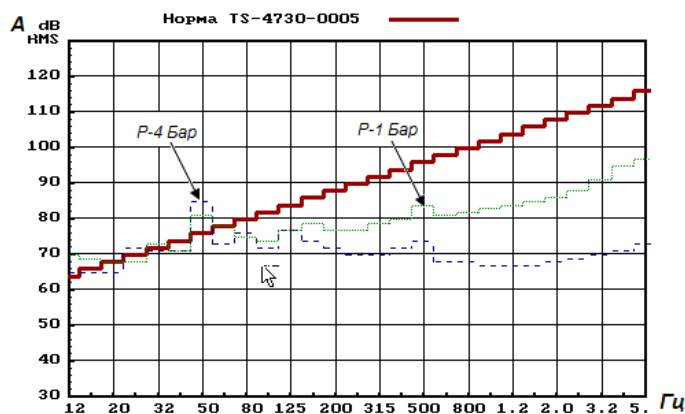


Рис. 5. Насос шестеренный, спектр виброускорения до 5 кГц.
Сравнение режимов при давлении 1 и 4 бар
Fig. 5. The pump gear, the spectrum of vibration acceleration up to 5 kHz.
The comparison of modes at the pressure of 1 and 4 bar

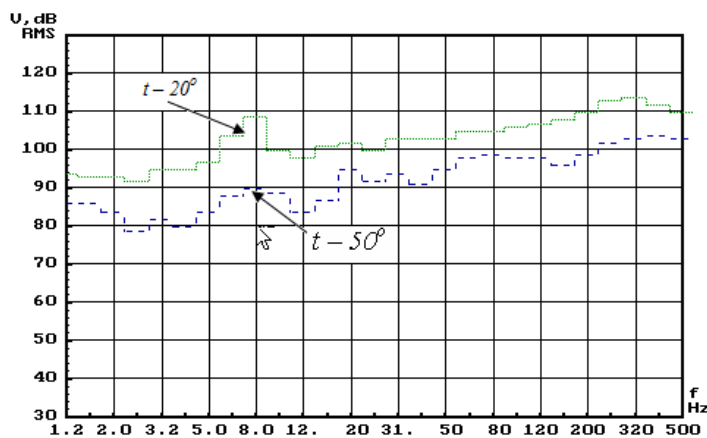


Рис. 6. Насос шестеренный, спектр виброскорости до 500 Гц.
Сравнение режимов при температуре 20 и 50 °С
Fig. 6. The pump gear, the vibration speed range up to 500 Hz.
The comparison of regimes at the temperature of 20 and 50 °С

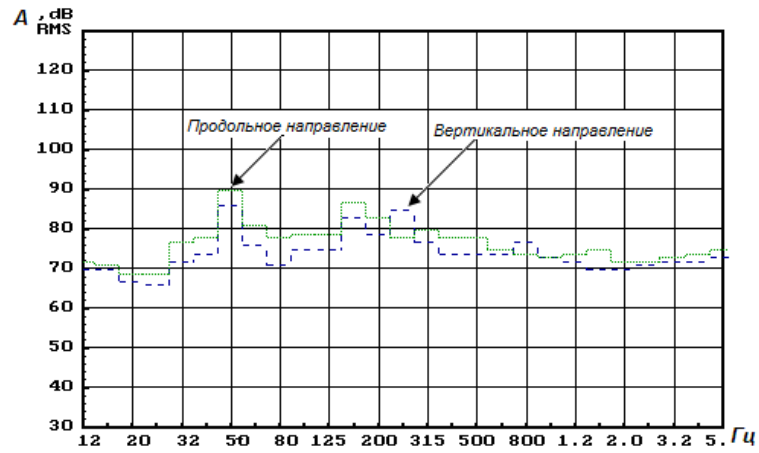


Рис. 7. Насос винтовой, спектр виброускорения до 5 кГц.
Вертикальное и продольное направления контроля
Fig. 7. The pump screw, the spectrum of vibration acceleration up to 5 kHz.
The vertical and longitudinal directions of control

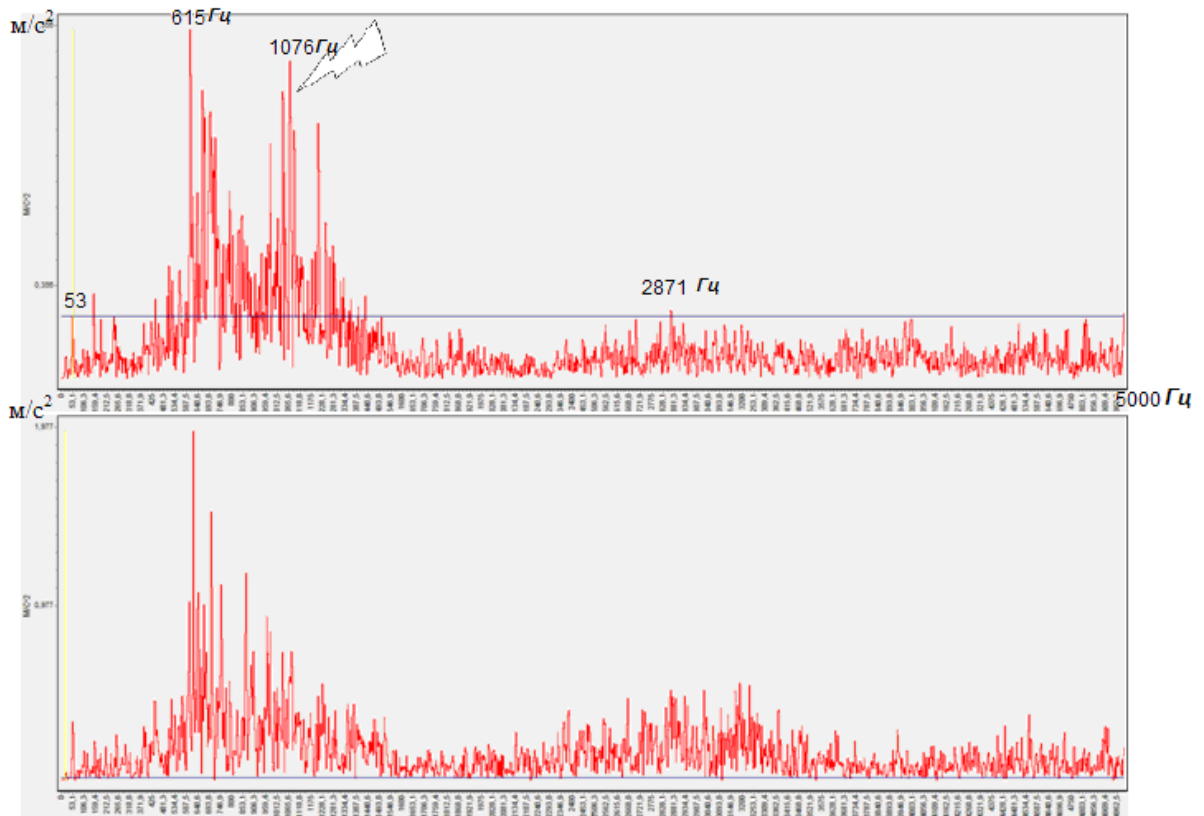


Рис. 8. Спектр виброускорения сигнала при температурах:
20 °С – верхний спектр; 50 °С – нижний спектр
Fig. 8. The spectrum of the vibration acceleration of the signal at temperatures:
20 °С – the upper spectrum; 50 °С – the lower spectrum

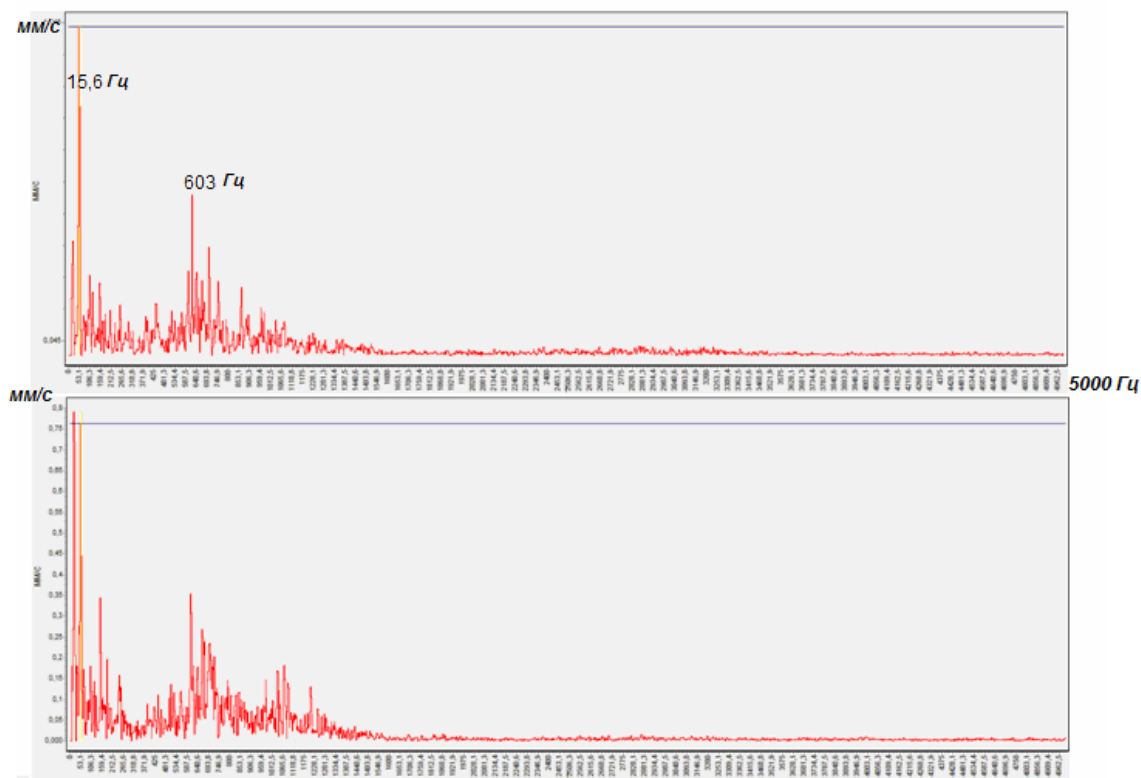


Рис. 9. Спектр виброскорости сигнала при температурах:
 50 °С – верхний спектр; 20 °С – нижний спектр
 Fig. 9. The spectrum of the vibration velocity of the signal at temperatures:
 50 °С – the upper spectrum; 20 °С – the lower spectrum

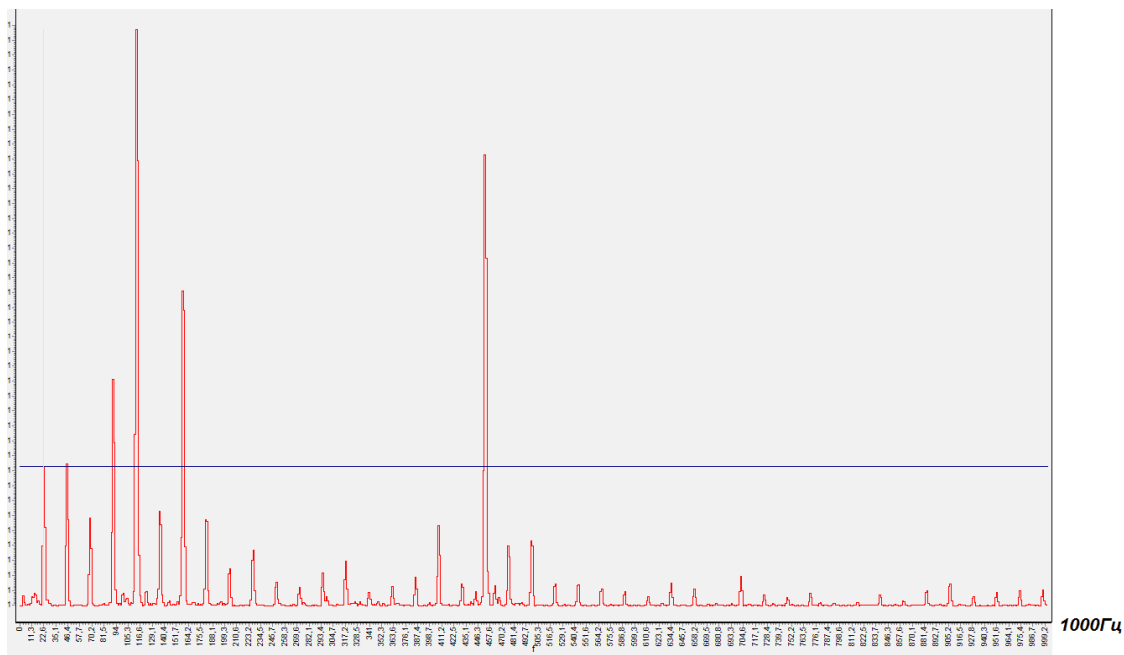


Рис. 10. Спектр виброскорости сигнала при температуре 50 °С
 Fig. 10. The spectrum of the vibration velocity of the signal at the temperature 50 °С

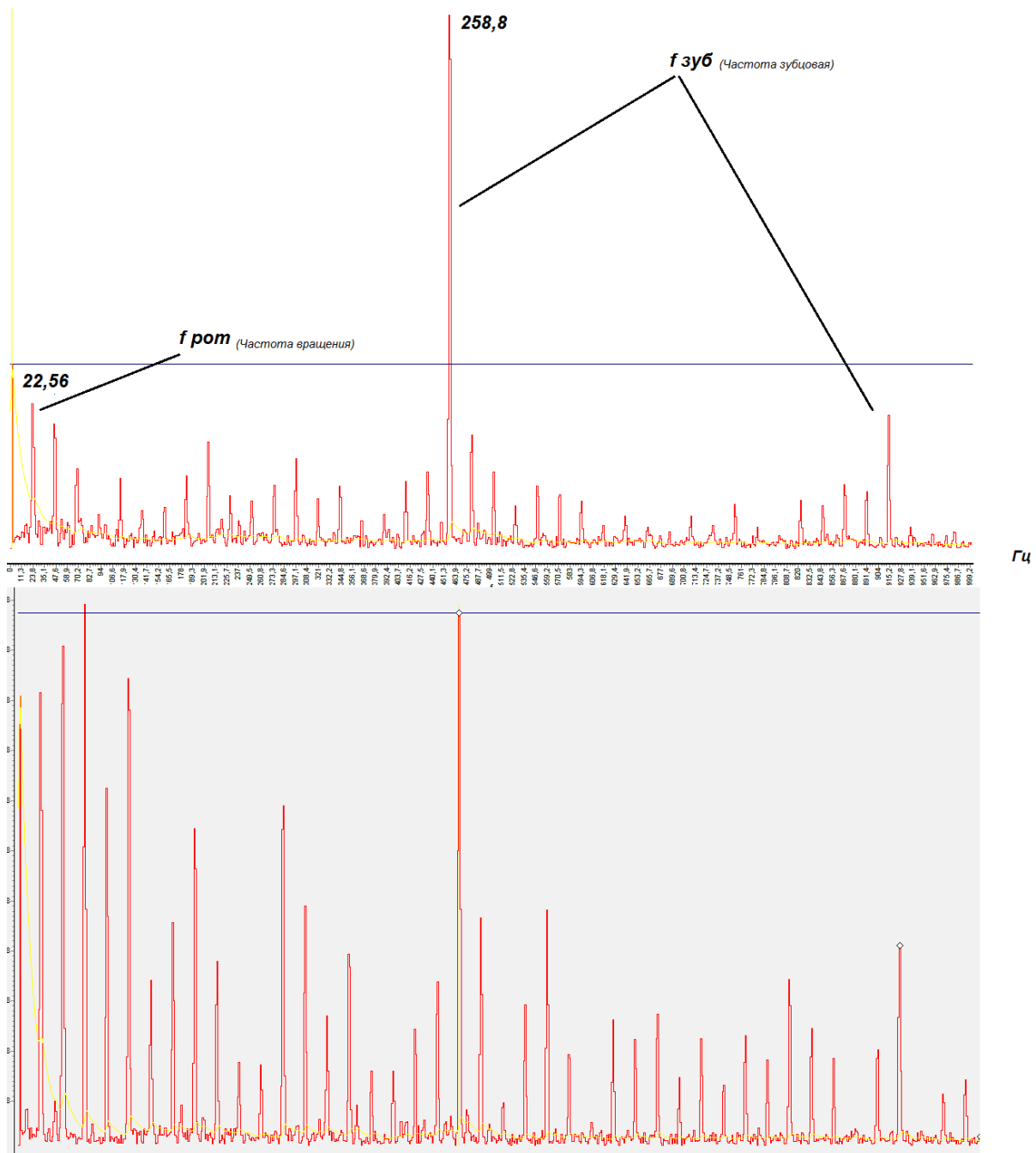


Рис. 11. Спектр огибающей сигнала при температурах:
50 °С – верхний спектр; 20 °С – нижний спектр
Fig. 11. The spectrum of the signal envelope at temperatures:
50 °С – the upper spectrum; 20 °С – the lower spectrum

Результаты и обсуждение

1. Анализ полученных спектров (рис. 4, 5) показывает, что общий уровень вибрации насосов как винтовых, так и шестеренных существенно зависит от давления, развиваемого насосом, еще большее влияние оказывает температура перекачиваемой среды. Так, при повышении температуры от 20 до 50 °С уровень виброскорости шестеренного насоса вырос практически во всем диапазоне частот на 10 и более децибел (рис. 6).

2. Уровень вибрации винтового насоса значительно зависит от направления измерения (рис. 7), для шестеренного насоса влияние направления контроля на уровень вибрации значительно слабее.

3. Узкополосный спектр виброускорения имеет различия в амплитуде дискретных составляющих при измерении вибрации при разных температурах (рис. 9). Но эти различия находятся выше частот,

используемых в качестве диагностических признаков для определения износа шестерен, и ниже частот, возбуждаемых кавитацией.

4. Узкополосный спектр виброскорости насоса при различных температурах значительных отличий не имеет (рис. 10). Также незначительно отличаются друг от друга спектры огибающей высокочастотной компоненты сигналов (центральная частота третьоктавного фильтра – 8 кГц) (рис. 11).

5. Сравнение узкополосного спектра виброскорости и спектра огибающей (рис. 10, 11) показывает их одинаковую информативность: оба спектра содержат и роторные, и зубцовые гармоники, т. е. все диагностические признаки для определения вида дефекта. Аналогичный результат получается и для спектра винтового насоса.

Заключение

Норма вибрации насосов, приводимая в правилах РМРС⁴ при диагностике технического состояния шестеренных и винтовых насосов, может использоваться только с учетом влияния температуры и давления перекачиваемой среды. Применяемое нормирование не позволяет с необходимой точностью определить причину превышения вибрации насоса, так как оно построено для третьоктавного спектра и не обладает необходимой избирательностью. Применяемое нормирование не позволяет определить наличие кавитации, которая может приводить к разрушению рабочих органов насоса. Частоты, генерируемые при кавитации, находятся значительно выше нормируемого диапазона.

При диагностике технического состояния насоса может использоваться узкополосный спектр виброскорости, так как на частотный состав вибросигнала давление и температура перекачиваемой среды не оказывают существенного влияния. При этом за диагностические параметры принимаются характерные частоты (роторные, зубцовые), их модуляция, высшие и субгармоники. Большее значение для определения дефекта имеет присутствие высших гармоник, наличие и вид модуляции, чем амплитуда отдельных дискретных составляющих, которая зависит от температуры перекачиваемой среды.

При диагностике технического состояния насоса может использоваться сигнал виброускорения в диапазоне частот до 10 кГц. Виброускорение в указанном диапазоне позволяет использовать для диагностики огибающую высокочастотной компоненты сигнала, кроме того, по сигналу виброускорения возможно определить наличие кавитации в насосе. На первичном этапе диагностики возможно использование третьоктавного спектра виброускорения в диапазоне до 5 кГц с последующим уточнением по спектру огибающей или узкополосному спектру виброскорости. Огибающая также применяется и для диагностики подшипников качения насоса и электродвигателя.

Библиографический список

1. Жуков А. С., Сергеев К. О. Проблемы перевода редукторов дизель-редукторных агрегатов на ремонт по состоянию // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 4 (7). С. 45–50.
2. Равин А. А., Хруцкий О. В. Прогнозирование технического состояния оборудования объектов морской техники и морской инфраструктуры // Региональная информатика : материалы XIV Санкт-Петербургской междунар. конф., Санкт-Петербург, 29 октября 2014 г. СПб., 2014. С. 465–466.
3. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб. : Севзапучцентр, 2013. 158 с.
4. Hasanli Sh. M., Mehdizadeh R. N., Huseynov E. K. [et al.]. Vibro-acoustic diagnostics of rotary type machines and mechanisms // Second international conference on technical and physical problems in power engineering. Iran, University of Tabriz, 6–8 September. Tabriz, 2004. P. 509.
5. Голуб Е. С., Мадорский Е. З., Розенберг Г. Ш. Диагностирование судовых технических средств. М. : Транспорт, 1993. 150 с.
6. Bently D. E., Zimmer S., Palatier G. E. [et al.]. Interpreting vibration information from rotating machinery // Noise and vibration control worldwide. 1986. June–July. P. 202–209.

References

1. Zhukov A. S., Sergeev K. O. Problemy perevoda reduktorov dizel-reduktornyh agregatov na remont po sostoyaniyu [The problems of transferring reducers of diesel-reducer units for repair according to their state] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2012. N 4 (7). P. 45–50.
2. Ravin A. A., Hrutskiy O. V. Prognozirovanie tehniceskogo sostoyaniya oborudovaniya ob'ektov morskoy tehniki i morskoy infrastruktury [Forecasting the technical condition of equipment of marine objects']

⁴ Приложения к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009 / Рос. мор. регистр судоходства. СПб. : Рос. мор. регистр судоходства, 2017. 292 с.

technics and marine infrastructure] // Regionalnaya informatika : materialy XIV Sankt-Peterburgskoy mezhdunar. konf., Sankt-Peterburg, 29 oktyabrya 2014 g. SPb., 2014. P. 465–466.

3. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii [Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration]. SPb. : Sevzapuchtsentr, 2013. 158 p.

4. Hasanli Sh. M., Mehdizadeh R. N., Huseynov E. K. [et al.]. Vibro-acoustic diagnostics of rotary type machines and mechanisms // Second international conference on technical and physical problems in power engineering. Iran, University of Tabriz, 6–8 September. Tabriz, 2004. P. 509.

5. Golub E. S., Madorskiy E. Z., Rozenberg G. Sh. Diagnostirovanie sudovykh tehnikeskikh sredstv [Diagnostics of ship technical means]. M. : Transport, 1993. 150 p.

6. Bently D. E., Zimmer S., Palatier G. E. [et al.]. Interpreting vibration information from rotating machinery // Noise and vibration control worldwide. 1986. June–July. P. 202–209.

Сведения об авторах

Сергеев Константин Олегович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: kepstr@rambler.ru

Sergeev K. O. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: kepstr@rambler.ru

Панкратов Андрей Адольфович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: pankratovaa@mstu.edu.ru

Pankratov A. A. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: pankratovaa@mstu.edu.ru

K. O. Sergeev, A. A. Pankratov

Features of rotary pump diagnostics without dismantling

In ship power plants, rotor pumps have become very popular providing the transfer of various viscous fluids: fuels, oils, etc. Like all ship's mechanisms, pumps need proper maintenance and monitoring of technical condition. The most expedient is maintenance and repair carried out according to the results of dismantling diagnosis. The methods of vibrodiagnostics are mostly widespread for the diagnosis of pumps. Vibrodiagnosis of rotary pumps has a number of features due to the nature and condition of pumped fluids. The norms of the Russian Maritime Register of Shipping are used for setting standards of vibration and diagnostics of the rotary pumps' technical condition. To clarify the features of vibration diagnostics of rotary pumps some measurements have been made on a special bench that simulates various modes of ship's pumps' operation: different pressure in the system and temperature of the pumped medium. As a result of measurements one-third octave and narrow-band vibration spectra of pumps have been obtained at various developed pressures and temperatures of the pumped fluid. The performed analysis has shown that the RMRS norms for diagnostics of ship rotary pumps have insufficient informative value inasmuch they do not take into account the dependence of the vibrational signal spectrum on the developed pressure and temperature of the pumped fluid. The nature of the received signals shows that the levels of a third-octave spectrum of the vibration velocity depend significantly on the temperature of the pumped fluids, this fact must be taken into account when applying the RMRS norms. The fluid temperature has a great influence on the nature of the narrow-band vibration acceleration spectrum in the area of medium frequencies, less influence – on the nature of the vibration velocity spectrum. The conclusions have been drawn about the advisability of using the narrow-band vibration spectra and the envelope spectra of the high-frequency component of the vibration signal to diagnose the technical condition of rotor pumps, it should be based not on the absolute values of the vibration level, but on the presence of characteristic frequencies and their modulations generated by various defects.

Key words: diagnostic parameter, diagnostics without dismantling, ship pumps, envelope, vibration norms.