

НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

ООО «КБ Инжиниринг»,
Морская государственная
академия им. адмирала
Ф.Ф. Ушакова

76

А.В. Брежнев, И.Н. Николаев, А.В. Оводовский. **Вариационная задача распределения оценок виброскорости при контроле технического состояния винторулевых колонок морских и речных судов**

78

Н.И. Николаев, А.В. Брежнев, И.Н. Николаев, М.В. Гриценко. **Контроль вибрации винторулевых колонок речных и морских судов**

Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

81

С. Кищенко. **Анализ точности и стабильности обсервованных координат при эксплуатации судового приемоиндикатора (СПИ) спутниковой радионавигационной системы (СРНС)**

Волжская государственная академия водного транспорта (ВГАВТ)

83

В.Н. Костров, А.В. Федюшин. **Обеспечение экономичес-**



кой безопасности внутреннего водного транспорта в процессе международной транспортной интеграции

85

М.В. Молчанова. **Габариты судового хода на криволинейных участках**

Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ)

87

М.К. Романченко, А.М. Романченко, Д.А. Киселев. **Виброизоляция источника вибрации**

УЧРЕЖДЕНИЯ: ООО «КБ Инжиниринг», Морская государственная академия им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

ТЕМА: Вариационная задача распределения оценок виброскорости при контроле технического состояния винторулевых колонок морских и речных судов

АВТОРЫ: А.В. БРЕЖНЕВ, И.Н. НИКОЛАЕВ, А.В. ОВОДОВСКИЙ

АННОТАЦИЯ: В статье предложен и описан метод оценки анализа интегральных характеристик вибрационного сигнала

Технический контроль винторулевых колонок (ВРК) морских и речных судов [1], организованный путем анализа интегральных характеристик вибрационного сигнала, является наиболее информационным и доступным методом исследования технического состояния [2-5]. Стремление судовладельцев к снижению расходов на непредвиденные аварийные ремонты судовых технических средств (СТС) и к сокращению затрат на выполнение текущих работ вызывает огромный интерес и необходимость в эффективном использовании технологии вибрационного анализа к переходу обслуживания СТС по состоянию.

Спектральные методы обработки вибрационных сигналов составляют основу интегральных оценок параметров сигнала.

На основании теоремы Парсеваля для двух функций $g(t)$ и $h(t)$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot h(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) \cdot H(f) df, \quad (1)$$

где $g(t)$ и $h(t)$ временные функции сигналов, $G(f)$ и $H(f)$ их Фурье-преобразования.

При $g(t) = h(t)$ имеет место теорема для энергии:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 df. \quad (2)$$

Оценка большинства реальных сигналов, полученных в результате измерений параметров, проводимых на СТС, например для ВРК, основана на вычислении среднеквадратического значения (СКЗ) и определяет общую энергию сигнала в обусловленной точке замера (рис. 1). Различного рода изменения формы сигнала, трансформация во времени учитываются как раз этим параметром.

Для оценок, полученных посредством измерений вибрационного сигнала на ВРК «Aquamaster» («Rolls-Royce») US205, установленных на морских буксирах применим Фурье-преобразование. В результате быстрого преобразования Фурье (БПФ) получим оценку вида (2) путем суммирования спектральных составляющих в полосе анализа (октава). Вопрос достаточности статистики измерений решается алгоритмом БПФ, обрабатывающим массив данных в 4096 отсчетов сигнала, при принятии гипотезы о нормальном распределении процесса.

Полученные при нормальной эксплуатации буксиров результаты оценки уровней вибрации ВРК типа US205 при изменении частоты вращения двигателя (960, 1200, 1500 об/мин) можно на основании (2) оценить как эквивалентную энергию вибрации в определенной полосе частот.

ВРК являются элементами сложной статически неопределенной системы, что осложняет процесс установления

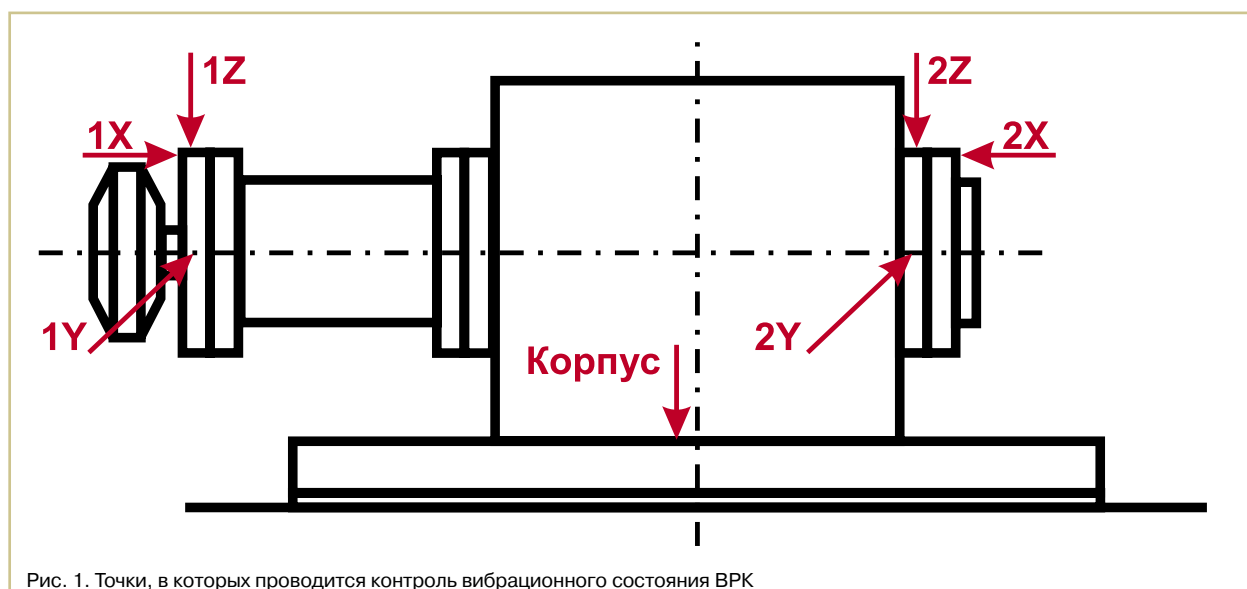


Рис. 1. Точки, в которых проводится контроль вибрационного состояния ВРК

главных напряжения в механических системах, в частности возникает необходимость анализа сигнала в трех ортогональных плоскостях x, y, z .

Поскольку фундамент БПК обусловлен определенными статическими и динамическими условиями в распределении вибрационного сигнала, целесообразно строить оценки на основании модуля сигнала:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\tilde{v}_x + \tilde{v}_y + \tilde{v}_z}, \quad (3)$$

где $\langle v \rangle$ – усредненная в статистическом смысле оценка виброскорости, $\tilde{v}_x, \tilde{v}_y, \tilde{v}_z$ – интегральные оценки (СКЗ) виброскорости в трех ортогональных плоскостях.

Вариационный ряд $\langle v \rangle$ (рис. 2) для четырех усредненных оценок (3) определения уровня вибрации БПК US 205 построен на нагрузках 960 и 1200 об/мин, при этом медиана распределения соответствует значению кривых в точке 2,5. Оценки построены по результатам измерений виброскорости на буксире с БПК US205 в течение 2 лет с периодичностью исследований шесть месяцев.

Полученные оценки мало отличаются от линейных. Организация технического контроля с анализом тренда распределений может быть организована в параметрическом виде:

$$K_B = \frac{\langle v_i \rangle}{\langle \tilde{v} \rangle}, \quad (4)$$

где $\langle v_i \rangle$ – оценка виброскорости вида (3), $\langle \tilde{v} \rangle$ – медиана распределения виброскорости.

Критерием оценки коэффициента K_B будет соответствие тренда распределения кривой Вейбулла.

Функцию регрессионной оценки запишем в виде:

$$W = \frac{\langle v_{i+1} \rangle}{\langle \tilde{v} + \tilde{v}_i \rangle}, \quad (5)$$

где $\langle v_{i+1} \rangle$ – оценка виброскорости в каждом следующем измерении; $\langle \tilde{v} + \tilde{v}_i \rangle$ – медиана вариационного ряда оценок,

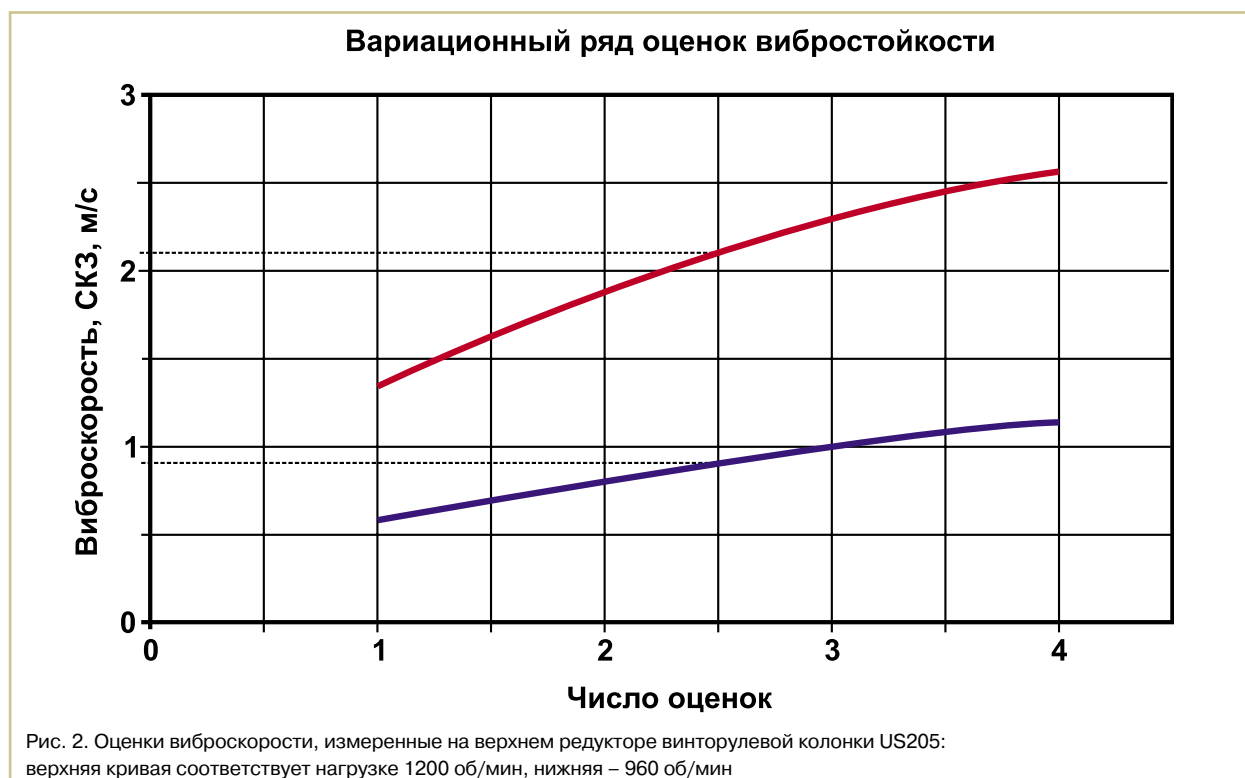
уточняемая при каждом следующем измерении. Линейное изменение виброскорости, связанное с износом в сопрягающихся деталях винторулевого комплекса, будет соответствовать изменениям эксплуатационных параметров по кривой Вейбулла. При этом уточнение медианы вариационного ряда будет соответствовать изменениям кривых оценок (рис. 2).

Нелинейные процессы как следствие аварийного режима работы являются критерием недопустимого режима эксплуатации.

Полученные результаты применимы в алгоритмах технического контроля состояния агрегатов по данным вибрационного контроля. Предложенный и описанный метод оценки анализа интегральных характеристик вибрационного сигнала (4-5) важен в организации регрессионного анализа изменения технического состояния БПК во время эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Николаев Н.И., Брежнев А.В., Гриценко М.В. Винторулевые колонки современных морских буксиров. Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта. Материалы четвертой региональной научно-технической конференции. Новороссийск: Морская государственная академия имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2005.-С. 172-174.
2. Толстов А.Г. Учебное пособие по курсу «Техническая диагностика. Основы статистического нормирования интенсивности вибрации». – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2003.
3. ISO 10816:1998(E). Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
4. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. Сирил М. Харрис, Чарльз И. Крид. Справочник по ударным нагрузкам /Сокращенный перевод с английского Н. А. Пэдура/ – Л.: Судостроение. 1980.



УЧРЕЖДЕНИЯ: ООО «КБ Инжиниринг», Морская государственная академия им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

ТЕМА: Контроль вибрации винторулевых колонок речных и морских судов

АВТОРЫ: Н.И. НИКОЛАЕВ, кандидат технических наук, профессор; А.В. БРЕЖНЕВ, аспирант; И.Н. НИКОЛАЕВ, аспирант; М.В. ГРИЦЕНКО, инженер

АННОТАЦИЯ: В статье предложены методики, позволяющие выявить неисправность на ранних стадиях зарождения дефектов

В настоящее время на современных буксирных и транспортных судах находят широкое применение винторулевые колонки (ВРК). Лидерами в производстве и основными поставщиками ВРК на рынок судостроения являются фирмы «Aquamaster»/«Rolls Royce», «Schottel»/«Siemens» (рис. 1).

Нормативно-правовые и технические требования российских и международных классификационных обществ (КО) (Российские Морской Регистр и Речной Регистр, DET NORSKE VERITAS, LLOYD и др.) дают возможность проводить освидетельствование с использованием безразборных методов диагностики судовых технических средств (СТС), таких, как насосы, вентиляторы, газотурбоагрегаты главных и вспомогательных дизелей, центробежные сепараторы и т. д.

Результаты контроля технического состояния СТС, сведения о выполненных работах при проведении технического обслуживания, а также информация об отказах и заменах деталей в период между освидетельствованиями заносятся в базу данных и предоставляются в КО при проведении освидетельствования. Такой подход дает судо-

владельцам возможность ввести на судне систему технического обслуживания СТС по состоянию, что позволяет: увеличить период между разборками СТС для предъявления к освидетельствованию; сократить продолжительность ремонта и увеличить эксплуатационный период; снизить трудозатраты на все виды ремонтов и технического обслуживания; снизить расходы на приобретение сменно-запасных частей (СЗЧ).

Для проведения контроля технического состояния СТС и повышения эффективности их технической эксплуатации на основе требований КО авторами разработаны методики и рекомендации по проведению безразборных контролей. Впервые разработаны методики по проведению контроля и оценки технического состояния ВРК, которые включают в себя:

- **визуальный контроль**, который заключается в регулярном осмотре систем и элементов ВРК в период эксплуатации. Во время планового докования судна производится наружный осмотр подводных элементов ВРК в объеме, предусмотренном инструкциями по эксплуатации и рекомендациями изготовителя;

- **параметрический контроль**, который предусматривает наблюдение за температурой смазочного масла в ВРК. На основании повехтенных записей каждые 3 месяца фиксируются средние значения температуры за период эксплуатации;

- **контроль качества масла**, который проводится не реже 2 раз в год согласно Сборнику инструкций по браковочным показателям всех видов смазочных и гидравлических масел, применяемых на судах морского флота в сертифицированной КО лаборатории;

- **вибрационный контроль**, который проводится анализатором вибрации и результаты его обрабатываются на персональном компьютере по разработанной нами методике.

Наиболее эффективным и информативным видом оценки технического состояния является вибрационный контроль. Он дает возможность зафиксировать начальное техническое состояние СТС и его изменение в процессе эксплуатации, а также обнаружить дефекты подвижных (вращающихся) элементов на этапе их зарождения и проследить за их развитием. На этой основе (при условии их регулярного

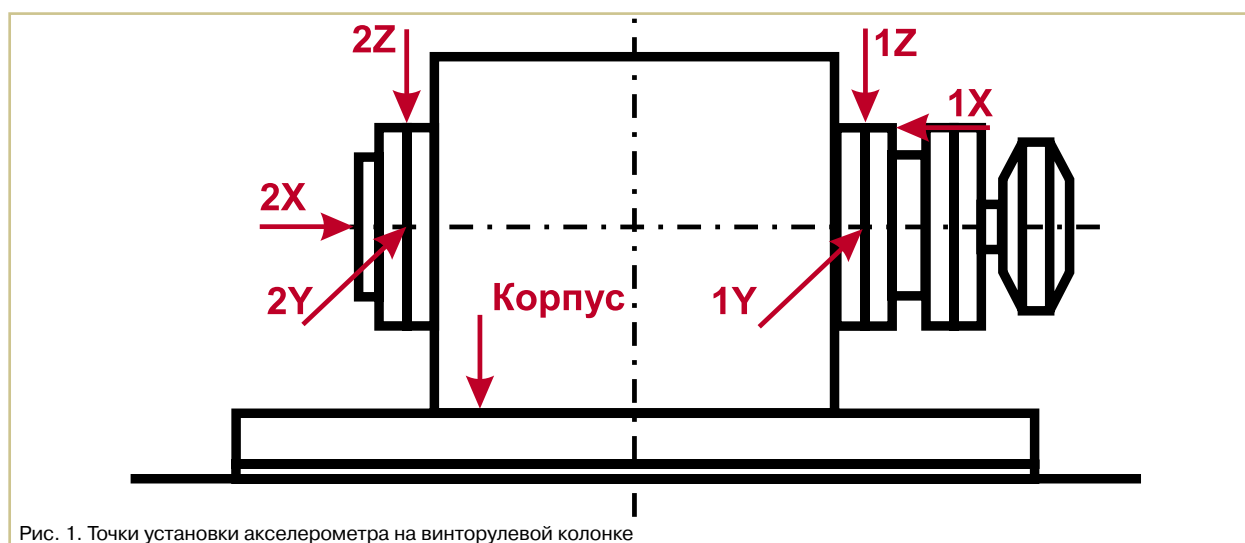


Рис. 1. Точки установки акселерометра на винторулевой колонке

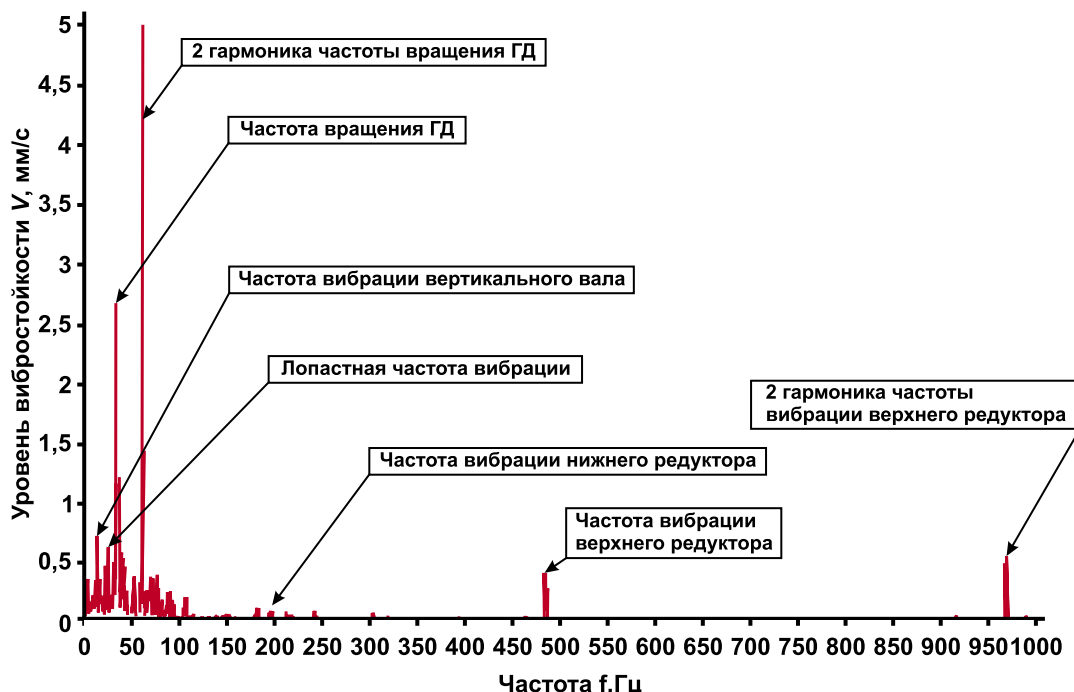


Рис. 2. Спектр вибрации BPK SRP1010C «Schottel» в точке 1X буксирного судна, $n_{ГД} = 1800$ об/мин

проведения) возможна оценка технического состояния оборудования и прогнозирование состояния на определенный период эксплуатации. Основные достоинства метода контроля по вибрационным параметрам: высокая оперативность получения результатов измерений; возможность определения места возникновения дефекта на этапе его зарождения, наблюдение за развитием дефекта и предотвращение аварийного выхода СТС из строя; назначение режимов эксплуатации СТС с целью оптимизации технической эксплуатации и составление прогноза по изменению технического состояния на

определенный период, что позволяет своевременно и качественно подготовиться к проведению ремонтных работ.

Методики контроля и оценки технического состояния ВРК, согласованные и одобренные КО, включают в себя:

а) Проведение вибрационных измерений на ВРК и подшипниках валопровода на 3 режимах работы главного двигателя в соответствующих точках (рис. 1).

б) Анализ результатов измерений включает в себя оценки:

– технического состояния ВРК по среднеквадратичным значениям (СКЗ)

уровней вибрации в диапазоне частот 10–1000 Гц;

– состояния подшипников валопровода по среднеквадратичным значениям (СКЗ) уровней вибрации в диапазоне частот 10–1000 Гц;

– технического состояния элементов ВРК на характерных частотах в 1/3-октавном диапазоне частот, которые рассчитываются на основании анализа кинематической схемы ВРК (табл.).

в) Оценку результатов проведенного анализа и выдачу заключения.

Предложенная схема вибрационного контроля позволяет определить общее техническое состояние ВРК и подшипников валопровода и дать заключение об их техническом состоянии. Контроль технического состояния элементов ВРК дает возможность выявить причины возникновения повышенной вибрации и предложить меры по ее устранению.

В качестве примера на рис. 2 приведен узкополосный спектр вибрации ВРК типа SRP1010C «Schottel» буксира в продольном направлении (точка 1X) и показаны характерные частоты вибрации элементов ВРК.

По методикам в течение ряда лет проводятся вибрационные измерения на буксирах и транспортных судах. Так, например, при проведении регулярных измерений на одном из буксирных судов с ВРК типа SRP300/226 «Schottel» был отмечен рост СКЗ

Основные характерные частоты вибрации узлов ВРК

Основная частота вибрации ведущего вала	$f_o = \frac{n_d}{60}$
Частота вибрации промежуточного вала	$f_{np} = \frac{n_b}{60 \cdot i_b}$
Частота вибрации верхнего редуктора	$f_{вр} = f_o \cdot z_1$
Частота вибрации нижнего редуктора	$f_{нр} = f_{np} \cdot z_3$
Частота вибрации вала винта	$f_{вв} = \frac{n_b}{60 \cdot i_n \cdot i_n}$
Лопастная частота вибрации	$f_l = f_{вв} \cdot z_l$
Где: n_d – частота вращения двигателя, об/мин; i_b – передаточное отношение верхнего редуктора; i_n – передаточное отношение нижнего редуктора; z_l – число лопастей винта; z_1 – число зубьев шестерни верхнего редуктора; z_2 – число зубьев шестерни нижнего редуктора	

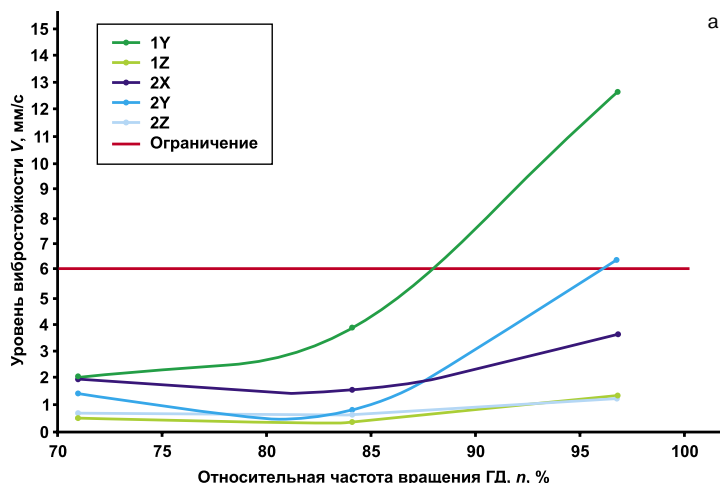
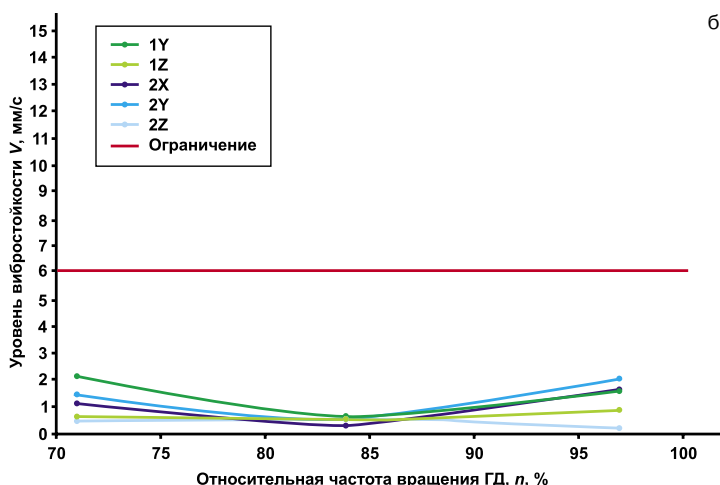


Рис. 3. Уровни вибрации ВРК типа SRP300/226 «Schottel» правого (а) и левого (б) бортов на характерной частоте вращения верхнего редуктора

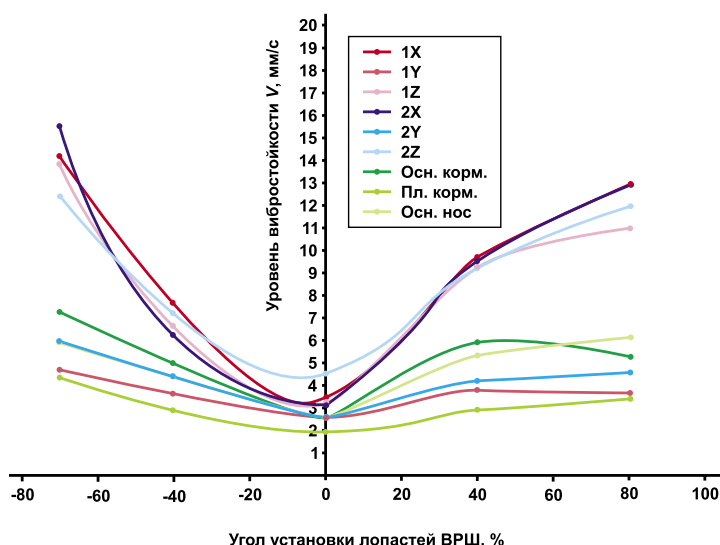


Рис. 4. Буксир «Рюрик». Изменение СКЗ уровней вибрации ВРК ПБ при изменении шага ВРШ на частоте вращения ГД $n = 740$ об/мин

уровней вибрации на колонке правого борта.

Анализ в 1/3 октавных полосах частот на характерных режимах работы показал, что причиной повышенной вибрации служит верхний редуктор. Осмотр зубчатого зацепления через технологические лючки показал, что на ведомом колесе имеется износ и скол на одном из зубьев. Однако было отмечено, что вибрация на режиме работы ГД выше 85% (рис. 3 а, б), превышает допустимую по ГОСТ ИСО 10816-1 – 96 «Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях» для машин 2 группы. По нашей рекомендации, согласованной с КО, судовладелец ограничил режимы работы ГД до 85%. Это позволило отодвинуть сроки вывода судна из эксплуатации на 6 месяцев, в течение которых был проведен комплекс подготовительных работ, закуплены необходимые для ремонта запасные части и подготовлена судоремонтная база.

Проводимые на буксирном судне с ВРК SRP2020CP фирмы «Schottel» и мощностью главного двигателя $N_e = 2000$ кВт измерения вибрации выявили повышенные уровни вибрации. На ВРК этого типа установлены в качестве движителя ВРШ. Методика проведения испытаний предполагала измерение вибрации ВРК при изменении шага винта от полного переднего до полного заднего хода на трех режимах работы ГД – 680, 720, и 740 об/мин. В качестве примера на рисунке 4 приведены результаты испытаний для режима работы 740 об/мин.

Анализ результатов испытаний показал, что уровни вибрации ВРК зависят от его нагрузки и находятся на приемлемом (согласно ГОСТ ИСО 10816-1 – 96) уровне при нагрузке ГД около 75-80%. Полученные результаты позволили рекомендовать судовладельцу режимы эксплуатации, не позволяющие превышать допустимые уровни вибрации. Работа при повышенных уровнях вибрации значительно сокращает ресурс подшипниковых узлов, приводит к ослаблению резьбовых соединений и т. д., что может вызвать внезапный выход из строя ВРК и привести к аварийной остановке судна.

Таким образом, контроль вибрации ВРК в эксплуатации по предложенным методикам позволяет на ранних стадиях зарождения дефектов выявить неисправность, оценить техническое состояние СТС и при введении системы ремонта по состоянию увеличить период освидетельствования до 10-12 лет.