

УДК 534.013:629.5.03+681.518.5
EDN: OJHBGV

М.Н. Покусаев, М.Ф. Руденко, М.М. Горбачев
Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СУДОВЫХ МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются системы мониторинга крутильных колебаний, предметом – анализ перспективности их применения в судовых машинно-двигательных комплексах для повышения безопасности мореплавания. Цель работы: дать научное обоснование преимуществ мониторинга крутильных колебаний по сравнению с периодическим торсиографированием.

Материалы и методы. В качестве материалов использованы научно-техническая литература и собственные авторские исследования. Методы применялись следующие: анализ, синтез, методы классификации и сравнения, индукция, расчетный метод.

Основные результаты. Определены и обоснованы основные технические и экономические преимущества систем мониторинга крутильных колебаний, также указаны их основные недостатки.

Заключение. Мониторинг позволяет получить большой объем данных по крутильным колебаниям и температурам материалов упругих муфт в широком диапазоне режимов работы судовых машинно-двигательных комплексов. При использовании мониторинга снизятся риски возникновения аварий на судах при развитии опасных колебаний. Отдельно возникает возможность безразборной оценки технического состояния демпфера крутильных колебаний и назначения его остаточного ресурса в режиме реального времени, т.е. фактически для него можно реализовать актуальную технологию «цифровой двойник». Мониторинг крутильных колебаний имеет перспективы и для применения в безэкипажных судах для повышения надежности работы их машинно-двигательных комплексов.

Ключевые слова: торсиографирование, тензометрирование, крутильные колебания, судовые машинно-двигательные комплексы, система мониторинга крутильных колебаний.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 534.013:629.5.03+681.518.5
EDN: OJHBGV

M.N. Pokusaev, M.F. Rudenko, M.M. Gorbachev
Astrakhan State Technical University, city of Astrakhan, Russia

TORSION MONITORING KITS FOR MARINE PROPULSION EQUIPMENT: APPLICATION PROSPECTS

Object and purpose of research. This paper discusses torsion monitoring kits to estimate their application prospects for marine propulsion system so as to improve navigation safety. The purpose of this study was to demonstrate the advantages of continuous torsion monitoring as compared to periodical torsionography.

Materials and methods. The study relies on available literature, as well as on the authors' own findings. Research methods are analysis, synthesis, classification and comparison, as well as induction and calculation.

Main results. The authors managed to identify and demonstrate the main technical and economic advantages of torsion monitoring systems, as well as to find their key drawbacks.

Для цитирования: Покусаев М.Н., Руденко М.Ф., Горбачев М.М. Перспективность применения систем мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 130–140.

For citations: Pokusaev M.N., Rudenko M.F., Gorbachev M.M. Torsion monitoring kits for marine propulsion equipment: application prospects. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 130–140 (in Russian).

Conclusion. Monitoring yields a wide scope of data on torsional vibrations and material temperatures of elastic couplings in a wide range of operational scenarios for marine engines and propulsion systems. These data will reduce the risk of dangerous vibrations escalating to an emergency. Also, it will become possible to estimate the technical condition of torsion damper without dismantling it, as well as to determine its residual service life in real time, i.e. to create its “digital twin”, thus implementing one of the most promising latest technologies. Torsion monitoring will also be useful for unmanned vehicles, making their engines and propulsion systems more reliable.

Keywords: torsion monitoring, strain gauging, marine engines and propulsion systems, torsion monitoring.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Опасность возникновения усталостных разрушений элементов судовых машинно-двигательных комплексов (далее – МДК) от развития крутильных колебаний до сих пор остается актуальным риском для безопасности мореплавания.

Современные методы расчетов и измерений крутильных колебаний позволяют существенно снизить вероятность возникновения аварий, но не уменьшают их число до нуля. Это связано с рядом обстоятельств, в числе которых: периодичность регламентных измерений крутильных колебаний (торсиографирование и тензометрирование); риск отказов устройств для снижения крутильных колебаний – демпферов; опасные условия судоходства, которые повышают амплитуды крутильных колебаний (например, ледовые условия).

В связи с этим возникает необходимость расширения методов контроля крутильных колебаний, включая разработку систем их мониторинга. Применение подобных систем уже имеет место в некоторых агрегатах, например, в газовых и паровых турбинах. Однако для судовых дизелей в этой области известна только австрийская фирма Geislinger, и даже ее система имеет ограничения по применению. Вместе с тем в рамках разработки методологии создания подобных отечественных систем необходимо прежде всего дать научно-техническую и экономическую оценку их применения на водном транспорте, что и производится в данной статье.

Постановка задачи исследования

Formulation of task

Основной задачей, поставленной в настоящей работе, является научное обоснование перспективности применения систем мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК и преимущества мониторинга по сравнению с регламентными измерениями. Для решения указанной задачи авторы

использовали анализ научно-технической информации, находящейся в открытом доступе, а также результаты собственных исследований в испытательном центре МТС ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» («АГТУ») [1, 2].

Результаты исследования

Results

Благодаря проведенному анализу определены и доказаны следующие преимущества систем мониторинга крутильных колебаний.

Преимущество №1 – возможность записи и анализа большого объема данных.

В соответствии с правилами классификационных обществ, например, РМРС [3–6], периодическое торсиографирование судовых МДК производится в режиме постепенного набора частоты вращения коленчатого вала (далее – КВ) главного двигателя (далее – ГД) из состояния покоя до максимальной частоты вращения и последующим постепенным снижением до остановки. Дополнительно необходимо записывать отдельные торсиограммы (тензограммы) на резонансных режимах работы МДК.

При испытаниях на МДК с прямой передачей такая методика позволяет охватить практически весь диапазон частот вращения и нагрузок ГД. Однако, если проводить испытания на судах со сложными схемами МДК (с редуктором, винтом регулируемого шага, валогенератором, мультипликатором и приводом пожарного насоса и др.), охватить все режимы работы будет сложно. Это увеличивает риск пропуска опасных резонансных и околорезонансных режимов развития крутильных колебаний. Например, при тензометрировании МДК судов обеспечения типа «Светлый» (испытания производили специалисты ИЦ МТС «АГТУ» в 2019–2022 гг.) было записано до 20 файлов данных на отдельных режимах работы МДК – с пожарными насосами и без них, при разном положении лопастей гребного винта регулируемого шага и т.д.

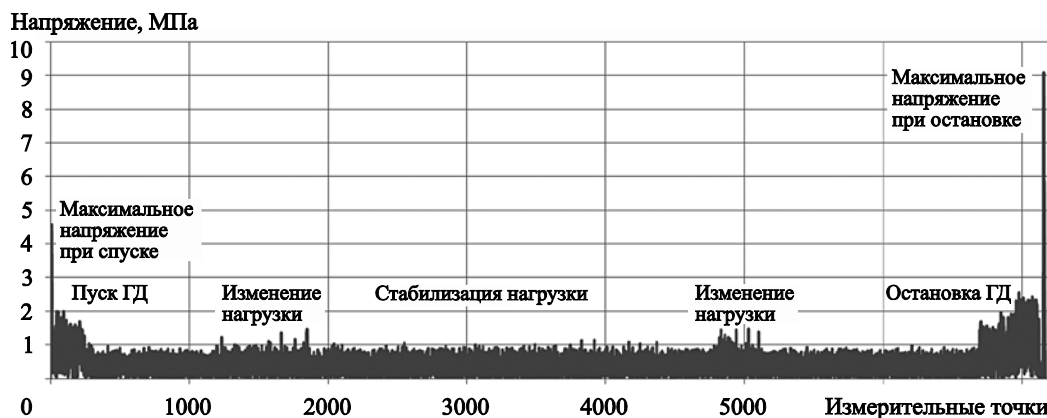


Рис. 1. Тензограмма по результатам мониторинга крутильных колебаний машинно-двигательного комплекса бункеровщика проекта Turcas

Fig. 1. Strain diagram as per torsion monitoring data for engine and propulsion system of Turcas bunkering vessel

Применение длительного мониторинга позволяет охватить специфические режимы работы МДК в более полном объеме. Кроме того, длительный мониторинг способствует накоплению большого объема данных не только для определения действующих напряжений в валах, но и для более точной оценки технического состояния демпфера крутильных колебаний и назначения его остаточного ресурса.

На рис. 1 представлена тензограмма, полученная авторами на морском бункеровщике проекта Turcas (с ГД MAN B&W 8L27/38) [7]. Тензограмма позволяет оценить напряжения не только на наиболее часто используемых режимах работы МДК, но и при пуске, остановке ГД и при изменении положения лопастей гребного винта регулируемого шага.

Как видно из рис. 1, максимальные напряжения были зафиксированы на режимах пуска и остановки ГД. Аналогичная ситуация с развитием высоких напряжений в элементах МДК при пуске и остановке ГД была отмечена при проведении измерений на морском буксире проекта Damen ASD Tug 3110 с ГД CAT3516B (рис. 2, см. вклейку), а также на пароме типа «Ро-Ро» проекта 161 с ГД 6VDS48/42AL-2.

Для рассматриваемых судов характерны достаточно высокие значения моментов инерции гребных винтов (по сравнению с моментом инерции одной секции коленчатого вала). Это обстоятельство, а также наличие редукторной передачи позволяют предположить их влияние на возникновение больших по величине скручивающих переменных тормозящих моментов при пуске и остановке МДК. Выявленные напряжения не превышают допусти-

мые для элементов МДК обоих судов, однако их величина позволяет говорить о достаточно высоких нагрузках. При наличии усталостных трещин такие динамические нагрузки могут привести к повреждениям и отказам элементов судовых МДК, что в принципе подтверждается рядом зафиксированных случаев разрушения гребных валов и потери винтов при реверсе или пуске ГД.

Кроме того, функцию крутильных колебаний на режимах быстрого изменения частоты вращения сложно достоверно анализировать при помощи традиционного преобразования Фурье. Это требует использования более совершенных методов, например – вейвлет-анализа, опыт применения которого описывается в работе С.П. Глушкова и С.С. Глушкова [8]. Из применяемых сегодня видов вейвлет-функций – Добеши, Гаусса, Хаара, Мейера, MHat («Мексиканская шляпа») и других – для анализа крутильных колебаний наиболее подходит вейвлет Морле (иногда называемый вейвлетом Морлета (Morlet)). Также можно выделить выявленное С.П. Глушковым и С.С. Глушковым в работе [9] влияние характера режима работы двигателя и динамики изменения частоты вращения на результаты измерений крутильных колебаний в судовых МДК. При постоянном мониторинге это влияние может учитываться более точно, чем при кратковременном торсионграфировании.

Преимущество № 2 – возможность проведения более длительных измерений, чем у существующих систем измерения крутильных колебаний.

Применение мониторинга существующими аппаратными программными комплексами может

быть затруднительно, поскольку существующие системы часто не имеют таких функций, как запись на цифровые носители и передача данных по Интернету, а те, которые имеют, осуществляют их при помощи отдельной ЭВМ.

Некоторые из измерительных систем имеют ограничение по объему регистрируемых данных, что не позволяет анализировать результаты длительных измерений из-за отказа программного обеспечения обрабатывать файлы объемом более 10 Мб. Этот факт можно получить при работе с тензометрическим комплексом Astech Electronics (Великобритания) [10] с ограничением операций при объеме данных более 1 млн шт. измерительных точек.

Преимущество № 3 – возможность измерения параметров, которые обладают инерционностью.

Применение системы мониторинга также эффективно при измерении температуры поверхности материала упругих муфт. Температуру рекомендуется контролировать согласно правилам РМРС, т.к. при возникновении крутильных колебаний материал упругих муфт нагревается из-за перехода энергии вибрации и колебаний в тепловую. Фирмы – производители муфт Vulkan, Stromag и др. отражают в своей документации необходимость проведения такого контроля и нормируют допустимые значения температуры [11, 12]. Однако рост температуры происходит не мгновенно, этот процесс инерционный и требует достаточного времени, которое может быть не достигнуто при проведении торсиографирования (тензометрирования) МДК.

В качестве примера приведем результаты измерений температуры поверхности подшипника валопровода. Он выбран в качестве объекта при отладке

работы экспериментального образца системы мониторинга и по причине отсутствия возможности контроля температуры поверхности упругой муфты. Мониторинг осуществлен при испытаниях экспериментального образца авторской системы мониторинга крутильных колебаний на морском бункеровщике проекта Turcas (рис. 3) [7].

Как видно из рис. 3, температура поверхности росла постепенно, со стабилизацией на уровне +33 °С после 110–115 мин. работы. Рост температуры поверхности упругих муфт может также происходить постепенно, а время достижения максимального значения температуры может быть разным на отдельных резонансных режимах. Например, при проведении тензометрирования МДК буксира проекта Р-103А температура поверхности упругой муфты ЭМ 580×130 поднялась всего на 5 °С, а после остановки и выдержки времени дополнительно 15 мин. температура повысилась уже на 10 °С.

Преимущество № 4 – экономическая выгода для судовладельца при установке системы мониторинга.

Одной из существенных финансовых потерь для судовладельца является ремонт и простой судна, в т.ч. по причине возникновения аварийной ситуации. Стоимость аренды судов зависит от их назначения: если для бункеровщика водоизмещением до 10 000 т она составляет 500 000 руб./сут., то для буксира может достигать 250 000 руб./сут. Поэтому при возникновении аварийной ситуации, связанной с развитием опасных крутильных колебаний, а тем более с учетом времени и затрат на ремонт судового МДК, денежные потери могут исчисляться миллионами рублей.

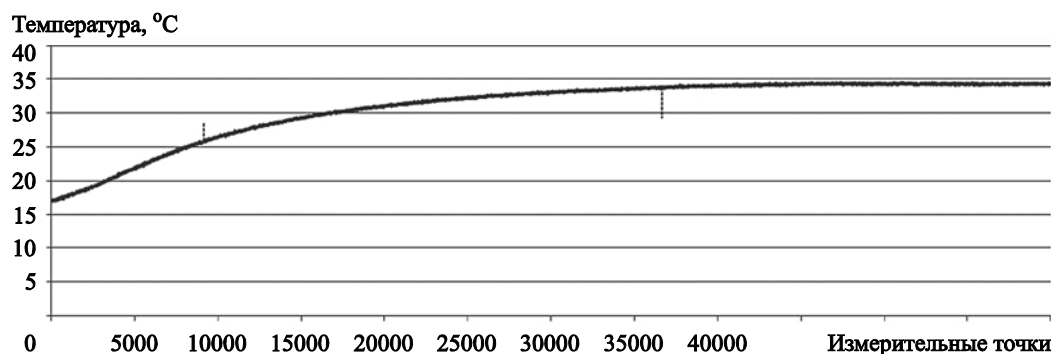


Рис. 3. Результаты мониторинга температуры поверхности подшипника валопровода бункеровщика проекта Turcas

Fig. 3. Thermal monitoring results for shaft bearing surface of Turcas bunkering vessel

При средней стоимости зарубежной системы мониторинга TVC компании Geislinger €9000 [13] и оценочной стоимости экспериментального образца отечественной системы мониторинга крутильных колебаний до 250 000 руб. экономическая выгода применения систем мониторинга даже для небольшого судна очевидна. Однако в процессе работы судна, при условии обеспечения качественной технической эксплуатации и соблюдения периодичности ремонта МДК, непредвиденный простой по вине развития крутильных колебаний может не произойти. Поэтому необходимо обосновать выгоду судовладельца путем замены периодического торсиографирования МДК установкой системы мониторинга.

В настоящее время измерение крутильных колебаний в России осуществляют такие организации как: ИЦ МТС ФГБОУ ВО «АГТУ» (г. Астрахань), РКБ «Стапель» (г. Ростов), ООО «Торсио» (г. Санкт-Петербург), «Астра-НН» (г. Нижний Новгород). Средняя стоимость торсиографирования (тензометрирования) одновальной установки и термометрирования материала упругой муфты находится в диапазоне от 40 000 до 60 000 руб. Жизненный цикл силиконового демпфера крутильных колебаний судового дизеля до его замены составляет до 90 000 час (по данным фирмы Geislinger), а гарантийный срок эксплуатации – до 30 000 час.

Таким образом, после гарантийной эксплуатации демпфера требуется проведение периодической процедуры оценки его технического состояния. Если ориентироваться на торсиографирование (тензометрирование), то его периодичность (по опыту работы ИЦ МТС «АГТУ») составляет от 10 000 до 15 000 часов. Продолжительность назначенного ресурса при увеличении наработки демпфера снижается, что приводит к необходимости проведения до 6 торсиографирований за его жизненный цикл. В денежном выражении затраты на торсиографирование составят от 240 000 до 360 000 руб., что сопоставимо с обозначенной ранее стоимостью системы мониторинга крутильных колебаний. При массовом производстве системы мониторинга крутильных колебаний ее стоимость может снизиться, что будет еще более выгодно для судовладельцев.

Экономическая заинтересованность судовладельцев в системах мониторинга крутильных колебаний подтверждается докладом Torsional vibration monitoring of large container vessel propulsion train («Контроль крутильных колебаний силовой установки крупнотоннажного контейнеровоза») авторов Г. Охорна (H. Ohorn), А. Таламмера (A. Thalhammer)

и Г. Мора (H. Mohr) компаний CPO Containerschiffreederei, Geislinger GmbH, GasKraft Engineering, сделанном на симпозиуме 2022 г. в г. Зальцбурге (Австрия) [14]. В докладе, в частности, сообщалось, что компания Geislinger разработала новую систему мониторинга крутильных колебаний и установила ее на контейнеровозе MSC La Spezia класса Super-Postpanmax.

По результатам испытаний компания-судовладелец CPO Containerschiffreederei решила внедрить эту систему на всех девяти судах своего флота класса «Италия». Необходимо отметить, что системы мониторинга серии GMS компании Geislinger устанавливаются в комплекте с демпферами этой фирмы на судах достаточно давно, в Сети (например, на интернет-аукционе ebay.com) есть данные о продажах бывших в употреблении блоков систем моделей D250/5, D250/7, датированных 2004–2007 гг.

Для экономической оценки эффективности применения систем мониторинга можно рекомендовать подход, предложенный в работе В.Н. Половинкина и В.В. Медведева [15]. Он направлен на особое внимание к оценке надежности элементов МДК, у которых последствия отказов имеют большое экономическое и техническое значение для всего судна, что можно отнести и к области нашего исследования.

Преимущество № 5 – повышение безопасности для судов, имеющих запретные зоны для длительной работы ГД.

У судов ряда проектов присутствуют назначенные с постройки запретные зоны для частот вращения коленчатого вала ГД из-за наличия высоких амплитуд крутильных колебаний. Следует указать, что это не только суда достаточно старых проектов, таких как 502ЭМ (запретная зона от 0 до 150 мин⁻¹), РМС типа «Каспий» (запретная зона от 170 до 210 мин⁻¹), сухогруз типа «Волга» проекта 19610, 19611 (запретная зона от 250 до 280 мин⁻¹), но и относительно новых проектов, например, судов обеспечения типа «Светлый» (запретная зона от 0 до 450 мин⁻¹ и от 550 до 650 мин⁻¹). Это связано со сложной конструктивной схемой МДК для судов обеспечения морских буровых платформ. Выявленный факт говорит о том, что даже для современных судовых МДК сохраняется риск работы ГД в запретных зонах, что при нарушении правил эксплуатации может вызвать рост амплитуд крутильных колебаний до опасных значений и возникновение аварии МДК.

Преимущество № 6 – наличие типовых судовых МДК с опасной тенденцией развития крутильных колебаний на отдельных режимах работы.

Авторы определили, что есть ряд судов распротраненных проектов, у которых величина напряжений от крутильных колебаний имеет высокие значения, но не превышает допустимые для назначения запретных зон. К ним, например, относятся буксиры типа «ОТ» проектов Н3290, Н3291, Н3180, Н4281, Н4282. Поясним вышесказанное при помощи графиков развития напряжений для элементов МДК судов, полученных по результатам тензометрирования специалистами ИЦ МТС «АГТУ» (рис. 4–5).

Типовая тензограмма, полученная при измерении крутильных колебаний для МДК буксиров типа «ОТ», приведена на рис. 6 (см. вклейку).

Как видно из данных рис. 4–6, буксиры типа «ОТ» имеют достаточно высокие напряжения в коленчатых валах в рабочем диапазоне частот

вращения ГД (от 120 до 390 мин⁻¹), что приводит к опасности их превышения выше допустимых значений в периоды между контрольными торсиографированиями.

Похожая ситуация относится и к сухогрузам типа «Волга», для которых характерно развитие опасных амплитуд крутильных колебаний 4-го порядка на резонансной частоте вращения ГД 250 мин⁻¹ (марка ГД – 8NVD5 48A-3U с номинальной мощностью 970 кВт и номинальной частотой вращения коленчатого вала 428 мин⁻¹). На данной частоте вращения напряжения в гребном валу могут быть близки к допускаемым величинам, согласно Правилам РМРС [3]. Характерная тензограмма для ГД (в режиме «пуск – набор максимальной частоты вращения коленчатого вала – снижение частоты вращения – остановка») судна типа «Волга» проектов 19610, 19611 приведена на рис. 7 (см. вклейку).

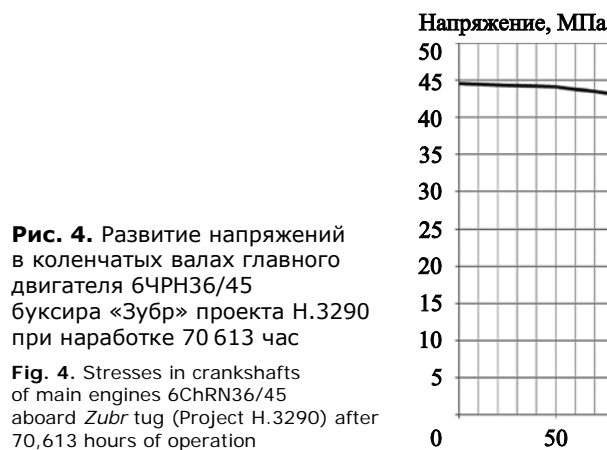


Рис. 4. Развитие напряжений в коленчатых валах главного двигателя 6ChRN36/45 буксира «Зубр» проекта Н.3290 при наработке 70 613 час

Fig. 4. Stresses in crankshafts of main engines 6ChRN36/45 aboard *Zubr* tug (Project N.3290) after 70,613 hours of operation

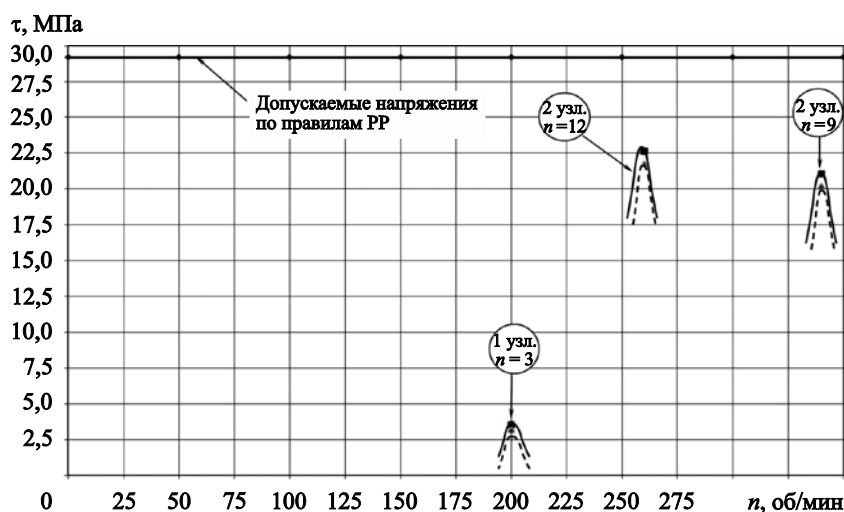


Рис. 5. Развитие напряжений в коленчатых валах главного двигателя 6ChRN36/45 буксира «ОТ-2126» проекта Н.4282 при наработке 61 570 час

Fig. 5. Stresses in crankshafts of main engines 6ChRN36/45 aboard OT-2126 tug (Project N.4282) after 61,570 hours of operation

Если говорить о зависимости величины напряжений от крутильных колебаний в элементах МДК от наработки на судах типа «Волга», буксирах типа «ОТ» и судах типа «Нефтерудовоз», то диаграммы, полученные авторами по результатам анализа экспериментальных данных, представлены на рис. 8–10 (см. вклейку).

Скорость развития напряжений в гребных валах в зависимости от наработки по результатам обследования десяти судов типа «Волга» (20 гребных валов) составила до 0,1965 МПа/тыс. час.

Как видно из данных на рис. 8–10, если считать показателем эффективности работы силиконового демпфера снижение напряжений до 85 % от допускаемых [3, 6], то при наработке свыше 50 000 час. напряжения в коленчатых валах ГД и гребных валах начинают превышать данную величину, что говорит о росте рисков возникновения опасных напряжений.

Полученные результаты говорят о перспективности использования систем мониторинга крутильных колебаний во избежание отказов элементов судовых МДК в периодах между торсиографированиями (тензометрированиями) судовых МДК. Необходимо также указать, что отказы могут быть постепенными и мгновенными, что при развитии второго варианта повышает риск возникновения аварий и потери хода и управляемости судов.

Преимущество № 7 – перспективность систем мониторинга для безэкипажных судов.

Развитие судовой автоматики постепенно перешло в стадию внедрения онлайн-систем мониторинга наиболее важных параметров СЭУ. Подобные системы позволят не только контролировать параметры судовой энергетической установки, но и автоматически управлять ею без участия судового механика. Внедрение подобных установок постепенно приведет к появлению безэкипажных судов различного назначения.

Эта идея уже давно не выглядит фантастической. Так, еще в 2019 г. РМРС пригласил на научно-технический совет в Санкт-Петербурге ведущих специалистов исследовательских центров и изготовителей судового оборудования для обсуждения вопросов, связанных с перспективами технологий безэкипажного судоходства [16]. Интерес к данной теме вызван тем, что в Международной морской организации (ИМО) начиная с 2018 г. ведется плановая работа по оценке международной нормативной базы (Regulatory Scoping

Exercise – RSE) на предмет применимости требований существующих конвенций и кодексов к морским автономным надводным судам (MASS («умные суда») / МАНС (интеллектуальные суда)) для обеспечения их безопасной эксплуатации на рынке морских перевозок.

Развитие интеллектуальных технологий и безэкипажных судов как перспективное направление для современного судостроения отмечают и во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (г. Санкт-Петербург). Итогом работы РМРС в данном направлении является выпуск документа «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)» [17].

В настоящее время в Научно-образовательном центре «Беспилотные технологии на водном транспорте» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (г. Санкт-Петербург) проведены разработки систем контроля мореходности судов, позволяющих удаленно оценивать и обеспечивать их управляемость и остойчивость в режиме реального времени, а также маневрирование, безопасное расхождение и дистанционное управление судами.

За рубежом подобные концепции разрабатываются в Германии, Великобритании и США. Немецкие специалисты разработали проект, который получил название Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN). Предлагается вывод судна из порта в море выводным экипажем, который потом покидает судно и возвращается в порт отправки. Затем судно под управлением бортового компьютера и оператора на суше проходит основной путь; далее у порта назначения судно снова управляется приемным экипажем до причала [18]. Американская компания Rolls-Royce («Роллс-Ройс») предложила концепцию безэкипажного контейнеровоза, общий вид которого представлен на рис. 11 [19].

Очевидно, что следует разделять автоматическую систему контроля мореходности судна и систему автоматического управления энергетической установкой, которые в итоге объединяются в автоматическую систему управления судном. Наряду с такими традиционными контролируемыми параметрами судовой энергетической установки, как частота вращения, давление и температура, важными параметрами для удаленного мониторинга являются крутильные колебания МДК (и другие виды колебаний – продольные, поперечные), а также вибрации.

Фактически для автономных судов без экипажей применение систем мониторинга крутильных колебаний является наиболее целесообразным способом для избежания аварий с судовыми МДК.

Преимущество № 8 – мониторинг опасного развития крутильных колебаний при работе судна в ледовых условиях.

Согласно исследованиям Р.Дж.О. де Ваала (Rosca Johan Oscar de Waal) [20], А.В. Андрушина [21], А.А. Чернышева, Г.И. Бухариной [22], Н.В. Васильева, И.М. Калинина, В.Н. Половинкина [23] и других специалистов, плавание судов в ледовых условиях увеличивает величину напряжений от крутильных колебаний. В работе А.А. Чернышева и Г.И. Бухариной [22] экспериментально доказано увеличение напряжений в гребном валу судна «Академик Трёшников» с 2 МПа (при плавании в свободной воде) до 20 МПа (при плавании в битом льду) вплоть до превышения допускаемых напряжений по правилам РМРС.

Специалисты ИЦ МТС «АГТУ» производили в 2023 г. тензометрирование МДК буксира типа «ОТ» проекта 428.1 по просьбе судовладельца для определения влияния плавания судна в битом льду на характеристики крутильных колебаний. В результате зафиксирован рост напряжений в коленчатом валу ГД правого борта при крутильных колебаниях 12-го порядка на частоте вращения 260 мин^{-1} . Это, как установлено позднее, связано с деформацией лопастей гребного винта правого борта после зафиксированных ударов в битом льду. Система мониторинга может зафиксировать не только рост напряжений, но и сам факт ударов гребного винта, т.к. в этом случае резкий рост напряжений в валах неизбежен и он будет отражен в данных, полученных системой.

Недостатки системы мониторинга крутильных колебаний.

Наряду с приведенными выше преимуществами выделим недостатки, присущие системам мониторинга крутильных колебаний. В их числе:

1. Сложность системы, которая обусловлена большим количеством функций: измерение, обработка, сравнение результатов с допустимыми величинами, сигнализация, хранение и передача данных.
2. Необходимость повышения квалификации судовых механиков (как вахтенных, так и второго и старшего механика) для работы с системой мониторинга.

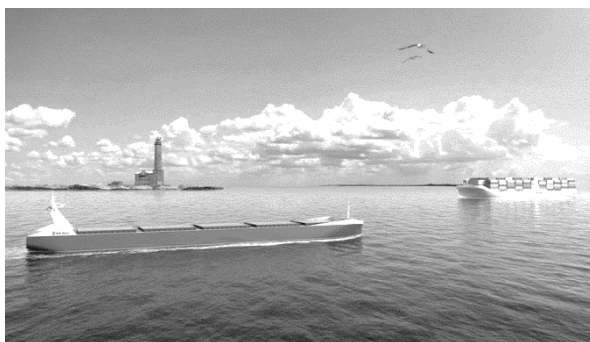


Рис. 11. Безэкипажный контейнеровоз компании «Роллс-Ройс» [19]

Fig. 11. Autonomous Rolls-Royce container ship [19]

3. Необходимость доступности места установки измерительных датчиков, определенных согласно предварительному расчету на крутильные колебания, что не всегда возможно из-за конструкции судового МДК и наличия закрытых для доступа участков валопровода (слани, туннель, дейдвуд, защитные кожухи).
4. Требуется высокая точность измерений системой мониторинга – угловые амплитуды крутильных колебаний составляют в большинстве случаев до $0,7-1,0^\circ$ поворота.
5. Программное обеспечение должно обеспечивать анализ функции крутильных колебаний для определения опасных гармонических составляющих на резонансных частотах вращения.
6. Относительно высокая стоимость систем мониторинга на первоначальном этапе их внедрения на судах, пока их производство не будет налажено массово.
7. Необходимость разработки и внедрения соответствующих требований к системам мониторинга в правила классификационных обществ.

Выводы

Conclusions

Полученные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Существующий регламентный метод контроля уровня крутильных колебаний в элементах судовых МДК и оценки технического состояния силиконовых демпферов надежен, но не дает полной гарантии отсутствия аварий от развития опасных амплитуд крутильных колебаний в межинспекционный период.

2. Мониторинг позволяет осуществлять постоянный контроль за развитием опасных амплитуд крутильных колебаний в судовых МДК, что повышает безопасность мореплавания и снижает риск возникновения аварий.
3. Достоинств мониторинга по сравнению с регламентными измерениями достаточно много, однако данный метод требует применения дорогих и сложных систем, что ограничивает его широкое применение на судах. Также ограничением является необходимость устойчивой высокоскоростной связи для передачи данных от системы мониторинга в техническую службу.
4. Для практического применения систем мониторинга крутильных колебаний отечественного производства необходимо применение микроконтроллеров и аналогово-цифровых преобразователей, которые пока в недостаточной мере производятся в России. В судовой автоматике чаще всего применяются зарубежные микросхемы, что повышает зависимость от импортных технологий.
5. В правилах российских классификационных обществ пока отсутствуют требования к системам мониторинга крутильных колебаний, что также ограничивает возможность их применения в нашей стране.
6. Мониторинг позволяет получить большой объем данных по крутильным колебаниям и температурам материалов упругих муфт в широком диапазоне режимов работы судового МДК, что поможет произвести более точную оценку их технического состояния.
7. Мониторинг предоставляет возможность безразборной оценки технического состояния демпфера крутильных колебаний и назначения его остаточного ресурса в режиме реального времени, т.е. фактически применить технологию «цифровой двойник».
8. Мониторинг крутильных колебаний имеет перспективы для применения в безэкипажных судах для повышения надежности работы их МДК.
2. *Горбачев М.М., Колыванов В.В.* Выбор методов постоянного мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 2. С. 54–65. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-54-65.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII. Механические установки : НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023. 107 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. IX. Механизмы : НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2024. [194 с.].
5. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Ч. I. Общие положения по техническому наблюдению : НД № 2-020101-175 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023. 164 с.
6. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации : НД № 2-030101-009 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2024. 417 с.
7. *Горбачев М.М., Покусаев М.Н.* Результаты испытаний прототипа системы мониторинга крутильных колебаний на судне «Иван Поддубный» // Наука и практика – 2022 : материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции. Астрахань, 2022. С. 271–274.
8. *Глушков С.П., Глушков С.С., Сигимов В.И.* Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания // Вестник сибирского государственного ун-та путей сообщения. 2016. № 2(37). С. 45–51.
9. Анализ динамических характеристик крутильно-колебательных систем судовых энергетических установок / *С.П. Глушков, С.С. Глушков, В.И. Кочергин, Б.О. Лебедев* // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2, т. 2. С. 59–66.
10. Single channel ‘C’ range. Rotary/short range telemetry equipment operating instructions / Astech Electronics. Alton, [S.d.]. 20 p.
11. Explanation of technical data : brochure. Herne : Vulkan Couplings, 2021. 23 s. URL: https://www.vulkan.com/fileadmin/user_upload/Downloads/EN/VULKAN_Couplings/Catalogues/technical_data_explanation_092021.pdf (Accessed: 30.01.2024).
12. Stromag Periflex VN. Disc Coupling : [catalog]. Unna : Stromag, [2021]. 30, [2] p. URL: <https://www.altraliterature.com/-/media/Files/>

Список использованной литературы

1. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания / *К.О. Сибряев, М.Н. Покусаев, М.М. Горбачев, А.Д. Ибадуллаев* // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 35–41. DOI 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41.

- Literature/Brand/stromag/catalogs/p-8462-sg.ashx (Accessed: 30.01.2024).
13. *Breitbach H.* Torsional vibrations in steam turbine shaft trains. [Stockholm] : Energiforsk, 2018. 58, [2] p. (Energiforsk Report; № 522).
 14. *Ohorn H., Thalhammer A., Mohr H.* Torsional vibration monitoring of large container vessel propulsion train // Program of Torsional Vibration Symposium (Salzburg 2022). Salzburg : Schwingungstechnischer Verein, 2022. P. 34.
 15. *Половинкин В.Н., Медведев В.В.* Оценка экономической эффективности мероприятий по обеспечению надежности и безопасности судовых энергетических установок // Судостроение. 2010. № 4. С. 57–59.
 16. Регистр участвует в развитии безэкипажного судостроения // Korabel.ru : [сайт]. 2019. 05 апреля. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/registr_uchastvu_et_v_razvitiu_bezkipazhnogo_sudohodstva.html (дата обращения: 09.10.2023).
 17. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) : НД № 2-030101-037 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2020. 96 с.
 18. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks : [site]. [S.l.], 2016. URL: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (Accessed: 09.10.2023).
 19. Rolls-Royce: Robot Ships Will Be Trading by 2020 // The Maritime Executive [site]. 2016. Apr. 14. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/rolls-royce-robot-ships-will-be-trading-by-2020> (Accessed: 09.10.2023).
 20. *Waal R.J.O. de.* An investigation of shaft line torsional vibration during ice impacts on PSRVs : master thesis / Stellenbosch University, Faculty of Engineering. Stellenbosch, 2017. 80, [40] p.
 21. *Андрюшин А.В.* Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов : автореф. ... д-ра техн. наук. / С.-Петерб. гос. мор. техн. ун-т. Санкт-Петербург, 2007. 38 с.
 22. *Чернышев А.А., Бухарина Г.И., Контиевская О.А.* Исследование динамических нагрузок в валопроводах главных энергетических установок судов ледового плавания на примере научно-экспедиционного судна «Академик Трешников» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. вып. 1. С. 177–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-177-182.
 23. О моделировании нагрузки гребных электродвигателей ледоколов при проведении стендовых и виртуальных испытаний систем электродвижения / *Васильев Н.В., Калинин И.М., Половинкин В.Н.* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1(399). С. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30.
- ## References
1. Efficiency of torsion dampers for marine internal combustion engines / *K. Sibryaev, M. Pokusaev, M. Gorbachev, A. Ibadullaev* // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Marine Engineering and Technologies series. 2022. No. 1 (November). P. 35–41. DOI 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41 (in Russian).
 2. *Gorbachev M., Kolyvanov V.* Selection of methods for continuous torsion monitoring of marine propulsion systems // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Marine Engineering and Technologies series. 2023. No. 2 (November). P. 54–65. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-54-65 (in Russian).
 3. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships ND 2-020101-174 (2023 edition). Part VII – Machinery Installations. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2023. 107 p. (in Russian).
 4. RS Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships ND 2-020101-174 (2023 edition). Part IX – Machinery. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2024. 194 p. (in Russian).
 5. RS Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships ND 2-020101-175 (2023 edition). Part I – General Regulations for Technical Supervision. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2023. 164 p. (in Russian).
 6. RS Annexes to Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service ND 2-030101-009 (2024 edition). Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2024. 417 p. (in Russian).
 7. *Gorbachev M., Pokusaev M.* Test results for prototype torsion monitoring system aboard Ivan Poddubny ship // Materials of Nauka i Praktika 2022 (Science & Practice 2022) All-Russian inter-disciplinary scientific conference. Astrakhan, 2022. P. 271–274 (in Russian).
 8. *Glushkov S., Glushkov S., Sigimov V.* Morlet wavelets in research of variable components of internal combustion engine torque // Siberian Transport University Bulletin. 2016. No. 2(37). P. 45–51 (in Russian).
 9. Analysis of dynamic characteristics for torsion-vibration systems of marine power plants // *S. Glushkov, S. Glushkov, V. Kochergin, B. Lebedev* // Marine Intellectual Technologies. 2018. No. 2. Vol. 2. P. 59–66 (in Russian).

10. Single channel 'C' range. Rotary/short range telemetry equipment operating instructions / Astech Electronics. Alton, [S.d.]. 20 p.
11. Explanation of technical data : brochure. Herne : Vulkan Couplings, 2021. 23 s. URL: https://www.vulkan.com/fileadmin/user_upload/Downloads/EN/VULKAN_Couplings/Catalogues/technical_data_explanation_092021.pdf (Accessed: 30.01.2024).
12. Stromag Periflex VN. Disc Coupling : [catalog]. Unna : Stromag, [2021]. 30, [2] p. URL: <https://www.altraliterature.com/-/media/Files/Literature/Brand/stromag/catalogs/p-8462-sg.ashx> (Accessed: 30.01.2024).
13. *Breitbach H.* Torsional vibrations in steam turbine shaft trains. [Stockholm] : Energiforsk, 2018. 58, [2] p. (Energiforsk Report; № 522).
14. *Ohorn H., Thalhammer A., Mohr H.* Torsional vibration monitoring of large container vessel propulsion train // Program of Torsional Vibration Symposium (Salzburg 2022). Salzburg : Schwingungstechnischer Verein, 2022. P. 34.
15. *Polovinkin V., Medvedev V.* Cost efficiency assessment of reliability and safety enhancement measures for marine power plant // Sudostroyeniye (Shipbuilding). 2010. No. 4. P. 57–59 (in Russian).
16. RS contributes to the progress in unmanned shipping // Web site Korabel.ru. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/registr_uchastvuet_v_razvitiy_bezekipazhnogo_sudohodstva.html (Accessed: 09.10.2023) (in Russian).
17. RS Regulations for Classification of Maritime Autonomous and Remotely Controlled Surface Ships (MASS) ND 2-030101-037. 2020 edition / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2020.
18. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks : [site]. [S.l.], 2016. URL: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (Accessed: 09.10.2023).
19. Rolls-Royce: Robot Ships Will Be Trading by 2020 // The Maritime Executive [site]. 2016. Apr. 14. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/rolls-royce-robot-ships-will-be-trading-by-2020> (Accessed: 09.10.2023).
20. *Waal R.J.O. de.* An investigation of shaft line torsional vibration during ice impacts on PSRVs : master thesis / Stellenbosch University, Faculty of Engineering. Stellenbosch, 2017. 80, [40] p.
21. *Andryushin A.* Propeller-ice interaction theory. Ensuring operational strength of propulsion system elements for ice-going ships and icebreakers. Dissertation for the degree of the Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg State Marine Technical University, 2007 (in Russian).
22. *Chernyshev A., Bukharina G., Kontievskaya O.* Dynamic loads in shaft lines of ice going ships. Case study: Akademik Tryoshnikov research vessel // Transactions of Krylov State Research Centre, 2019, Special Issue No. 1. P. 177–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-177-182 (in Russian).
23. Load simulation of icebreaker propulsion motors at laboratory and virtual tests of electric propulsion systems/ *N. Vasilyev, I. Kalinin, V. Polovinkin, A. Pustoshny, O. Savchenko, K. Sazonov* // Transactions of Krylov State Research Centre, 2022. Vol.1(399). P. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30 (in Russian).

Сведения об авторах

Покусаев Михаил Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство» Астраханского государственного технического университета. Адрес: 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1. Тел.: +7 (8512) 61-42-14. E-mail: evt2006@ Rambler.ru.

Руденко Михаил Федорович, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология» Астраханского государственного технического университета. Адрес: 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1. Тел.: +7 (8512) 61-42-26. E-mail: mf.rudenko@mail.ru.

Горбачев Максим Михайлович, к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство» Астраханского государственного технического университета. Адрес: 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1. E-mail: max9999_9@mail.ru.

About the authors

Mikhail N. Pokusaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Marine Transport Operation and Industrial Fishing Department, Astrakhan State Technical University. Address: 16/1, Tatischeva st., Astrakhan, Russia, post code 414056. Tel.: +7 (8512) 61-42-14. E-mail: evt2006@ Rambler.ru.

Mikhail F. Rudenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Life Safety and Engineering Ecology Department, Astrakhan State Technical University. Address: 16/1, Tatischeva st., Astrakhan, Russia, post code 414056. Tel.: +7 (8512) 61-42-26. E-mail: mf.rudenko@mail.ru.

Maxim M. Gorbachev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Marine Transport Operation and Industrial Fishing Department, Astrakhan State Technical University. Address: 16/1, Tatischeva st., Astrakhan, Russia, post code 414056. E-mail: max9999_9@mail.ru.

Поступила / Received: 16.10.23

Принята в печать / Accepted: 01.03.24

© Покусаев М.Н., Руденко М.Ф., Горбачев М.М., 2024

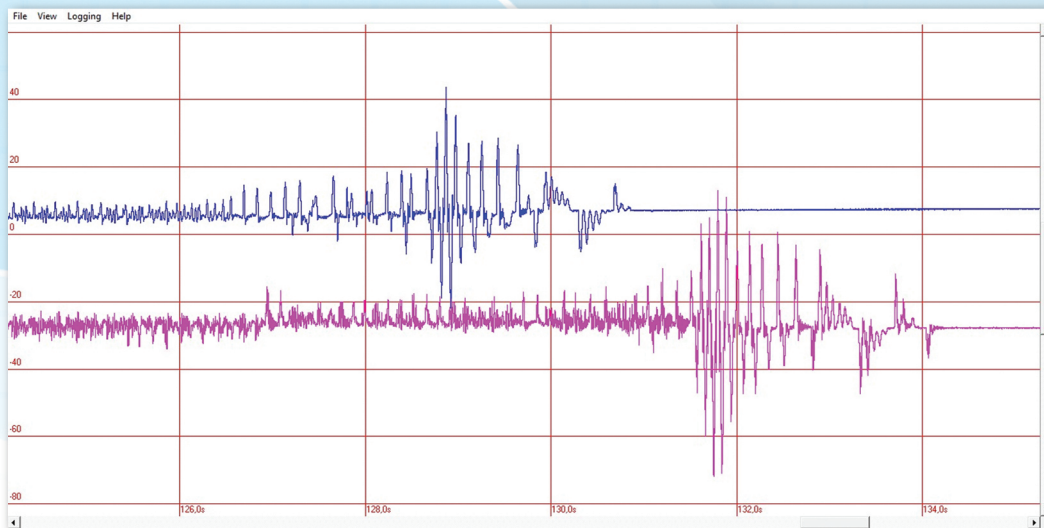


Рис. 2. Тензограмма машинно-двигательного комплекса буксировщика проекта Damen ASD Tug 3110 (верхний график – для машинно-двигательного комплекса правого борта, нижний – левого борта)

Fig. 2. Strain diagram for engine and propulsion system of Damen ASD Tug 3110: above – starboard, below – port side

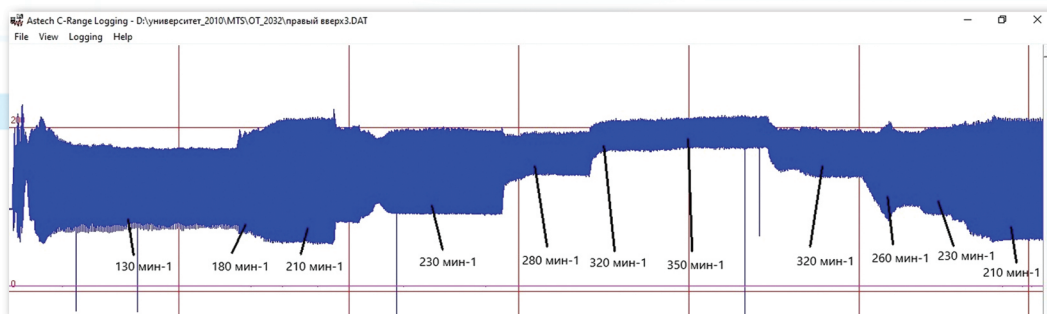


Рис. 6. Тензограмма машинно-двигательного комплекса правого борта буксира типа «ОТ» проекта H.3290

Fig. 6. Strain diagram for engine and propulsion system of OT-type tug (Project H.3290): starboard

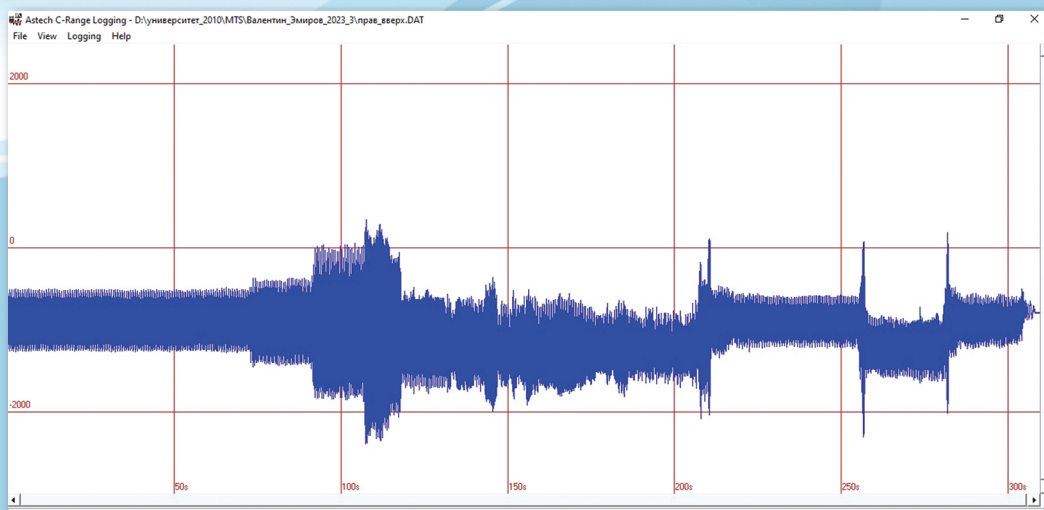


Рис. 7. Тензограмма машинно-двигательного комплекса правого борта сухогруза проекта 19611

Fig. 7. Strain diagram for engine and propulsion system of Project 19611 cargo carrier: starboard

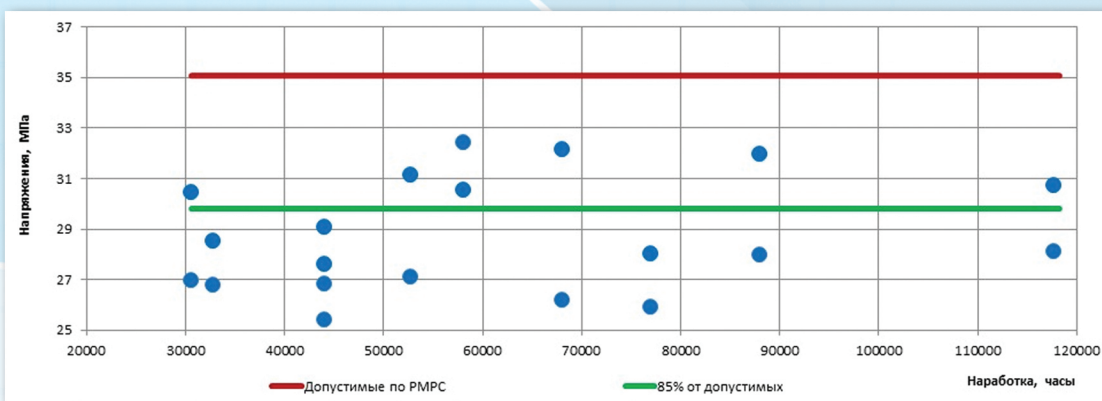


Рис. 8. Величина напряжений в гребных валах судов типа «Волга» (на резонансной частоте вращения 250 мин⁻¹) в зависимости от наработки главного двигателя

Fig. 8. Stresses in propulsion shafts of Volga-class vessels(resonant RPM = 250) as function of main engine burn time

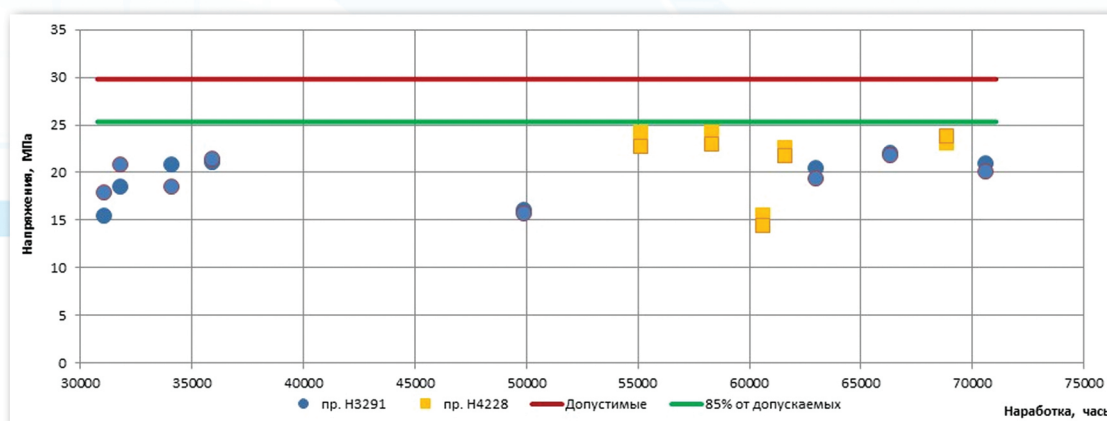


Рис. 9. Величина напряжений в коленчатых валах главного двигателя буксиров типа «ОТ» в зависимости от наработки

Fig. 9. Main engine crankshaft stresses aboard OT-type tugs as function of burn time

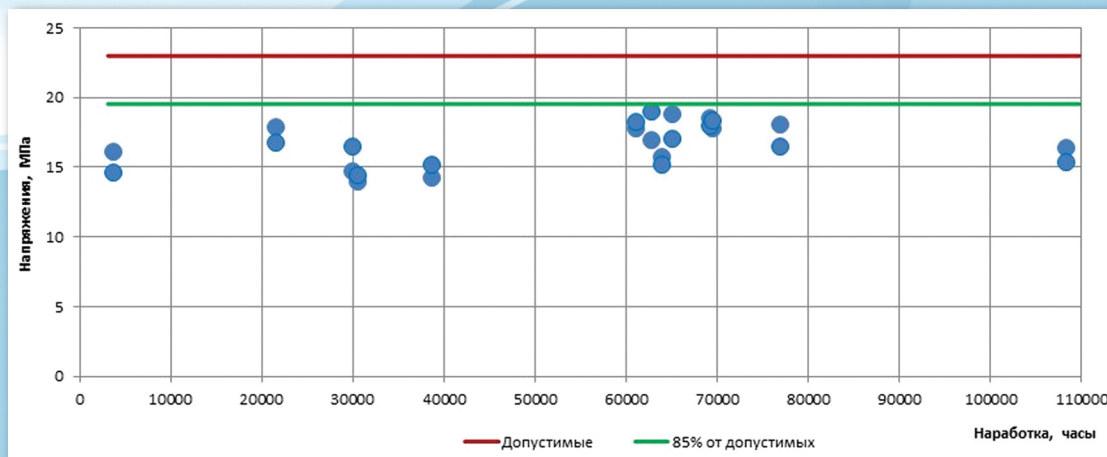


Рис. 10. Величина напряжений в коленчатых валах главного двигателя судов типа «Нефтерудовоз» в зависимости от наработки

Fig. 10. Main engine crankshaft stresses aboard ore-bulk-oil (OBO) ships versus burn time