

УДК 629.12
EDN UACEOK

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРОМОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СУДОВЫХ МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

М.Н. Покусаев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: evt@astu.org

В.Г. Букин, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: bukinvg@mail.ru

П.А. Дорохов, канд. техн. наук, Астраханский филиал ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 414040 Россия, Астрахань, Коммунистическая ул. / ул. Хлебникова, 30/8, e-mail: dorohov.pa@rs-class.org

М.М. Горбачев, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

А.В. Дьяченко, ст. эксперт, Нижне-Волжский филиал ФАУ «Российское классификационное общество», 414000 Россия, Астрахань, Адмиралтейская ул., 1, e-mail: sadwyn1997@gmail.com

Вибрация и колебания, возникающие при работе судовой энергетической установки, остаются опасными явлениями, приводящими к возникновению усталостных трещин и разрушениям элементов машинно-двигательных комплексов, опорных конструкций и другим последствиям. Особенно опасным является резонанс колебаний различных видов, в результате чего воздействие вибрации на судовые конструкции и оборудование возрастает в несколько раз. Крутильные колебания в судовых машинно-двигательных комплексах вызывают дополнительную вибрационную нагрузку, но при практических исследованиях их измеряют отдельно от других видов колебаний, при этом необходима установка измерительной аппаратуры непосредственно на вращающемся валу, что связано с определенными сложностями. В статье приводятся результаты исследований, которые подтверждают возможность оценки крутильных колебаний посредством измерения вибрации носовой части корпуса дизеля. Определено, что связь между крутильными колебаниями и вибрацией проявляется наиболее сильно при классической схеме передачи мощности от среднеоборотного двигателя на гребной винт фиксированного шага. В результате проведения практических исследований на судах проектов 1557 и 81200 были установлены резонансные частоты крутильных колебаний посредством измерения вибрации, что было подтверждено прямыми измерениями крутильных колебаний. Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности применения вибромониторинга для оценки параметров крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов в периоды между регламентным проведением торсиографирования или тензометрирования.

Ключевые слова: *судовой машинно-двигательный комплекс, безопасность мореплавания, надежность судового валопровода, мониторинг вибрации, крутильные колебания, резонанс колебаний.*

Для цитирования: Покусаев М.Н. Перспективность применения вибромониторинга для оценки развития крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах / М.Н. Покусаев, В.Г. Букин, П.А. Дорохов, М.М. Горбачев, А.В. Дьяченко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 112 — 125. — EDN UACEOK.

PROSPECTS OF USING VIBRATION MONITORING TO ASSESS THE DEVELOPMENT OF TORSIONAL VIBRATIONS IN MARINE PROPULSION SYSTEMS

M.N. Pokusaev, DSc, Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: evt@astu.org

V.G. Bukin, DSc, Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: bukinvg@mail.ru

P.A. Dorokhov, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, Astrakhan branch, 414040 Russia, Astrakhan, Kommunisticheskaya ul. / ul. Khlebnikova, 30/8, e-mail: dorohov.pa@rs-class.org

M.M. Gorbachev, PhD, Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

A.V. Dyachenko, Senior Expert, FAI Russian Classification Society, Nizhne-Volzhsky branch, 414000 Russia, Astrakhan, Admiralteiskaya ul., 1, e-mail: sadwyn1997@gmail.com

Vibration and vibrations occurring during the operation of a ship's power plant remain dangerous phenomena that lead to the occurrence of fatigue cracks and destruction of elements of machine-propulsion systems, supporting structures and other consequences. The resonance of vibrations of various types is especially dangerous, as a result of which the impact of vibration on ship structures and equipment increases several times.

Torsional vibrations in marine propulsion systems cause additional vibration load, but in practical studies they are measured separately from other types of vibrations, while it is necessary to install measuring equipment directly on a rotating shaft, which is associated with certain difficulties. The article presents the results of studies that confirm the possibility of evaluating torsional vibrations by measuring the vibration of the bow of the diesel hull. It is determined that the relationship between torsional vibrations and vibration is manifested most strongly in the classical scheme of power transmission from a medium-speed engine to a fixed-pitch propeller. As a result of practical research on ships of projects 1557 and 81200, resonant torsional vibration frequencies were established by measuring vibration, which was confirmed by direct measurements of torsional vibrations. The studies conducted indicate the prospects of using vibration monitoring to assess the parameters of torsional vibrations of marine propulsion systems in the periods between routine torsiongraphy or strain measurement.

Keywords: *marine machinery-propulsion system, navigation safety, reliability of the ship's shaft line, vibration monitoring, torsional vibrations, vibration resonance.*

For citation: Pokusaev M.N., Bukin V.G., Dorokhov P.A., Gorbachev M.M., Dyachenko A.V. Prospects of using vibration monitoring to assess the development of torsional vibrations in marine propulsion systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 112 — 125. EDN UACEOK.

ВВЕДЕНИЕ

При работе судового машинно-двигательного комплекса на него воздействует совокупность вибраций различного вида: осевые, поперечные, продольные, крутильные. Их воздействие в сочетании со сложными условиями эксплуатации судов приводит к возникновению усталостных разрушений элементов валопроводов — коленчатых, промежуточных, гребных валов, к повреждению редукторных передач и упругих муфт. Усталостные разрушения элементов валопроводов происходят и в настоящее время [1 — 4], несмотря на все усилия со стороны специалистов и ученых, что доказывает актуальность проблемы и необходимость ее решения.

В настоящее время для определения опасности крутильных колебаний производится их измерение по регламенту — при сдаточных испытаниях судов, после модернизации их машинно-двигательных комплексов и периодически для оценки работоспособности демпферов крутильных колебаний главных двигателей. Измерения производятся в соответствии с требованиями нормативных и руководящих документов классификационных обществ — Российского морского регистра судоходства (РС) [5] и Российского классификационного общества (РКО) [6]. Периоды между регламентными измерениями крутильных колебаний составляют порядка 15 000 часов, и в это время не гарантируется внезапный отказ демпферов, что приведет к опасному росту крутильных колебаний. Существуют рекомендации в период эксплуатации оценивать уровень крутильных колебаний чисто субъективными методами (усиление шума, появление стуков, повышение вибрации дизеля), которые, на наш взгляд, могут быть игнорированы или неправильно определены механиками, кроме того, на судах отсутствует аппаратура для измерения и анализа вибрации и колебаний.

В теории принято разделять и производить расчет каждого вида колебаний отдельно для упрощения решения задачи. Можно выделить работы таких ученых, как И.А. Лурье [7], В.П. Терских [8], П.А. Истомина [9] и других выдающихся специалистов, которые принимали данное допущение, и это было оправдано имеющимися на тот момент ограниченными мощностями средств вычислений. В условиях внедрения ЭВМ стали возможны расчеты связанных колебаний, и среди исследований можно выделить работы В.К. Румба [10, 11], посвященные методу главных координат. В настоящее время классификационные общества России — РС и РКО — не требуют проводить совместный расчет осевых и крутильных колебаний, но международное классификационное общество DNV GL уже требует подобный анализ при проектировании судов [12]. Таким образом, наблюдается тенденция по учету связанных колебаний в судовых валопроводах, в первую очередь — осевых и крутильных. В связи с этим возникает вопрос о проведении комплексных измерений осевых и крутильных колебаний, что может быть обеспечено при помощи датчиков акселерометров или лазерной измерительной виброаппаратуры. Одними из примеров подобных измерительных комплексов является продукция компании Zetlab (Россия) [13], фирмы Brüel & Kjær (Дания) [14] или разработка специалистов ФГБОУ ВО «АГТУ» на базе МЭМС-акселерометров [15].

Применение акселерометров в настоящее время не рассматривается правилами классификационных обществ для измерения крутильных колебаний и оценки технического состояния демпферов; внедрение подобных методов на уровне нормативно-технической документации требует подготовки большой научной базы. Тем не менее связь крутильных колебаний и вибрации в установках различного назначения подтверждается и теоретически, и практически. Можно выделить работы [16, 17], которые проведены в этом направлении и предположить, что вибромониторинг имеет перспективу для практического внедрения на флоте для проведения безразборной технической диагностики демпферов крутильных колебаний.

Поскольку расчетные методы по оценке крутильных колебаний в нерезонансных зонах в настоящее время все еще ограничены сложностью решения системы дифференциальных уравнений для многомассовых систем, то обычно ограничиваются расчетами резонансных амплитуд и возникающих от них напряжений в элементах машинно-двигательного комплекса. В качестве режима работы дизеля, который может привести к росту амплитуд крутильных колебаний рассматривается эксплуатация с одним отключенным цилиндром. Данные расчеты согласно требованиям Правил РС [5] и РКО [6] должны обязательно оцениваться экспериментально при помощи торсиографирования, также допускается проведение тензометрирования. Подобные методики приводятся в нормативной документации и для осевых колебаний.

С учетом вышесказанного была выработана цель исследования — измерение вибрации и крутильных колебаний одновременно. Измерение вибрации производится в режиме постоянного мониторинга с носового конца дизеля (где установлен демпфер крутильных колебаний) и тензометрирования на валопроводе. Подобное независимое измерение двух параметров позволяет определить их взаимосвязь и получить ряд диагностических признаков для возможного применения метода на практике.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно принятой гипотезе авторов о возможности оценки крутильных колебаний посредством измерения вибрации и их связи было выдвинуто несколько предположений и требований к измерительному процессу:

- взаимосвязь крутильных и осевых колебаний будет иметь более четкий и прогнозируемый характер для машинно-двигательных комплексов с простой (классической) схемой передачи мощности: среднеоборотный двигатель — система валов — гребной винт фиксированного шага;
- при наличии муфт, редукторов и других элементов в составе машинно-двигательного комплекса, формирующих промежуточные гармоники крутильных колебаний, взаимосвязь будет иметь более сложный характер и потребует тщательной процедуры анализа результатов;
- измерение вибрации необходимо производить на корпусе дизеля в носовой части вблизи места размещения демпфера крутильных колебаний, что позволит при накоплении базы измерений при разной нагрузке получить диагностические признаки по его техническому состоянию;
- размещение тензометрических резисторов следует производить на валах с наибольшим эластическим моментом, определенным по результатам расчета свободных колебаний или в местах с прямым доступом к валу для размещения оборудования;
- анализ вибрации следует производить в трех направлениях — осевом, поперечном и вертикальном;
- оба измерительных процесса должны иметь единую систему отсчета времени и частоты вращения коленчатого вала дизеля;
- перед измерениями должен быть проведен расчет свободных крутильных колебаний для определения резонансных частот и масштабов напряжений для всех элементов валопровода.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ИХ ВЫБОРА

В качестве объектов для практических исследований было выбрано два судна: сухогруз проекта 1557 с классом РС и буксир-толкач проекта 81200 (после модернизации главной энергетической установки), состоящий на классификационном учете РКО.

Выбор судов был обусловлен следующими соображениями.

1. Сухогрузы (генгрузы) проекта 1557 (тип «Сормовский») выпускались в период с 1967 по 1986 г. на судостроительном заводе «Красное Сормово» (СССР, г. Горький (Н. Новгород)) и судостроительном заводе имени Володарского (СССР, г. Рыбинск) в общем количестве 122 шт., при этом часть из них (порядка 40 шт.) до сих пор находятся в эксплуатации во флоте России и других государств, по данным [18]. Опыт эксплуатации данных судов огромный, что позволяет учесть его при анализе результатов измерений. Суда проекта 1557 имеют классическую схему машинно-двигательного комплекса с прямой передачей мощности: главный двигатель 6NVD48A-2U (6ЧНР32/48), система валов и гребной винт фиксированного шага. Отсутствие упругих муфт и редуктора позволяет говорить о наличии двух опасных форм крутильных колебаний: первого и второго порядка с доминированием опасных гармоник колебаний, кратных числу

цилиндров, среди которых наиболее виброактивной будет гармоника 6-го порядка. Силиконовые демпферы главных двигателей исследуемого судна имеют наработку на июль 2024 г. 88 656 часов, то есть длительно находились в эксплуатации, соответственно, можно прогнозировать рост крутильных колебаний из-за снижения эффективности демпферов. Остаточный ресурс демпферов по результатам безразборной диагностики технического состояния составляет 6600 часов.

2. Буксиры-толкачи проекта 81200 выпускались в период с 1985 по 1991 г. на Звениговском ССЗ (СССР, г. Звенигово) в общем количестве серии 9 шт., из них в эксплуатации находятся 8 судов, по данным [19]. Исследуемое судно в 2023 — 2024 гг. подверглось полной модернизации машинно-двигательного комплекса с установкой (на каждую из двух валовой линий) дизеля 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) производства Китая, высокоэластичной муфты, реверс-редуктора, системы валов и гребного винта фиксированного шага. Применение упругой муфты и редуктора привело к снижению амплитуд крутильных колебаний, увеличению количества их форм и к появлению гармоник промежуточных порядков, помимо главных. В тоже время прогнозируется появление опасной главной гармоники 8-го порядка как наиболее виброактивной. Демпферы крутильных колебаний главных двигателей исследуемого судна имеют наработку 5 часов, то есть амплитуды крутильных колебаний ожидаются минимальной величины. Остаточный ресурс демпферов составляет около 20 000 часов работы.

3. Наличие двух судов с прямой и реверс-редукторной передачей позволит провести сравнительный анализ развития крутильных колебаний и вибрации, их взаимосвязь и степень проявления резонансов при вибромониторинге. Это позволит дать рекомендации о практическом применении вибромониторинга для диагностирования развития крутильных колебаний.

4. Разное техническое состояние демпферов главных двигателей обоих судов дает возможность оценить степень влияния уровня крутильных колебаний на вибрации в зависимости от наработки.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Оценка крутильных колебаний производилась специалистами испытательного центра «МТС» ФГБОУ ВО «АГТУ» (имеющего признание РС и РКО в области виброакустических измерений) при помощи сертифицированного поверенного программно-аппаратного комплекса Astech Electronics (Великобритания), который производит прямые измерения напряжений, возникающих в валах при помощи тензометрических резисторов, закрепленных на валопроводе (см. рис. 1).

Измерение вибрации в режиме онлайн осуществлялось экспериментальным образцом системы мониторинга (рис. 2), разработанной в рамках диссертационной работы М.М. Горбачева «Система мониторинга крутильных колебаний для повышения безопасности эксплуатации судового машинно-двигательного комплекса» [20]. Датчик вибрации изготовлен на базе трехосевого акселерометра ММА7361, настроенного на диапазон измерения виброускорения в пределах $\pm 1,5g$, рассчитан на эксплуатацию в диапазоне температур от -40 до $+125$ °С, опорная частота измеряемой вибрации — 1000 Гц. Измерительный блок имеет микроконтроллер с тактовой частотой 16 МГц, позволяет отображать данные на дисплее с диагональю 10,16 см и осуществлять запись данных на карту памяти.

Метрологические характеристики экспериментального образца системы мониторинга подтверждены испытаниями, проведенными на оборудовании ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Астраханской области и Республике Калмыкия» и сравнительными испытаниями в лабораторных условиях с поверенным виброметром первого класса «Экофизика-110А» [20].

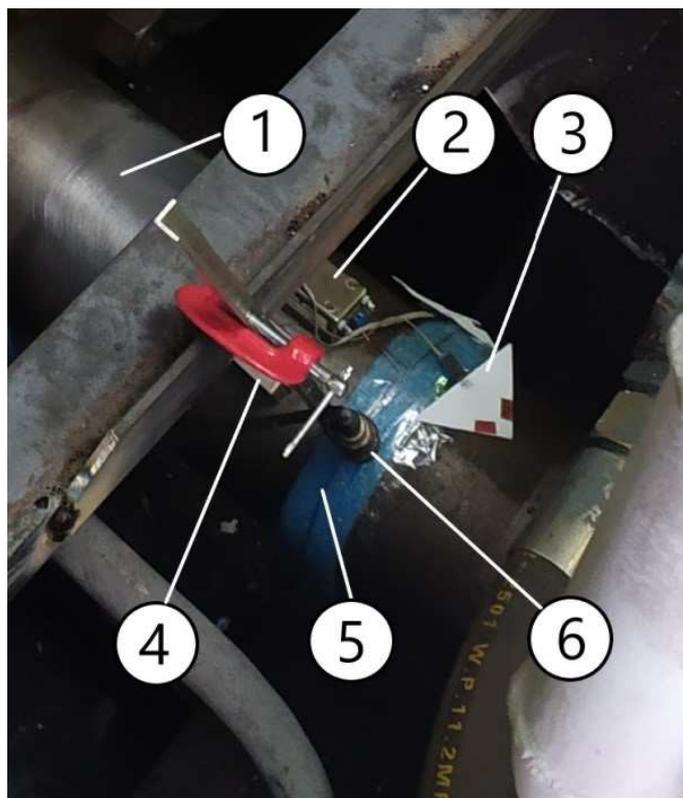


Рис. 1. Установка комплекса Astech Electronics на валопроводе судна проекта 81200:
 1 — промежуточный вал; 2 — трансмиттер; 3 — тензометрические резисторы (полумост) на изолирующей подложке;
 4 — батарея; 5 — антенна для беспроводной передачи данных; 6 — индуктивная головка для приема сигнала

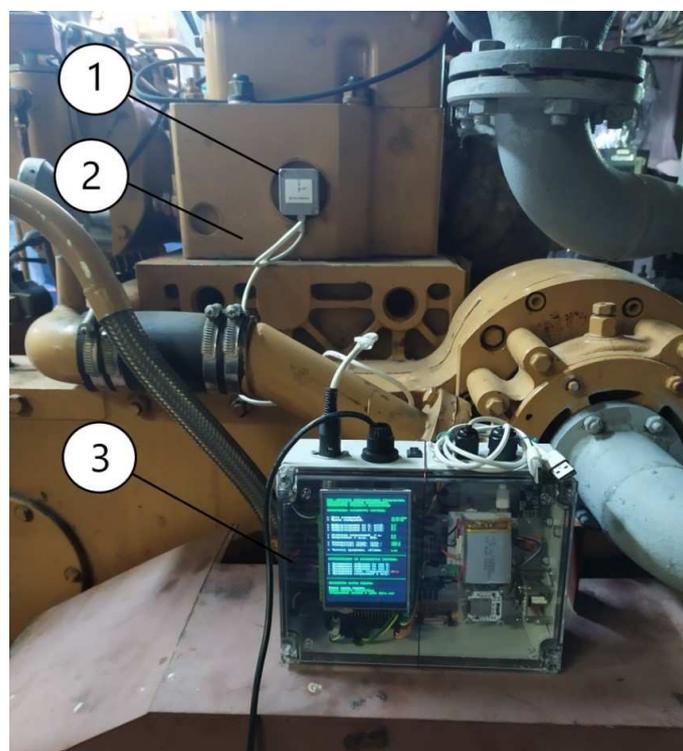


Рис. 2. Установка элементов системы вибромониторинга на главном двигателе судна проекта 81200:
 1 — датчик вибрации; 2 — носовая часть дизеля; 3 — измерительный блок экспериментального образца системы мониторинга

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

На обоих судах измерение крутильных колебаний производилось в июле 2024 г. специалистами ИЦ «МТС» ФГБОУ ВО «АГТУ» в соответствии с требованиями программ измерений виброакустических параметров, согласованных РС и РКО.

Контроль параметров производился с момента пуска главного двигателя с постепенным ростом частоты вращения коленчатого вала до номинальной и дальнейшим снижением ее до окончательной остановки.

Полученные тензограммы машинно-двигательного комплекса одного борта (для другого борта характерны идентичные тензограммы) судов проекта 1557 и проекта 81200 представлены на рис. 3 и 4.

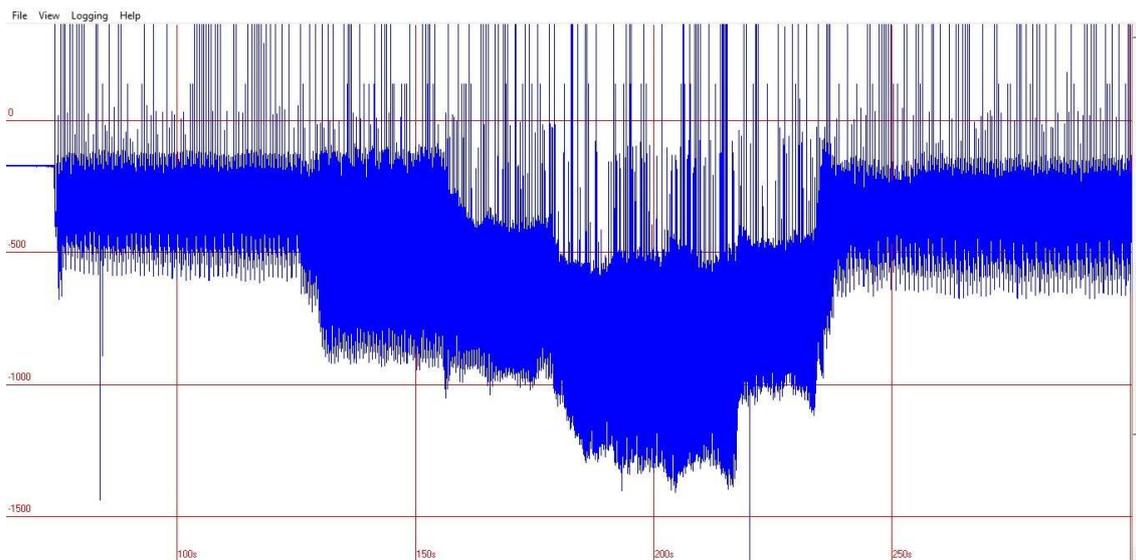


Рис. 3. Тензограмма машинно-двигательного комплекса судна проекта 1557 (отдельные помехи вызваны влиянием работы дизель-генератора)

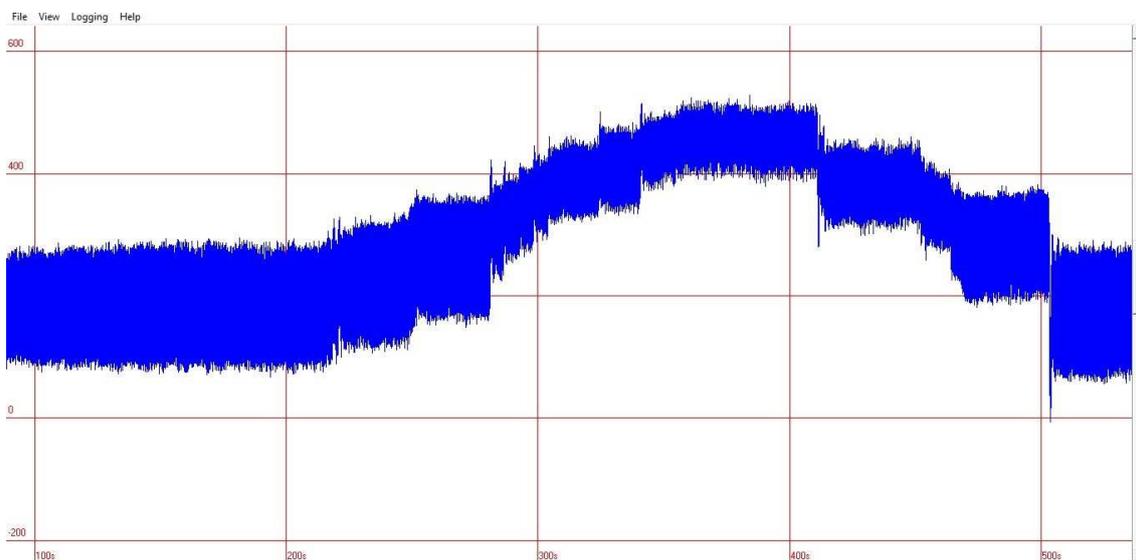


Рис. 4. Тензограмма машинно-двигательного комплекса судна проекта 81200

Как видно из рис. 3, на тензограмме для машинно-двигательного комплекса судна проекта 1557 можно выделить рост амплитуд крутильных колебаний на отдельных режимах работы. На рис. 4 в тензограмме резкого роста амплитуд крутильных колебаний не наблюдается, что связано с установленной упругой муфтой до тензометрируемого вала. Также были получены виброграммы носовой части главных двигателей судов проекта 1557 и 81200.

4.1. Анализ результатов измерений параметров вибрации и крутильных колебаний установки судна проекта 1557.

Рассмотрим в первую очередь виброграмму для главного двигателя судна проекта 1557, представленную на рис. 5а — в.

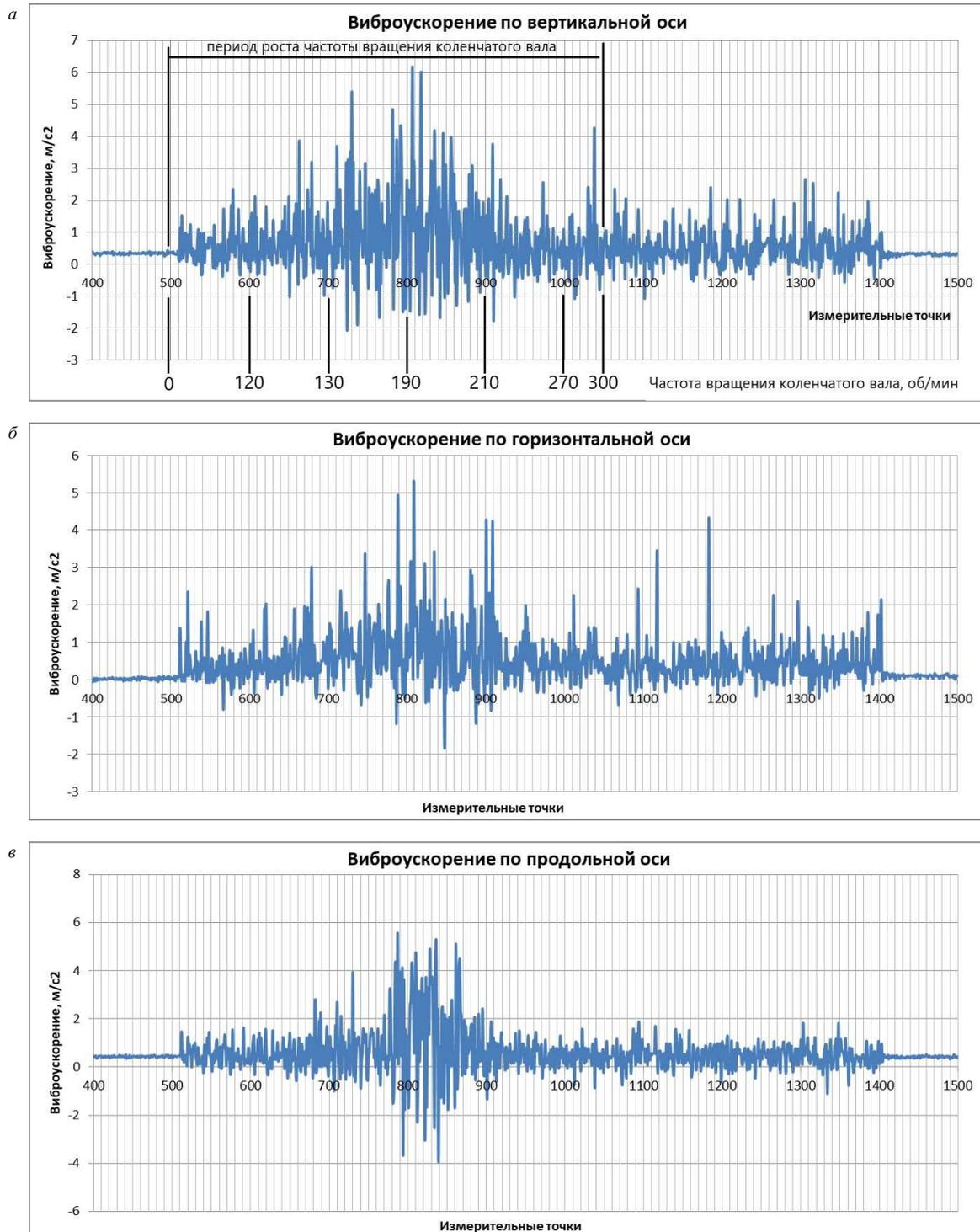


Рис. 5. Виброграмма главного двигателя 6NVD48A-2U (6ЧНР32/48) судна проекта 1557:
 а — график развития вибрации по вертикальной оси; б — график развития вибрации по горизонтальной оси;
 в — график развития вибрации по продольной оси

Как видно, наибольшая вибрация наблюдается на частотах вращения 190 — 200 об/мин, при этом резонансными частотами для развития амплитуд крутильных колебаний согласно расчету являются: 130 об/мин (9-й порядок валопроводной одноузловой формы); 195 об/мин (6-й порядок валопроводной одноузловой формы); 265 об/мин (12-й порядок моторной двухузловой формы). Резонанс главного порядка (6-й) четко выделяется на виброграмме, особенно в направлении продольной оси, и не столь выраженный рост отмечен на частотах вращения 130 об/мин и 265 об/мин.

На рис. 6 представлен собственный шум системы вибромониторинга с датчиком, измеренный в состоянии покоя, который максимально составил по амплитуде виброускорения $0,14 \text{ м/с}^2$.

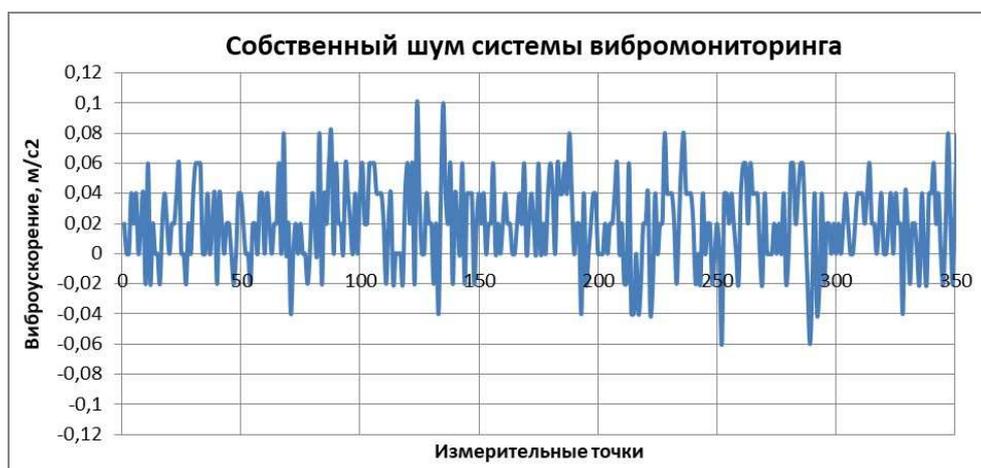


Рис. 6. Собственный шум системы вибромониторинга с датчиком, измеренный в состоянии покоя

На рис. 7 приведен график развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 1557 по результатам тензометрирования.



Рис. 7. График развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 1557

Как видно из рис. 7, на частотах вращения 200 — 205 об/мин зафиксирован резонансный рост напряжений до 12 МПа, что дает основание говорить о сходимости результатов тензометрирования и вибромониторинга в области идентификации резонансных частот крутильных колебаний. Резонансы других порядков на частотах 130 об/мин и 265 об/мин для промежуточного вала на графике касательных напряжений не выражены, но могут проявляться в других элементах валопровода.

Отметим, что мы не проводим в данном исследовании анализ абсолютных величин виброускорения, поскольку при мониторинге важен именно тренд изменения контролируемых параметров, что поясняется в работах В.Н. Костюкова [21, 22]. Дополнительно необходимо указать, что амплитуды виброускорения при резонансе больше амплитуд на холостом ходу: в вертикальном направлении в 4 раза, в поперечном направлении в 6,3 раза, в продольном направлении в 3,4 раза.

Для наиболее точной оценки резонансной частоты рекомендуется применение вейвлет-анализа с базовой материнской функцией Морле, которая часто используется для анализа быстроизменяющихся во времени гармонических функций, в том числе и вибраций [23, 24]. Вейвлет-анализ был произведен для участка виброграммы при ее измерении в продольном направлении для частоты вращения от 180 до 220 об/мин (рис. 8).

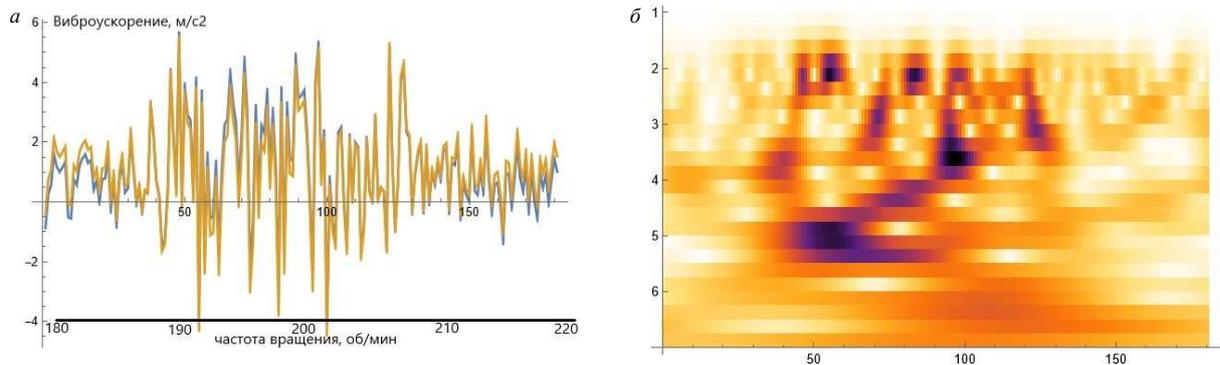


Рис. 8. Вейвлет-анализ виброграммы при изменении частоты вращения (от 180 до 220 об/мин) коленчатого вала главного двигателя 6NVD48A-2U судна проекта 1557:
a — исходная функция и ее восстановление при помощи вейвлета Морле;
б — скаллограмма вейвлет-анализа функции изменения вибрации

Как видно из результатов вейвлет-анализа, наибольший отклик функции вибрации (характеризуемый темным цветом) наблюдается на частоте 190 — 200 об/мин, и это позволяет определить пиковое значение виброускорения $5,57 \text{ м/с}^2$ и среднеквадратичное $19,79 \text{ м/с}^2$, которое в наибольшей степени характеризуют энергию вибрации [25].

4.2. Анализ результатов измерений параметров вибрации и крутильных колебаний установки судна проекта 81200.

По приведенной ранее методике был произведен анализ виброграммы, полученной при испытаниях судна проекта 81200 и представленной на рис. 9.

Как видно, наибольшая вибрация наблюдается на частотах вращения 630 — 650 об/мин, при этом резонансными частотами для развития амплитуд крутильных колебаний, согласно расчету, являются 631 об/мин (8-й порядок моторной трехузловой формы); 745 об/мин (2,5-й порядок валопроводной двухузловой формы); 757 об/мин (12-й порядок валопроводной четырехузловой формы). Отметим, что резонанс главного порядка (8-й) четко выделяется на виброграмме только в направлении продольной оси, не столь выраженный рост также отмечен на частотах вращения 745 об/мин и 757 об/мин. На рис. 9 очень хорошо заметно, что вибрации по поперечной оси не дают возможности четко идентифицировать резонансы, в отличие от графика вибрации по продольной оси. Дополнительно необходимо указать, что вибрация при резонансе больше вибрации на холостом ходу в вертикальном направлении в 4 раза, в поперечном направлении в 2,4 раза, в продольном направлении в 4,3 раза.

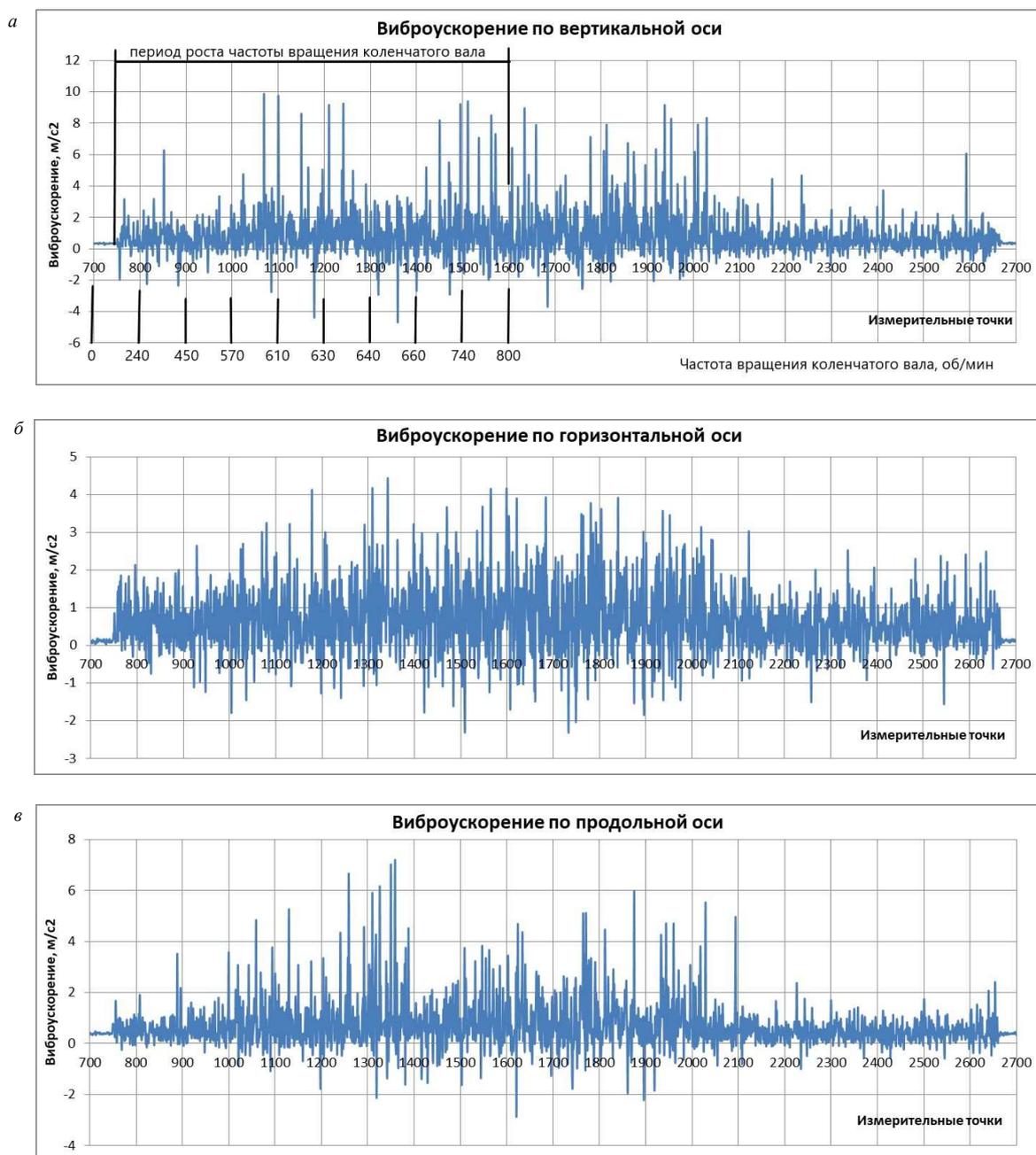


Рис. 9. Виброграмма главного двигателя 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) судна проекта 81200:
 а — график развития вибрации по вертикальной оси; б — график развития вибрации по горизонтальной оси;
 в — график развития вибрации по продольной оси

На рис. 10 приведен график развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 81200 по результатам тензометрирования.

Проведя анализ рис. 10, можно сделать вывод, что резкого роста напряжений при резонансной частоте 630 об/мин не наблюдается, однако на данной частоте достигается максимальное значение напряжений 2,25 МПа.

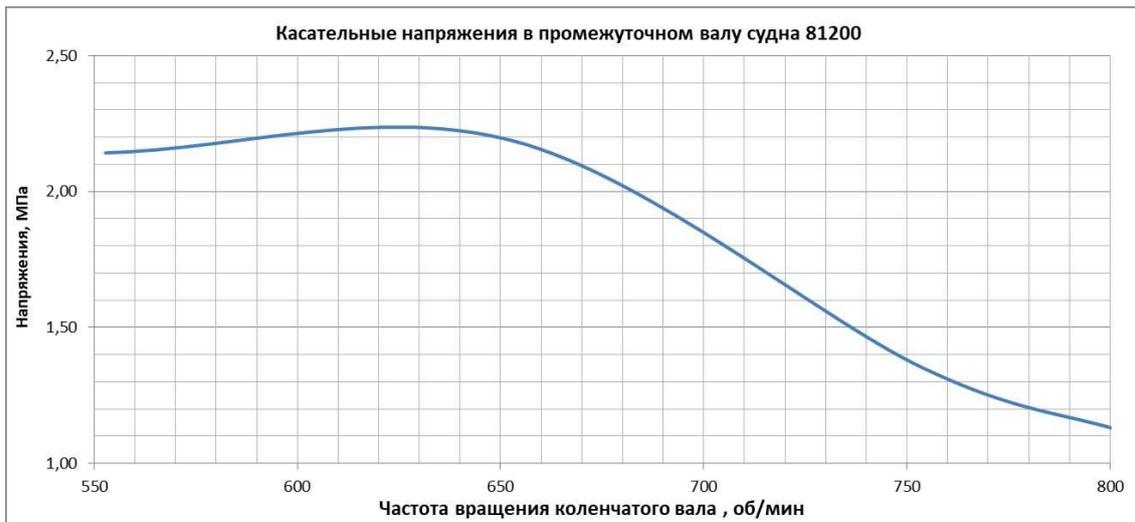


Рис. 10. График развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 81200

Далее был произведен вейвлет-анализ функции вибрации для участка виброграммы при ее измерении в продольном направлении для частоты вращения от 620 до 660 об/мин (рис. 11).

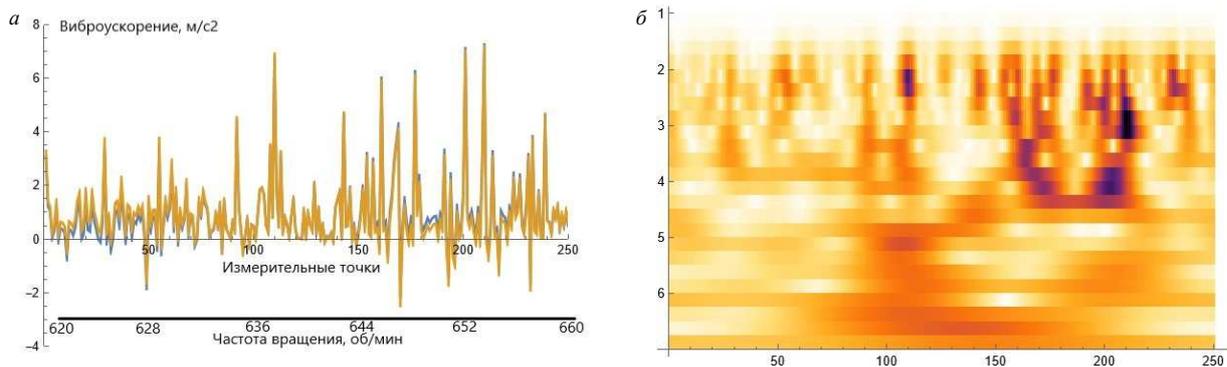


Рис. 11. Вейвлет-анализ виброграммы при изменении частоты вращения (от 620 до 660 об/мин) коленчатого вала главного двигателя 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) судна проекта 81200:
 а — исходная функция и ее восстановление при помощи вейвлета Морле;
 б — скаллограмма вейвлет-анализа функции изменения вибрации

Как видно из результатов вейвлет-анализа, наибольший отклик функции вибрации (характеризуемый темным цветом) наблюдается на частоте 645 — 655 об/мин, и это позволяет определить пиковое значение виброускорения $7,16 \text{ м/с}^2$ и среднее квадратичное $17,58 \text{ м/с}^2$.

Интересным является факт, что наиболее сильно проявление резонансов крутильных колебаний наблюдается в продольном направлении при измерении вибрации, и это требует дальнейшего практического изучения выявленного эффекта на других судах.

Связь крутильных колебаний и вибраций создает возможность разработки и внедрения новых методов безразборной технической диагностики элементов судовых валопроводов [26], а также оценки качества их центровки с учетом напряженного состояния материала валов [27].

ВЫВОДЫ

1. Практическими методами доказана связь между развитием крутильных колебаний и вибрации судовых дизелей с достаточной глубиной диагностирования (резонансные амплитуды виброускорения в 2 — 6 раз превышают амплитуды на холостом ходу) при возникновении резонансов главных порядков (равных числу цилиндров дизеля).

2. Наблюдается четкая идентификация резонансов главных порядков на виброграммах в продольном направлении, что требует дополнительных практических исследований и оценки возможного резонанса осевых и крутильных колебаний.

3. Наиболее информативная картина по развитию резонансов крутильных колебаний проявляется для установок с прямой передачей мощности на гребной винт фиксированного шага с большой наработкой демпферов крутильных колебаний.

4. Применение метода вибромониторинга для технической диагностики состояния демпферов крутильных колебаний возможно после проведения ряда исследований для формирования базы диагностических признаков и может дополнить уже имеющуюся методику оценки технического состояния силиконовых демпферов. Для этого необходима четкая идентификация резонансов моторной формы крутильных колебаний, на которую настраиваются демпферы, а также значение исходных параметров вибрации при новых демпферах и при различных периодах наработки.

5. Вибромониторинг (после полноценной разработки, обоснования данного метода и одобрения классификационными обществами) может служить для оценки развития крутильных колебаний при эксплуатации судов в период между регламентными измерениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамонтов В.А. Анализ причин повреждений и отказов судовых валопроводов / В.А. Мамонтов, Г.А. Кушнер, Д.А. Волков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. — 2021. — № 3. — С. 33 — 39.
2. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 2021. — 150 p.
3. Гирин С.Н. Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД» / С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — №71 (2). — С. 15 — 28.
4. Чура М.Н. Прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов (на примере т/х «Волгонефть» пр. 1577/550А) / М.Н. Чура. — Новороссийск, 2010. — 57 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024. — 115 с.
6. Правила классификации и постройки судов (ПКПС) / Российское классификационное общество. — М., 2019. — 1685 с.
7. Лурье И.А. Крутильные колебания в дизельных установках / И.А. Лурье; Воен.-мор. акад. им. Ворошилова. — М.; Л.: Военмориздат, 1940. — 220 с.
8. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок. Исследования и методы расчета: [в 4 т.] / В.П. Терских. — Л.: Судостроение, 1969 — 1970.
9. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС: уч. пос. / П.А. Истомин. — Л.: Судостроение, 1968. — 304 с.
10. Румб В.К. Еще раз о расчетах крутильных и осевых колебаний судовых пропульсивных установок с ДВС / В.К. Румб, А.А. Пугач // Морской вестник. — 2013. — Специальный выпуск № 1 (10). — С. 31 — 33.
11. Румб В.К. Расчет крутильных и осевых колебаний судовых валопроводов непосредственным решением дифференциальных уравнений / В.К. Румб // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы II Всероссийской межотраслевой науч.-техн. конф. — СПб.: СПбГМТУ, 2013. — С. 79 — 82.
12. DNV GL. Rules for Classification: Ships. Edition October 2015. Part 4. Systems and components. Chapter 2. Rotating machinery, general. — 41 p.
13. Zetlab. Система измерения крутильных колебаний. [Электронный ресурс] URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannye-stendy/sistema-izmereniya-krutilnyih-kolebaniy/> (дата обращения 01.09.2024).
14. Лапин Ю.А. Метод измерения крутильных колебаний судовых валопроводов при помощи трехосевого акселерометра / Ю.А. Лапин, М.В. Грибиниченко, О.С. Портнова, П.А. Андрухина // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2023. — № 3 (56). — С. 35 — 45.
15. Горбачев М.М. Сравнительная оценка применения микроэлектромеханических акселерометров для измерения крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов / М.М. Горбачев, А.В. Дьяченко, Д.Г. Конищев, А.Г. Кокуев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. — 2024. — № 1. — С. 95 — 103.
16. Никишин В.Н. Диагностирование силиконового демпфера крутильных колебаний коленчатого вала по параметрам вибрации / В.Н. Никишин, К.Н. Светличный // Леса России и хозяйство в них. — 2012. — № 1 — 2 (42 — 43). — С. 76 — 77.
17. Сибряев К.О. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания / К.О. Сибряев, М.Н. Покусаев, М.М. Горбачев, А.Д. Ибадуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. — 2022. — № 1. — С. 35 — 41.
18. Тип Сормовский, проект 1557 // Водный транспорт [База данных]. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1471?ysclid=m0jtbbjcrz715534310> (дата обращения 01.09.2024).

19. Тип БТО, проект 81200 // Водный транспорт [База данных]. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/176/?ysclid=m0jtdsvnlb974432812> (дата обращения 01.09.2024).
20. Горбачев М.М. Система мониторинга крутильных колебаний для повышения безопасности эксплуатации судового машинно-двигательного комплекса: дис. ... д-ра техн. наук / М.М. Горбачев — Астрахань, 2024. — 399 с.
21. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: уч. пос. / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. — 360 с.
22. Костюков В.Н. Инновационные системы виброакустического мониторинга технического состояния оборудования КОМПАКС / В.Н. Костюков, А.В. Костюков // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2011. — № 8. — С. 3 — 11.
23. Коньшева В.Ю. Вейвлет-анализ в задачах контроля и диагностики линейных динамических систем / В.Ю. Коньшева, Н.А. Максимов, А.В. Шаронов // Труды МАИ. — 2017. — Вып. 97. — 19 с.
24. Глушков С.П. Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания / С.П. Глушков, С.С. Глушков, В.И. Сигимов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 2 (37). — С. 45 — 51.
25. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. / гл. ред. В.Н. Челомей. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. — М.: Машиностроение, 1980. — 544 с.
26. Покусаев М.Н. Применение систем мониторинга крутильных колебаний для повышения надежности судовых машинно-двигательных комплексов / М.Н. Покусаев, Т.В. Хоменко, М.М. Горбачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 78 — 86.
27. Гирин С.Н. Оценка качества центровки судовых валопроводов с учетом напряженного состояния материала / С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 59 — 67.

REFERENCES

1. Mamontov V.A., Kushner G.A., Volkov D.A. Analysis of damage and failure of ship propulsion shaft. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2021. No. 3. P. 33 — 39. (In Russ.)
2. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 2021. — 150 p.
3. Girin S.N., Matveev Yu.I. Analysis of the motor ship «ELAND» propeller shaft failure. *Russian Journal of Water Transport*. 2022. No. 71 (2). P. 15 — 28. (In Russ.)
4. Chura M.N. Prognozirovanie nachal'noi stadii ustalostnogo razrusheniya sudovykh grebnykh valov (na primere t/kh «Volgoneft» pr. 1577/550A) [Prediction of the initial stage of fatigue failure of ship propeller shafts (on the example of the motor ship «Volgoneft» project 1577/550A)]. Novorossiisk, 2010. 57 p.
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024. 115 p.
6. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov [Rules for the Classification and Construction of Ships] / Rossiiskoe klassifikatsionnoe obshchestvo. Moscow, 2019. 1685 p.
7. Lur'e I.A. Krut'il'nye kolebaniya v dizel'nykh ustanovkakh [Torsional vibrations in diesel units]. Moscow; Leningrad: Voenmorizdat, 1940. 220 p.
8. Terskikh V.P. Krut'il'nye kolebaniya valoprovoda silovykh ustanovok. Issledovaniya i metody rascheta: [Torsional vibrations of power unit shaft line. Research and methods of calculation: in 4 vols]. Leningrad: Sudostroenie, 1969 — 1970.
9. Istomin P.A. Krut'il'nye kolebaniya v sudovykh DVS [Torsional vibrations in marine internal combustion engines: textbook]. Leningrad: Sudostroenie, 1968. 304 p.
10. Rumb V.K., Pugach A.A. Eshche raz o raschetakh krut'il'nykh i osevykh kolebaniy sudovykh propul'sivnykh ustanovok s DVS [Once again on calculations of torsional and axial vibrations of ship propulsion systems with internal combustion engines]. *Morskoi vestnik*. 2013. Special issue No. 1 (10). P. 31 — 33.
11. Rumb V.K. Raschet krut'il'nykh i osevykh kolebaniy sudovykh valoprovodov neposredstvennym resheniem differentsial'nykh uravnenii [Calculation of torsional and axial vibrations of ship shafts by direct solution of differential equations]. *Aktual'nye problemy morskoi energetiki*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2013. P. 79 — 82.
12. DNV GL. Rules for Classification: Ships. Edition October 2015. Part 4. Systems and components. Chapter 2. Rotating machinery, general. 41 p.
13. Zetlab. Sistema izmereniya krut'il'nykh kolebaniy [Torsional vibration measurement system]. URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannye-stendy/sistema-izmereniya-krut'il'nykh-kolebaniy/> (accessed 01.09.2024).
14. Lapin Yu.A., Gribinichenko M.V., Portnova O.S., Andryukhina P.A. Metod izmereniya krut'il'nykh kolebaniy sudovykh valoprovodov pri pomoshchi trekhosevogo akselerometra [Method for measuring torsional vibrations of ship shafts using a three-axis accelerometer]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2023. No. 3 (56). P. 35 — 45.
15. Gorbachev M.M., D'yachenko A.V., Konishchev D.G., Kokuev A.G. Comparative assessment of microelectromechanical accelerometers use for measuring torsional vibrations of marine propulsion systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024. No. 1. P. 95 — 103. (In Russ.)
16. Nikishin V.N., Svetlichnyi K.N. Diagnostirovanie silikonovogo dempfera krut'il'nykh kolebaniy kolenchatogo vala po parametram vibratsii [Diagnostics of silicone crankshaft torsional vibration damper by vibration parameters] // *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*. 2012. No. 1 — 2 (42 — 43). P. 76 — 77.
17. Sibryaev K.O., Pokusaev M.N., Gorbachev M.M., Ibadullaev A.D. Efficiency of mechanical dampers of torsional vibrations of marine internal combustion engines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2022. No. 1. P. 35 — 41. (In Russ.)
18. Tip Sormovskii, proekt 1557 [Sormovsky type, project 1557]. *Vodnyi transport*. [Water transport [Database]]. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1471?ysclid=m0jtbjcrz715534310> (accessed 01.09.2024).
19. Тип БТО, проект 81200 [BTO type, project 81200]. *Vodnyi transport*. [Water transport [Database]]. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/176/?ysclid=m0jtdsvnlb974432812> (accessed 01.09.2024).

20. Gorbachev M.M. Sistema monitoringa krutil'nykh kolebaniy dlya povysheniya bezopasnosti ekspluatatsii sudovogo mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Torsional vibration monitoring system to improve the safety of operation of the ship's machinery and propulsion unit: DSc thesis]. Astrakhan, 2024. 399 p.
21. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines: textbook]. Omsk: OmGTU, 2011. 360 p.
22. Kostyukov V.N., Kostyukov A.V. Innovatsionnye sistemy vibroakusticheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya KOMPAKS [Innovative systems of vibroacoustic monitoring of technical condition of KOMPAKS equipment]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2011. No. 8. P. 3 — 11.
23. Konysheva V.Yu., Maksimov N.A., Sharonov A.V. Veivlet-analiz v zadachakh kontrolya i diagnostiki lineinykh dinamicheskikh system [Wavelet analysis in problems of control and diagnostics of linear dynamic systems]. *Trudy MAI [Transactions of Moscow Aviation Institute]*. 2017. Issue 97. 19 p.
24. Glushkov S.P., Glushkov S.S., Sigimov V.I. Morlet wavelet functions in the study of variable torque components of internal combustion engines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016. No. 2 (37). P. 45 — 51. (In Russ.)
25. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. V 6 t. / gl. red. V.N. Chelomei. T. 3. Kolebaniya mashin, konstruksii i ikh elementov [Vibrations in technics: handbook. In 6 vol. / ed. by V.N. Chelomey. T. 3. Vibrations of machines, constructions and their elements]. — M.: Mashinostroenie, 1980. 544 p.
26. Pokusaev M.N., Xomenko T.V., Gorbachev M.M. Use of torsional vibration monitoring systems to improve the reliability of marine propulsion systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 78 — 86. (In Russ.)
27. Girin S. N., Matveev Yu. I. Assessment of ship shafting alignment quality taking into account the stress state of the material. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 59 — 67. (In Russ.)