

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

УДК 534.1:629.5.035.8
EDN: OGEVCX

Г.А. Кушнер 

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРЕБНОГО ВАЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СУДНА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является судовой валопровод. Цель состоит в разработке метода одновременной регистрации деформаций кручения, сжатия и изгиба гребного вала, возникающих в процессе его работы при парциальных и связанных колебаниях. Актуальность исследования связана с необходимостью учета параметров напряженно-деформированного состояния гребных валов судов в процессе эксплуатации.

Материалы и методы. Исследования проведены на валопроводе экспериментального судна. Регистрация фактических значений параметров колебаний и напряженно-деформированного состояния гребного вала обеспечена применением адаптированного комплекса Zetlab и преобразователями – тензорезисторами серии 2ФКП-5-400, обеспечивающими необходимую точность измерений. Проведена статистическая обработка результатов измерений.

Основные результаты. Получены тензограммы колебаний валопровода, сделаны выводы о наличии и свойствах зон динамической неустойчивости. Показана возможность возникновения связанных колебаний гребного вала на определенных частотах вращения. Для диапазона с наибольшими действующими напряжениями представлена зависимость эквивалентных напряжений от частоты вращения валопровода.

Заключение. На основе анализа полученных результатов установлено, что при определенных условиях работы гребного вала возможно возникновение областей динамической неустойчивости, характеризующихся комбинациями крутильных, поперечных и осевых колебаний. Изложенная методика при внедрении на суда аппаратного и программного обеспечения позволит повысить надежность энергетических установок.

Ключевые слова: колебания судового валопровода, связанные колебания, измерения колебаний, тензометрирование, экспериментальное судно.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

UDC 534.1:629.5.035.8
EDN: OGEVCX

G.A. Kushner 

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

COUPLED VIBRATIONS STUDIES OF EXPERIMENTAL VESSEL PROPELLER SHAFT

Object and purpose of research. This paper discusses a method for simultaneous registration of torsion, compression and bending deformations of the propeller shaft that occur during its operation with partial and associated vibrations. The object of the study is the ship's shaft line. The relevance of the study is related to the need to take into account the parameters of the stress-strain state of the propeller shafts of ships during operation.

Для цитирования: Кушнер Г.А. Исследование связанных колебаний гребного вала экспериментального судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 109–118.

For citations: Kushner G.A. Coupled vibrations studies of experimental vessel propeller shaft. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 109–118 (in Russian).

Materials and methods. The research was carried out on the shaft line of the experimental vessel. The registration of the actual values of the vibration parameters and the stress-strain state of the propeller shaft is provided by the use of an adapted Zetlab complex and strain gauge converters 2FKP-5-400 series, providing the necessary measurement accuracy. Statistical processing of measurement results was carried out.

Main results. Tensograms of vibrations of the shaft line are obtained, conclusions are drawn about the presence and properties of zones of dynamic instability. The study has established the possibility of propeller shaft coupled vibrations at certain rotation speed. For the range with the highest mechanical stress, the dependence of equivalent stress on shaft rotation speed is presented.

Conclusion. Based on the analysis of the results obtained, it was found that under certain operating conditions of the propeller shaft, areas of dynamic instability may occur, characterized by combinations of torsional, transverse and axial vibrations. The described methodology for the implementation of hardware and software on ships will improve the reliability of power plants.

Keywords: ship shaft line vibrations, coupled vibrations, vibration measurements, strain measurement, experimental vessel.
The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Судовой валопровод представляет собой динамическую систему, которая работает в условиях крутильных, осевых и поперечных колебаний. Совокупность этих колебаний вызывает в элементах валопровода дополнительные знакопеременные напряжения, приводящие к снижению несущей способности, возникновению усталостных трещин и поломок валов [1, 2].

Большинство научных работ, посвященных исследованиям колебаний валопроводов, рассматривают отдельные их виды. Крутильные колебания представляют наибольшую опасность для судовой энергоустановки и являются предметом исследований большого количества публикаций, наравне с методиками их расчета и демпфирования [3–6]. Особое значение учет крутильных колебаний имеет для ледоколов и судов ледового плавания, где присутствуют значительные пульсирующие нагрузки на винте с главной лопастной частотой [7]. Осевые колебания вызваны изменениями передаваемого гребным винтом упора за один оборот. Их существенное отличие от крутильных колебаний заключается в том, что осевые колебания валопровода непосредственно воздействуют на корпус судна через упорный подшипник и являются причиной увеличения вибрации, интенсивного износа подшипников и поломок коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [8, 9].

Увеличение агрегатной мощности современных двигателей и повышение частот вращения валов относительно недавно определили направления исследований по разработке новых методик расчета поперечных колебаний и методов их гашения [10–12]. Особенностью поперечных колебаний является их локальный характер, в котором они ограничены от-

дельными участками валопровода, поскольку возбуждающие колебания усилия обычно нейтрализуются реакциями ближайших подшипников [13].

Ряд работ отечественных и зарубежных ученых посвящен исследованию связанных колебаний. Связанность крутильных и осевых колебаний подтверждена экспериментально и проявляется в том, что скручивание вала под нагрузкой сопровождается осевой деформацией. Передача упора гребным винтом также вызывает скручивание вала, а сам винт является одним из источников возбуждения крутильно-осевых колебаний [13, 14]. Изучение колебаний валопроводов полярных исследовательских судов показало необходимость учета циклических скручивающих и осевых нагрузок в процессе эксплуатации судна [15].

Опыт проведения тензометрирования показывает, что в судовом валопроводе может возникать резонанс сразу нескольких видов колебаний в определенном диапазоне частот [16]. В соответствии с этим в определенные моменты времени кратно увеличивается амплитуда и крутильных, и поперечных колебаний. Возникает момент одновременного действия нормальных и касательных напряжений, что приводит к кратно возрастающему уровню эквивалентных напряжений, оказывающих непосредственное влияние на возникновение поломок.

Правила Российского классификационного общества устанавливают обязательной процедуру измерения параметров только крутильных колебаний судовых энергетических установок, которая проводится при проектировании и модернизации судов, а также в процессе их эксплуатации при осуществлении контроля технического состояния [17, с. 43–49].

В Правилах Российского морского регистра судоходства изложены требования к расчету и изме-

рениям крутильных колебаний, а расчет изгибных колебаний необходим для проверки длин пролетов между опорами валов [18]. Признавая опасность всех видов колебаний для прочности валопровода, правила общества DNV содержат дополнительные требования к расчету поперечных и осевых колебаний, а также связанных крутильно-осевых колебаний [19].

Измерения параметров связанных колебаний на данный момент не регламентированы в правилах классификационных обществ, однако могут являться существенным фактором, влияющим на безопасность эксплуатации судна. В настоящее время нет общепризнанной методики, при помощи которой была бы полностью решена затронутая проблема. Работа посвящена изучению связанных колебаний судовых валопроводов на основе динамических измерений.

Материалы и методы изучения связанных колебаний

Materials and methods of studying coupled vibrations

Исследование колебаний валопроводов принято проводить программно-аппаратными комплексами [20], позволяющими регистрировать фактические значения параметров колебаний и напряженно-деформированного состояния валов, входящих в состав судовой энергетической установки.

В работе измерения проводились при помощи специализированного программно-аппаратного комплекса Zetlab, адаптированного для регистрации крутильных, осевых и поперечных колебаний в режиме реального времени (рис. 1).

Программно-аппаратный комплекс имеет измерительный блок, который монтируется на гребной вал экспериментального судна. В состав блока входят три измерительных модуля, выполняющих функцию аналогово-цифрового преобразователя для мостовых схем отдельных видов деформации кручения, сжатия и изгиба. Модуль регистратор сигналов позволяет выполнять резервирование данных на твердотельный накопитель, а передача данных в режиме реального времени выполняется по радиоканалу соответствующим модулем. Все модули и батареи размещаются в корпусе, который получен методом послойного синтеза и может быть изготовлен для различных диаметров валов. Стационарный блок монтируется в зоне действия радиосигнала и подключается к персональному компьютеру оператора либо может быть интегрирован

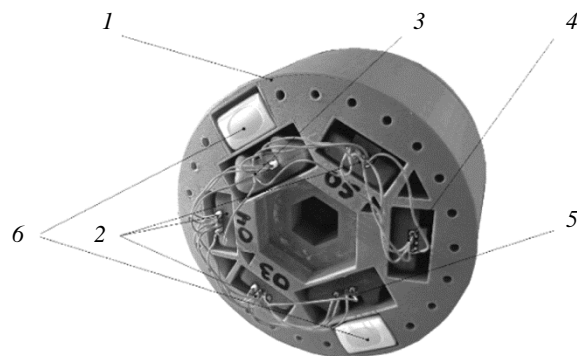


Рис. 1. Измерительный блок телеметрического комплекса: 1 – корпус; 2 – измерительные модули для тензодатчиков; 3 – регистратор сигналов; 4 – модуль радиосвязи; 5 – преобразователь интерфейса; 6 – батареи

Fig. 1. Measuring unit of telemetry complex: 1 – casing; 2 – measuring modules for strain gages; 3 – signal recorder; 4 – radio communication module; 5 – interface converter; 6 – battery

в существующую на судне комплексную систему управления.

Такая компоновка позволяет использовать измерительный комплекс для проведения исследований работоспособности валопровода и торсиографирования. Аппаратное обеспечение ресурсных испытаний возможно при замене батарей на контактные кольца-токосъемники. Для проведения торсиографирования валопроводов судов с помощью разработанного комплекса имеется возможность дополнительно оснастить комплекс датчиком частоты вращения вала. Комплекс имеет различный функционал по измерению колебаний и вибраций за счет возможности подключения трехосевого виброметра. Техническое решение является дополнением к существующим методам вибродиагностики.

Для измерений деформаций гребного вала экспериментального судна применены три схемы монтажа тензорезисторов (рис. 2). Измерение кручения обеспечено монтажом датчиков на поверхность вала под 45° к его оси и подключением по полномостовой схеме с четырьмя активными тензорезисторами (рис. 2а), которая снижает влияние осевых деформаций и изгиба. Измерение изгиба проведено по полномостовой схеме с поклежкой датчиков вдоль оси вала, исключающей влияние осевой деформации (рис. 2б). Регистрация осевой деформации произведена полномостовой схемой с четырьмя активными тензорезисторами для исключения влияния деформации изгиба (рис. 2в). Деформация изгиба при таком монтаже происходит с увеличенной

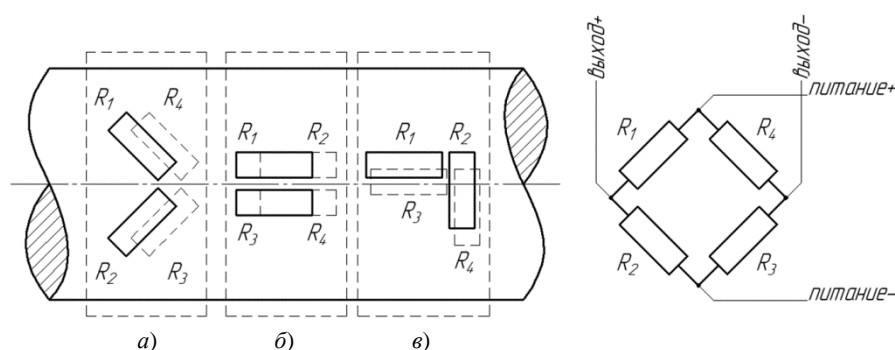


Рис. 2. Схема монтажа тензорезисторов на валу:
 а) кручение;
 б) изгиб;
 в) осевая деформация

Fig. 2. Arrangement of resistance strain gages on shaft:
 a) torsion;
 b) bending;
 c) axial deformation

вчетверо чувствительностью. Все мостовые схемы минимально подвержены влиянию температуры.

Использование тензорезисторов как первичных преобразователей определяет качество и точность измерений. Поэтому калибровка выполняется по нескольким датчикам из партии с последующим усреднением результата, чтобы использовать его для всей партии. Точность является определяющей характеристикой таких измерений. Для предлагаемого комплекса погрешность при определении частоты колебаний составляет не более 2 %, погрешность при определении механических напряжений составляет не более 5 %. Суммарные затраты времени на получение выходных данных с учетом монтажа измерительного комплекса не превышают 2 часов.

Для тарирования тензорезисторов использовался комплект динамометрических ключей и система рычагов, которая для создания нагрузок устанавли-

валась на кормовую оконечность гребного вала экспериментального судна, представленного на рис. 3. Конструкция обеспечивает возможность проведения исследований влияния различных факторов на параметры крутильных, осевых и поперечных колебаний валопровода.

Стационарный двигатель внутреннего сгорания установлен на фундаменте и приводит в движение валопровод через клиноременную передачу. Промежуточный вал опирается на две опоры скольжения, а положение гребного вала определяется носовым и кормовым дейдвудными подшипниками. В носовой части гребного вала размещена измерительная аппаратура для регистрации параметров колебаний.

В состав машинно-двигательного комплекса судна входят двигатель LIFAN 190FD-R (мощность 10,5 кВт, рабочий объем 420 см³, 4 такта) с диапазоном частоты вращения от 100 об/мин

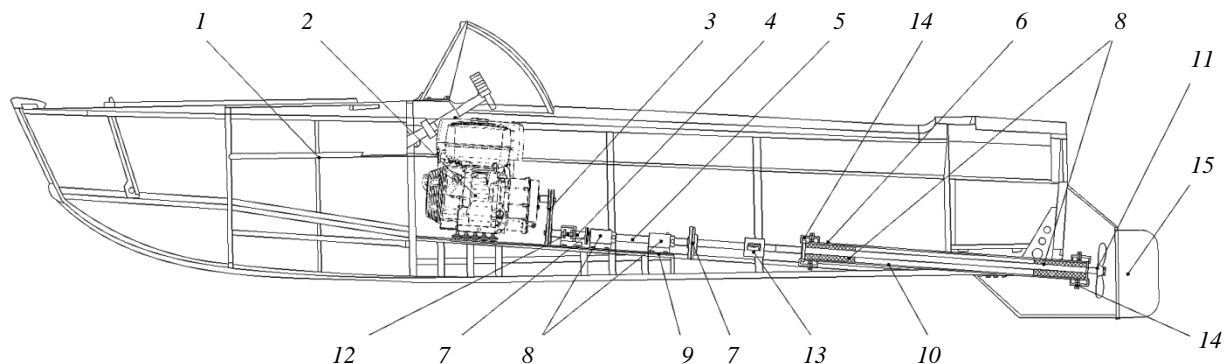


Рис. 3. Конструкция экспериментального маломерного судна: 1 – корпус маломерного судна; 2 – поршневой ДВС; 3 – клиноременная передача; 4 – упорный вал; 5 – промежуточный вал; 6 – гребной вал; 7 – фланцевые соединения; 8 – подвижные опоры; 9 – фундамент; 10 – дейдвудная труба; 11 – гребной винт; 12 – упорный подшипник; 13 – измерительная тензометрическая аппаратура; 14 – уплотнения гребного вала; 15 – рулевое устройство

Fig. 3. Design of experimental small craft: 1 – hull of small craft; 2 – reciprocating internal combustion engine; 3 – V-belt drive; 4 – thrust shaft; 5 – intermediate shaft; 6 – propeller shaft; 7 – flange connections; 8 – sliding support; 9 – foundation; 10 – stern tube; 11 – propeller; 12 – thrust bearing; 13 – measuring strain-gage instrumentation; 14 – propeller shaft seals; 15 – steering gear

до 4000 об/мин (номинальная 2500 об/мин); понижающая клиноременная передача ($u = 1 \dots 3$), упорный вал; промежуточный вал; гребной вал; винт фиксированного шага. Валы выполнены из пластичной стали 35.

Использование в конструкции устройства поршневого двигателя внутреннего сгорания обеспечивает возникновение всех видов колебаний при работе валопровода. Совокупность возможностей плавного изменения частоты вращения валов, смены шкивов, изменения расстояний и зазоров в опорах скольжения, съема и замены лопастей позволяет существенно расширить диапазоны варьирования факторов при экспериментальных исследованиях в сравнении с натурными судами.

Анализ основных результатов измерений

Analysis of main measurement results

Регистрация деформаций кручения, сжатия и изгиба гребного вала, возникающих в процессе его работы при крутильных, осевых и поперечных колебаниях произведена с помощью тензометрирования (рис. 4). Эксперимент проводился на основе методики, предложенной автором [21].

На рис. 5–7 приведены фрагменты полученных данных о колебаниях валопровода судна. Регистрация показаний измерительной аппаратуры производилась на спецификационных режимах силовой установки на передний ход при плавном изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя от минимально устойчивой до максимальной и обратно. Интерес представляют данные для частот вращения от 500 до 1000 об/мин.

Согласно полученным тензограммам колебаний валопровода можно сделать вывод о наличии зоны

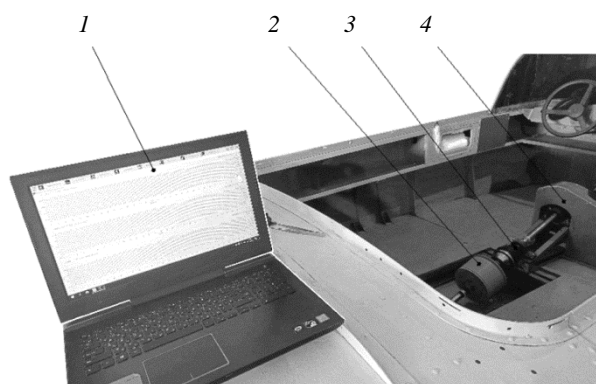


Рис. 4. Оборудование для проведения эксперимента: 1 – персональный компьютер с программным обеспечением; 2 – измерительная тензометрическая аппаратура; 3 – гребной вал; 4 – клиноременная передача

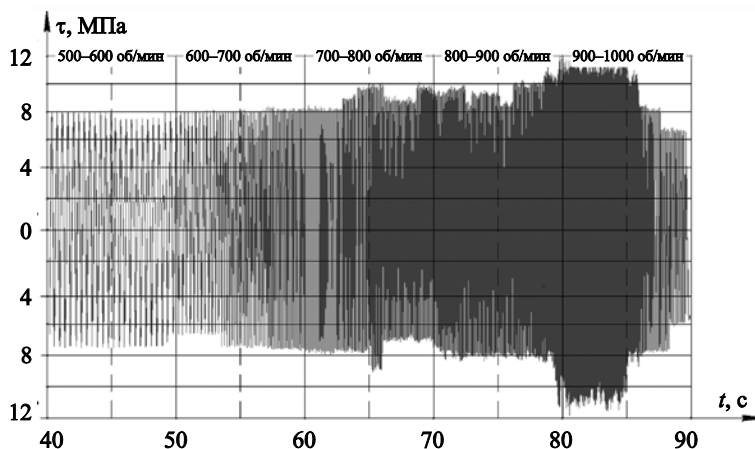
Fig. 4. Test equipment: 1 – PC with software; 2 – measuring strain-gage instrumentation; 3 – propeller shaft; 4 – V-belt drive

динамической неустойчивости валопровода при частоте вращения от 800 до 970 об/мин, сформированной различными видами колебаний:

1. В диапазоне от 800 до 900 об/мин скручивание вала сопровождалось повышенными осевыми деформациям, при последующем увеличении частоты вращения вала амплитуда колебаний упора гребного винта уменьшалась.
2. В диапазоне от 900 до 970 об/мин зарегистрировано два случая локальных скачкообразных изменений амплитуды поперечных колебаний.
3. В диапазоне от 890 до 950 об/мин действующие касательные напряжения увеличились более чем на 40 %.

Рис. 5. Тензограмма крутильных колебаний

Fig. 5. Strain-gage diagram of torsional vibrations



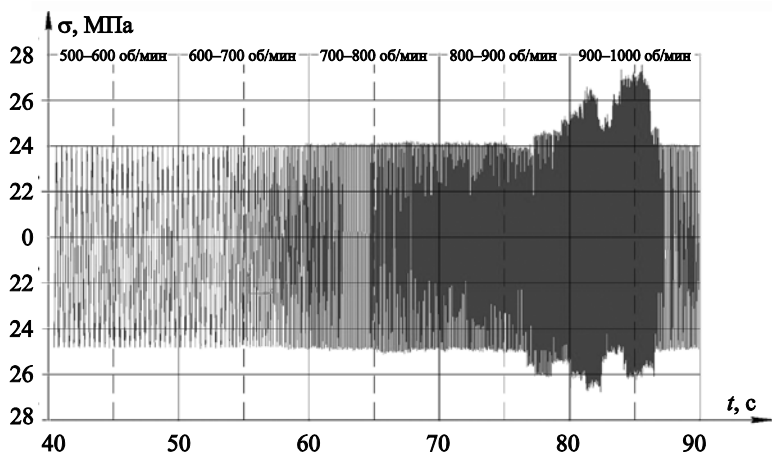


Рис. 6. Тензограмма поперечных колебаний

Fig. 6. Strain-gage diagram of transverse vibrations

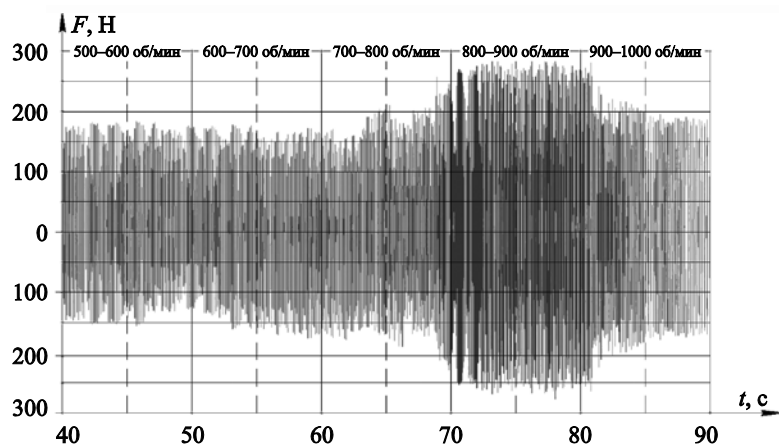


Рис. 7. Тензограмма осевых колебаний

Fig. 7. Strain-gage diagram of axial vibrations

При частоте вращения около 950 об/мин значения касательных и нормальных напряжений достигали максимальных значений. Результаты проведенного эксперимента также показали, что напряжения, обусловленные изгибом вала при поперечных колебаниях, достигали 27 МПа. Касательные напряжения при крутильных колебаниях не превышали 12 МПа. Таким образом, на одном участке нормальные напряжения составили порядка 74 % в совместном влиянии колебаний на циклическую прочность гребного вала. Полученные в работе [16] результаты о наибольшем влиянии касательных напряжений подтверждают необходимость регистрации параметров эквивалентного напряженного состояния.

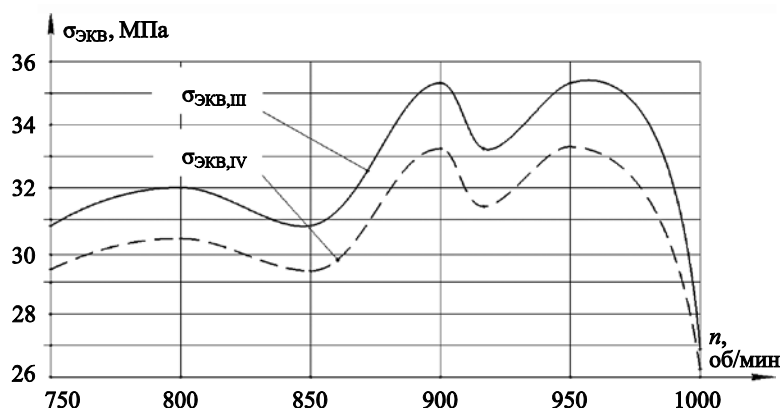
Для оценки напряженного состояния вала в области измерений построены графики развития эквивалентных напряжений (рис. 8) с использованием третьей и четвертой теории прочности, применимых к валам из пластичной стали.

Оценка эквивалентного напряженного состояния по теориям наибольших касательных напряжений и энергетической позволяет рассчитывать в заданных условиях эксплуатации остаточный ресурс с учетом количества изменений напряжений.

- Таким образом, проведенные работы позволили:
- Провести компоновку электронных компонентов и усовершенствовать специализированный программно-аппаратный комплекс Zetlab. Полученный измерительный комплекс отвечает требованиям для регистрации крутильных колебаний, а также адаптирован к регистрации параметров поперечных и осевых колебаний в режиме реального времени.
 - Спроектировать и построить экспериментальное маломерное судно, конструкция которого обеспечивает возможность проведения исследований влияния различных факторов на параметры крутильных, осевых и поперечных колебаний валопровода.

Рис. 8. Развитие эквивалентных напряжений: $\sigma_{\text{ЭКВ,III}}$ – в соответствии с третьей теорией прочности; $\sigma_{\text{ЭКВ,IV}}$ – в соответствии с четвертой теорией прочности

Fig. 8. Development of equivalent stresses: $\sigma_{\text{ЭКВ,III}}$ – as per maximum-shear theory of failure; $\sigma_{\text{ЭКВ,IV}}$ – as per Huber von Mises Hencky theory of failure



- Экспериментально подтвердить возможность возникновения связанных колебаний на определенных частотах вращения валопровода.

Следует отметить, что изменение параметров системы (зазора в дейдвудном подшипнике, нарушения работы топливной аппаратуры и прочих) может приводить не только к увеличению диапазонов частот вращения с динамической неустойчивостью, но и к росту действующих напряжений.

Полученные результаты и их анализ позволяют определить направления дальнейших исследований связанных колебаний валопроводов:

1. Разработка специализированного программного обеспечения с функционалом частотного анализа и фильтрации, позволяющего минимизировать влияние неточностей монтажа на показания тензорезисторов.
2. Модернизация измерительной аппаратуры для возможности регистрации параметров связанных колебаний в режиме реального времени на период межремонтного цикла натурного судна.
3. Разработка и внедрение инженерной методики расчета связанных колебаний при проектировании судов в дополнение к регламентируемым классификационными обществами расчетам парциальных колебаний.

Проведение исследовательских и опытно-конструкторских работ по этим направлениям с учетом имеющегося опыта регистрации колебаний позволит повысить надежность эксплуатируемых и вновь проектируемых судовых энергетических комплексов.

Заключение

Conclusion

Решение поставленных в работе задач позволило обеспечить проведение экспериментальных ис-

следований всех видов колебаний, возникающих в гребном вале экспериментального судна. Проведенный эксперимент показал, что при определенных условиях возможно возникновение областей динамической неустойчивости, характеризующихся комбинациями крутильных, поперечных и осевых колебаний.

Предложенные в работе последовательность и инструментарий для изучения связанных колебаний судовых валопроводов на основе динамических измерений являются приложениями к существующим экспериментальным методам.

По результатам анализа полученных экспериментальных данных сформулированы основные направления, развитие которых необходимо для повышения надежности судовых энергетических установок.

Список использованной литературы

1. Чура М.Н., Файвисович А.В. Эксплуатационные повреждения гребных валов // Транспортное дело России. 2011. № 11. С. 110–112.
2. Кушнер Г.А., Мамонтов В.А., Волков Д.А. Анализ причин повреждений и отказов судовых валопроводов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 33–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39.
3. Троицкий А.В., Чернышев А.А., Бухарина Г.И. Крутильные колебания в судовых валопроводах энергетических установок с упругими нелинейными элементами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спецвыпуск 1. С. 183–188. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-183-188.
4. Мартыанов В.В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского

- теплохода пр. P118 // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12, № 2. С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.
5. Исследование крутильных колебаний машинно-двигательного комплекса разъездного речного судна «РК-2091» проекта 376 / М.Н. Покусаев, В.А. Мамонтов, А.Р. Рубан [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1(43), Т. 4. С. 88–92.
 6. Лалин Ю.А., Герман А.П., Бурлакова Н.Н. Анализ методов расчета крутильных колебаний судовых валопроводов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 3(44). С. 71–79. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-7.
 7. О моделировании нагрузки гребных электродвигателей ледоколов при проведении стендовых и виртуальных испытаний систем электродвижения / Н.В. Васильев, И.М. Калинин, В.Н. Половинкин [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1(399). С. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30.
 8. Румб В.К., Хоанг В.Т., Серов А.В. Современный взгляд на осевые колебания валопроводов судовых пропульсивных установок // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. № 46–47. С. 82–86.
 9. Румб В.К., Арутюнян А.С. О необходимости расчета осевых колебаний судовых валопроводов // Морской вестник. 2009. № 2(30). С. 46–47.
 10. Кушнер Г.А., Мамонтов В.А. Влияние материала подшипника и зазора в дейдвудном устройстве на параметры поперечных колебаний модели валопровода судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-107-113.
 11. Автоматизация методики расчета собственной частоты поперечных колебаний гребного вала / В.А. Мамонтов, И.М. Абачаров, В.П. Булгаков, Г.А. Кушнер // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 1. С. 63–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-63-70.
 12. Троицкий А.В., Контиевская О.А. Динамическая прочность компактных резонирующих вибропоглотителей, применяемых в судовых валопроводных системах // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 3(401). С. 52–57. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-52-57.
 13. Румб В.К., Самсонов А.В. Основные положения и расчет крутильно-осевых колебаний валопроводов судовых дизельных установок // Морской вестник. 2004. № 2(10). С. 10.
 14. Румб В.К., Самсонов А.В. Расчет связанных крутильно-осевых колебаний валопроводов судовых дизельных установок методом главных координат // Труды НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова. 2003. № 1(1). С. 61–64.
 15. Waal R.J.O. de, Bekker A., Heyns P.S. Bi-Polar Full-Scale Measurements of Operational Loading on Polar Vessel Shaft-Lines // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'17). Red Hook : Curran, 2018. Vol. 1. P. POAC17-074, p. 589–606.
 16. Экспериментальное исследование поперечных и крутильных колебаний валопроводов буксира типа ОТ-2400 / В.А. Мамонтов, А.Н. Глухов, М.М. Горбачев, Г.А. Кушнер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. № 46/47. С. 86–88.
 17. Ч. IV. Энергетическая установка и системы // Правила классификации и постройки судов (ПКПС) : по сост. на 28.08.2023 / Российский Речной Регистр. Москва, 2019. Разд. pag. [171 с.].
 18. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII. Механические установки : НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства / Санкт-Петербург, 2023. С. 70–81.
 19. DNV Rules for classification: ships // Part 4: Systems and Components. – Ed. July 2021, P. 10–28.
 20. On-Shaft Wireless Vibration Measurement Unit and Signal Processing Method for Torsional and Lateral Vibration / I. Koene, S. Haikonen, Tiainen [et al.] // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Т. 27, № 6. P. 5857–5868. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3189954.
 21. Kushner G.A. Implementation of Software for Technical Diagnostics of Shafts Based on Vibration Analysis // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). Piscataway : IEEE ; Red Hook : Curran, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976859.

References

1. Chura M.N., Fayvisovich A.V. Operational damage to propeller shafts // Transport business of Russia. 2011. No. 11. P. 110–112 (in Russian).
2. Kushner G.A., Mamontov V.A., Volkov D.A. Analysis of the causes of damage and failure of ship shafting // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology. 2021. No. 3. P. 33–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39 (in Russian).

3. Troitsky A.V., Chernyshev A.A., Bukharina G.I. Elastic non-linear torsions in shaft lines of marine power plants // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019. Special Issue 1. P. 183–188. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-183-188 (in Russian).
4. Martyanov V.V. Assessing the threat of resonant vibrations on the example of calculating torsional vibrations of a ship's shafting of a passenger motor ship pr. R118 // Bulletin of the State University of Sea and River Fleet Admiral S.O. Makarov. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 359–368 DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368 (in Russian).
5. Investigation of torsional vibrations of the propulsion complex of the crew river vessel "RK-2091" of project 376 / M.N. Pokusaev, V.A. Mamontov, A.R. Ruban [et al.] // Marine Intelligent Technologies. 2019. No. 1(43), Vol. 4. P. 88–92 (in Russian).
6. Lapin Yu.A., German A.P., Burlakova N.N. Analysis of methods for calculating torsional vibrations of ship shafting // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2020. No. 3(44). P. 71–79. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-7 (in Russian).
7. On modeling the load of icebreaker propulsion motors during bench and virtual tests of electric propulsion systems / N.V. Vasilyev, I.M. Kalinin, V.N. Polovinkin [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 1(399). P. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30 (in Russian).
8. Rumb V.K., Hoang V.T., Serov A.V. A modern view of the axial vibrations of the shaft lines of ship propulsion systems // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2017. No. 46–47. P. 82–86 (in Russian).
9. Rumb V.K., Arutyunyan A.S. On the need to calculate axial vibrations of ship shafting // Morskoy Vestnik (Sea Herald). 2009. No. 2(30). P. 46–47 (in Russian).
10. Kushner G.A., Mamontov V.A. Influence of the bearing material and clearance in the stern gear on the parameters of transverse oscillations of the ship's shafting model // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology. 2019. No. 4. P. 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-107-113 (in Russian).
11. Automation of the method for calculating the natural frequency of the transverse oscillations of the propeller shaft / V.A. Mamontov, I.M. Abacharaev, V.P. Bulgakov, G.A. Kushner // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology. 2019. No. 1. P. 63–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-63-70 (in Russian).
12. Troitsky A.V., Kontievskaya O.A. Dynamic strength of compact resonating vibration absorbers used in ship shafting systems // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 3(401). P. 52–57. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-52-57 (in Russian).
13. Rumb V.K., Samsonov A.V. Basic provisions and calculation of torsional-axial oscillations of shaft lines of marine diesel installations // Morskoy Vestnik (Sea Herald). 2004. No. 2. P. 10 (in Russian).
14. Rumb V.K., Samsonov A.V. Calculation of coupled torsional-axial vibrations of shafting of marine diesel installations by the principal coordinates method // Proceedings of acad. A.N. Krylov NTO shipbuilders. 2003. Vol. 1(1). P. 61–64 (in Russian).
15. Rosca de Waal, Anriëtte Bekker, Heyns Stephan. Bi-Polar Full-Scale Measurements of Operational Loading on Polar Vessel Shaft-Lines // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'17). Busan, Korea, 2017.
16. Experimental study of transverse and torsional vibrations of the shaft lines of the OT-2400 type tug / V.A. Mamontov, A.N. Glukhov, M.M. Gorbachev, G.A. Kushner // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2017. No. 46/47. P. 86–88.
17. Part IV. Powerplant installation and systems// Rules of classification and construction of ships (PKPS): as per 28.08.2023 / Russian River Register. Moscow, 2029. Section pag. [p. 171] (in Russian).
18. Rules for the classification and construction of sea vessels. Part VII: Mechanical installations. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2023. P. 70–81.
19. Rules for Classification: Ships: DNV-RU-SHIP. Pt. 4. Systems and components / Det Norske Veritas. Hovik : DNV, 2021. P. 10–28.
20. Koene I., Haikonen S., Tiainen T., Keski-Rahkonen J., Manngård M., Viitala R. On-Shaft Wireless Vibration Measurement Unit and Signal Processing Method for Torsional and Lateral Vibration // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Vol. 27, No. 6. P. 5857–5868. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3189954.
21. Kushner G.A. Implementation of Software for Technical Diagnostics of Shafts Based on Vibration Analysis // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). Piscataway : IEEE ; Red Hook : Curran, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976859.

Сведения об авторе

Кушнер Гурий Алексеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный тех-

нический университет». Адрес: 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1. Тел.: +7 (8512) 614-190. E-mail: guriy.kushner@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9390-9824>.

About the author

Guriy A. Kushner, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering, Astrakhan State Technical University. Address: 16, Tatisheva st., Astrakhan, Russia, post code 414056. Tel.: +7 (8512) 614-190. E-mail: guriy.kushner@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9390-9824>.

Поступила / Received: 30.08.23
Принята в печать / Accepted: 01.12.23
© Кушнер Г.А., 2023