

УДК 629.553+629.5.015.5  
EDN: TVQJCT

И.М. Белов, Н.В. Васильев, С.Г. Зенков  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## СНИЖЕНИЕ ВИБРАЦИИ – ПУТЬ К ПОВЫШЕНИЮ КОМФОРТА НА КРУИЗНОМ СУДНЕ

**Объект и цель научной работы.** Исследуются вибрационные процессы при движении круизного судна с винторулевыми колонками по стесненному извилистому фарватеру. Анализируются причины нежелательных вибрационных явлений, влияющих на комфорт пассажиров, для выработки рекомендаций по их устранению или снижению до приемлемого уровня.

**Материалы и методы.** В работе использованы материалы комплексных натурных испытаний круизного судна с двумя винторулевыми колонками (ВРК). Применяются традиционные методы анализа вибрации и совместный анализ параметров вибрации корпусных конструкций с параметрами движения судна и работы его движителей.

**Основные результаты.** Описано возникновение и развитие нежелательных вибрационных явлений при условиях и режимах эксплуатации круизного судна, характерных для внутренних водных путей России. Выявлены основные причины нежелательных вибрационных явлений на круизном судне с двумя ВРК. Рассмотрены пути снижения вибрации в местах пребывания пассажиров в зависимости от причин конкретных вибрационных явлений. Показана роль комплексных натурных испытаний как одного из методов решения наукоемких задач, возникающих при сдаточных испытаниях или в ходе эксплуатации судна.

**Заключение.** При эксплуатации круизного судна в определенных условиях возникают вибрации, опасные для судна, но вызывающие дискомфорт у пассажиров. В рамках комплексных натурных испытаний на круизном судне выявлены внутренние и внешние источники вибрации. Если первые источники вполне традиционны и снижаются конструктивными мероприятиями, то вторые имеют более сложную природу и методы борьбы с ними также более сложны. Помочь устранить проблему может интеллектуальная система управления движением судна. Авторы убеждены, что для эффективного выявления и решения указанных проблем комплексные испытания по индивидуально разработанной программе и методике следует включать в программу приемо-сдаточных испытаний речных круизных судов, особенно в случае предъявления повышенных требований к комфорту.

**Ключевые слова:** круизное судно, винторулевая колонка, обитаемые помещения, вибрация, комплексные натурные испытания.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 629.553+629.5.015.5  
EDN: TVQJCT

I.M. Belov, N.V. Vasilyev, S.G. Zenkov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## VIBRATION MITIGATION IN COMFORT IMPROVEMENT OF CRUISE VESSELS

**Object and purpose of research.** This paper discusses vibration processes aboard a cruise vessel with pod propulsion moving along a strait and winding fairway. It analyses the reasons of undesirable vibrations affecting passenger comfort, to give recommendations on how to reduce them to acceptable level or eliminate them altogether.

**Materials and methods.** The authors rely on the results of integrated full-scale trials for a cruise vessel with two pod propulsion units. The paper follows traditional methods of vibration analysis, investigating hull vibrations in their interconnection with the parameters of ship movement and operation of its propulsors.

**Main results.** The paper describes generation and development of undesirable vibrations aboard cruise ships in typical conditions of Russian inland waterways. It identifies the main reasons for undesirable vibrations aboard a cruise ship with two

*Для цитирования:* Белов И.М., Васильев Н.В., Зенков С.Г. Снижение вибрации – путь к повышению комфорта на круизном судне. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 122–135.

*For citations:* Belov I.M., Vasilyev N.V., Zenkov S.G. Vibration mitigation in comfort improvement of cruise vessels. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 122–135 (in Russian).

pod propulsion units. It also discusses the ways towards vibration mitigation in passenger areas with respect to specific vibration phenomena and their reasons. It highlights the importance of integrated full-scale trials of the ship as one of the ways to solve science-intensive challenges that arise in the process of ship acceptance tests or during its service.

**Conclusion.** Cruise ship operation might be accompanied by short-term vibration safe for the ship but disturbing for its passengers. As part of integrated full-scale trials of the ship, the testing team managed to identify both internal and external vibration sources. The internal ones were quite expectable, so their vibration can be mitigated through structural design measures. Meanwhile, external vibration sources and the ways to mitigate them proved a more difficult challenge. Here, an artificial intelligence-based system of ship control could be an answer. The authors are convinced that in order to effectively identify and solve these challenges, a tailor-made set of corresponding integrated tests should become a part of standard delivery-acceptance testing program for river cruise ships, especially those bound to comply with high requirements to passenger comfort.

**Keywords:** cruise ship, pod propulsion unit, living spaces, vibration, integrated full-scale trials.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Сокращения и обозначения:

ВРК – винторулевая колонка;  
ГВ – гребной винт;  
ГЭД – гребной электродвигатель;  
COG – путевой угол, град. («+» по часовой стрелке от северного меридиана);  
DHDT – скорость поворота корпуса судна, град/мин («+» по часовой стрелке);  
DPT – глубина под килем;  
DRF – угол дрейфа судна, град. («+» на правый борт (ПБ));  
HDT – курс судна, град. («+» по часовой стрелке от северного меридиана);  
LBRK – расстояние между осью баллера ВРК и центром поворота корпуса судна;  
NL – частота вращения ГВ ВРК левого борта (ЛБ);  
NR – частота вращения ГВ ВРК правого борта;  
RAL – угол перекладки ВРК ЛБ, град. («+» на ЛБ);  
RAR – угол перекладки ВРК ПБ, град. («+» на ПБ);  
SOG – скорость фазового центра антенны спутниковой навигационной системы (СНС), уз;  
TFA – угол обтекания кормы внешним потоком, град. («+» поток в ПБ);  
TFAL – угол скоса внешнего ВРК ЛБ, град. («+» поток справа);  
TFAR – угол скоса внешнего потока ВРК ПБ, град. («+» поток справа);  
TTV – траверзная скорость кормы, м/с;

## Введение

### Introduction

Особенностью эксплуатации круизных судов на внутренних водных путях является длительное плавание по извилистым стесненным фарватерам малых рек. В этих условиях круизное судно должно обладать хорошей маневренностью и поддерживать заданную среднейрейсовую скорость.

Одним из технических решений, применяемых на круизных судах, является использование полно-

поворотных винторулевых колонок (ВРК), которые вместе с носовым подруливающим устройством (НПУ) обеспечивают непревзойденную поворотливость практически в любых условиях. В сравнении с традиционными гребными винтами (ГВ) кормовая оконечность судов с ВРК более плоская с меньшим числом и эффективностью стабилизирующих поток элементов. Поэтому при прочих равных условиях судно с ВРК менее устойчиво и для удержания его на курсе ВРК приходится перекладывать чаще, чем рули на судах с традиционными ГВ. Вследствие этого ГВ на ВРК чаще работают в косом потоке и с большими углами скоса, чем на судах с традиционными ГВ.

*Особенность речных круизных судов с полноповоротными винторулевыми колонками – вибрация.*

Известно, что при движении судна ГВ является одним из основных источников вибрации и натекающий на ГВ поток – определяющий фактор его виброактивности. Поэтому применение ВРК для повышения маневренности судна одновременно создает риски повышения вибрации. Это необходимо учитывать при проектировании судна с ВРК, предусматривая конструктивные решения и иные мероприятия для устранения негативных последствий роста виброактивности движителя. Кроме того, при проектировании необходимо обращать особое внимание на виброизоляцию жилых помещений и зон отдыха, а также избегать их расположения вблизи источников вибрации.

В процессе эксплуатации одного из круизных судов при резких маневрах выявились вибрации в кормовой оконечности судна, которые распространялись по всему судну и вызывали беспокойство и жалобы пассажиров. Многие уникальные круизы данного судна включают малые реки, фарватеры которых избилуют извилистыми стесненными участками. Прохождение таких участков – характерная особенность эксплуатации данного круизного судна. При этом для снижения вибрации

круизное судно значительно сбрасывает обороты ГВ ВРК, и скорость на таких участках резко падает.

Решая проблему вибрации при резких маневрах, экипаж круизного судна встает перед другой проблемой: снижение заданной средней скорости и нарушение заявленного графика круиза. Таким образом, в процессе эксплуатации круизного судна возникла наукоемкая проблема: обеспечить комфортную вибрационную обстановку в местах пребывания пассажиров без потери средней скорости хода на сложных участках маршрута.

## Комплексные натурные испытания как метод исследования вибрационных процессов на судне

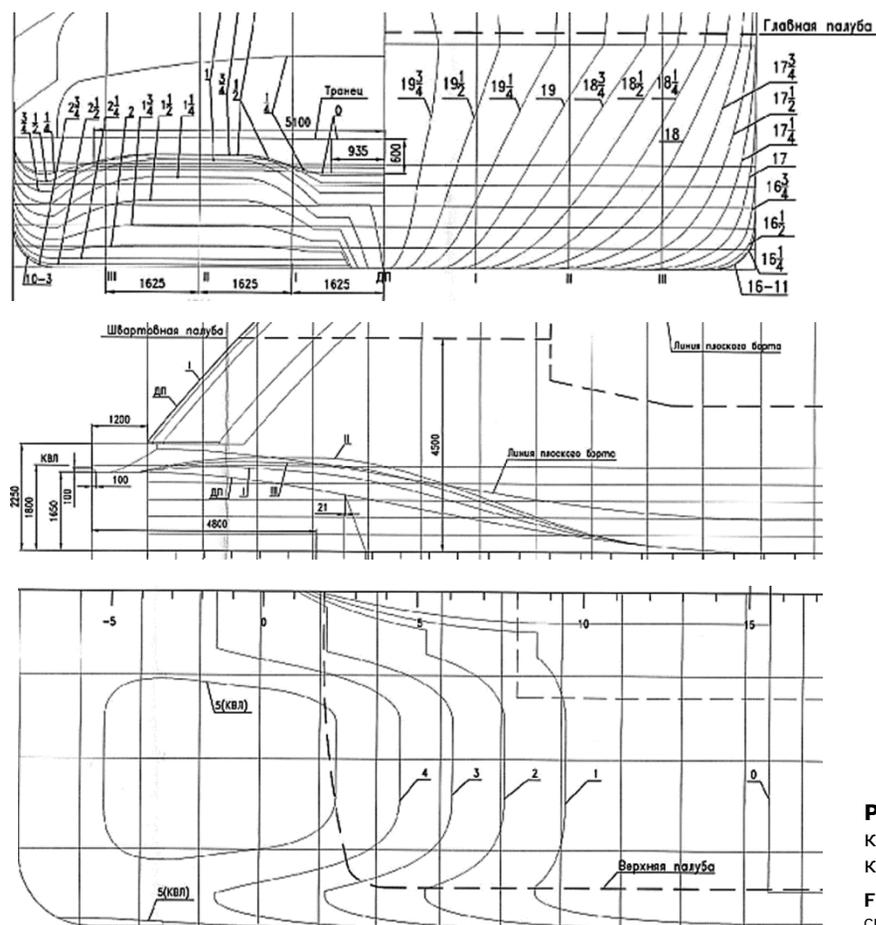
Integrated trials as ship vibration research method

Ключевой особенностью комплексных натурных испытаний (КИ) судна является участие специали-

стов по разным разделам теории корабля [1]. Более сложная организация таких испытаний позволяет подойти к решению сложной наукоемкой проблемы одновременно с разных сторон, совмещая различные средства и методы испытаний, привлекая более обширный практический опыт различных специалистов.

При возникновении наукоемкой проблемы первая задача исследователей – собрать информацию. К сожалению, исследователи часто сталкиваются с недостатком объективных данных о проблеме и вынуждены планировать свою работу на основе субъективных оценок экипажа и личного опыта. Поэтому главной целью первого этапа КИ почти всегда является сбор объективных данных о проблеме.

Успех этого этапа во многом зависит от опыта привлеченных исследователей: рабочие гипотезы исследуемого явления, перечень влияющих на явление параметров, средства и методы объективного контроля, режимы движения судна и работы его



**Рис. 1.** Форма обводов кормовой оконечности речного круизного судна

**Fig. 1.** Stern lines of river cruise vessel

механизмов, при которых исследуемое явление воспроизводится в различных вариантах, – от этого прямо зависят информативность первого этапа КИ и перспективы и сроки решения проблемы. Качественная программа-методика КИ уже на первом этапе позволяет выявить причины исследуемых явлений и рекомендовать пути их решения, так что последующие этапы КИ проводятся либо для уточнения рекомендаций, либо для проверки эффективности уже принятых мер.

Большой объем разнородной объективной информации, накопленной в процессе КИ, не только позволяет решить актуальные проблемы конкретного судна, но и является ценным информационным ресурсом, необходимым для проведения различных научных исследований, в т.ч. вибрации судна.

Обследованное круизное судно имеет традиционную для речных судов кормовую оконечность, адаптированную для установки двух ВРК фирмы Shottel с 3-лопастными ГВ «тандем» и среднее расположение машинного отделения. Форма обводов кормовой оконечности судна и общий вид ВРК показаны на рис. 1 и 2. В качестве силовой установки используются четыре главных дизель-генератора (ГДГ) фирмы Caterpillar. Жилые помещения расположены на двух палубах в носу от машинного отделения, в то время как часть зон отдыха расположена непосредственно над ним.

Опыт испытаний моделей речных судов в мелководном опытовом бассейне свидетельствует, что скеговая форма кормы, показанная на рис. 1, способствует образованию крупных скуловых вихрей, сходящих вслед за корпусом отчетливо видной на поверхности воды дорожкой Кармана. Наполовину погруженный кринолин способствует формированию локальных отрывов на транце, которые на мелководье также имеют тенденцию к образованию Кармановской дорожки [2]. Эти факторы усиливают собственную неустойчивость, характерную для судов с ВРК, и обостряют проблему виброактивности ГВ.

При планировании КИ круизного судна ставилось три задачи:

1. Уточнение характерных точек корпуса судна для измерений вибрации.
2. Выявление режимов работы судна с наибольшими уровнями вибрации.
3. Сбор объективных данных для анализа зависимости параметров вибрации в характерных точках корпуса от режима движения судна и работы его механизмов и движителей.



**Рис. 2.** Винторулевая колонка с гребными винтами «тандем»

**Fig. 2.** Pod propulsion units with tandem propellers

Программа-методика КИ предусматривала вариацию параметров, которые могут влиять на вибрацию, обусловленную режимом работы ГВ ВРК, а именно:

- частота вращения ГВ;
- скос натекающего на ГВ потока;
- углы атаки лопастей (гидродинамическая нагрузка) ГВ;
- неоднородность поля скоростей за корпусом;
- заглублиение ГВ под свободную поверхность;
- глубина под килем.

Время и место КИ диктовались условиями их проведения в окне между эксплуатационными циклами, поэтому пришлось урезать объем испытаний и проводить их на реке при малых глубинах, где на движение судна влияют ветер (сила и направление которого в значительной мере зависят от рельефа местности) и течение (скорость и направление которого определяются изменчивым уклоном и рельефом речного русла). Оба эти фактора приводят к флуктуациям поворачивающего момента, который нужно компенсировать переключкой ВРК. Действие этих факторов усугубляет характерную для таких судов собственную неустойчивость на курсе, которая особенно усиливается на мелководье.

В таких условиях даже на прямолинейных участках реки с относительно ровным дном движение судна, строго говоря, не является установившимся. На узком речном фарватере ряд запланированных в КИ маневров выполнять было опасно. При движении по реке внешние условия постоянно меняются и повторение маневров практически невозможно. По существу, КИ данного круизного

судна проводились в режиме эксплуатационного мониторинга, т.е. судно двигалось по маршруту, выполняя режимы и маневры, предписанные программой-методикой КИ, при этом непрерывно и синхронно велись записи всех параметров. При обработке результатов испытаний границы каждого режима и маневра уточнялись.

При движении по реке авторулевой режим не используется, управление движением судна осуществляется в ручном режиме двумя ВРК, работающими синхронно: одна комбинированная рукоятка задает для обеих ВРК одинаковые значения угла поворота и частоты вращения ГВ. На стопе набор угловой скорости ВРК от 0 до максимального значения  $16,5^\circ/\text{с}$  занимает около 2 с, за это время ВРК поворачивается на угол около  $17^\circ$ . При подходе к заданному значению примерно за  $7^\circ$  угловая скорость начинает снижаться, и величина перерегулирования составляет  $\sim 1,5^\circ$ . Сброс угловой скорости с максимума до нуля с выходом на заданный угол поворота ВРК выполняется за 3 с.

Расположенные в рулевой рубке средства управления ВРК в руке лежат удобно, но для управления в сложных навигационных условиях не приспособлены:

1. Управление углом поворота ВРК и частотой вращения гребных винтов сосредоточено в одной комбинированной рукоятке, так что одновременное изменение обоих параметров крайне затруднительно и не практикуется.
2. Тактильный отклик есть только на углах поворота ВРК  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ .
3. Минимальное деление шкалы поворота ВРК соответствует  $7,5^\circ$ , длина соответствующей дуги составляет около 5 мм, поэтому перекладка ВРК на угол менее  $7,5^\circ$  требует сосредоточенности и опыта.

## **Анализ результатов комплексных испытаний традиционными методами изучения вибрации**

Analysis of integrated test data obtained as per traditional methods of vibration studies

Измерения вибрации при движении судна производились синхронно с помощью стационарно установленных акселерометров на фундаментах ВРК, поперечных переборках корпуса, а также на настилах палуб в шести каютах и в общественных помещениях: ресторане, гостиной и тренажерном зале.

Отдельным пунктом программы-методики являлись исследования вибрации на стоянке в поме-

щениях верхней палубы, расположенных над машинным отделением. Как отмечалось выше, программа-методика КИ предусматривала измерения уровней вибрации на прямом курсе, которые ниже условно называются установившимися, и в неуставившихся режимах (зигзаги), сопровождавшихся перекадками ВРК на большие углы.

## **Ступенчатый подъем оборотов винторулевой колонки на прямом курсе**

Step-by-step increase of pod unit RPM in straight running

В результате измерений определены общие частотно-корректированные уровни виброускорений (ЧКУ), в дБ относительно  $3 \times 10^{-4} \text{ м/с}^2$  в частотном диапазоне 1–80 Гц, являющиеся контролируемыми параметрами вибрации в обитаемых помещениях в соответствии с действующими санитарными правилами [3]. Анализ полученных данных позволяет заключить следующее:

- источниками вибрации в жилых помещениях являются работающие гребные винты, а в общественных помещениях, в силу их расположения вблизи машинного отделения, – работающие дизель-генераторы;
- ЧКУ вибрации имеют тенденцию к возрастанию при увеличении частоты вращения гребных винтов;
- ЧКУ ускорений на всех установившихся режимах прямого хода не превышают 35 дБ в каютах и 45 дБ в общественных помещениях.

Эти значения удовлетворяют требованиям российских санитарных правил для объектов водного транспорта СП 3650-20 (47 дБ для кают и 50 дБ для салонов и общественных помещений). Нормирование вибрации на неуставившихся (маневренных) режимах, вследствие их кратковременности, не предусмотрено. Это обстоятельство формально обеспечивает успешную сдачу судна заказчику, однако, не учитывая особенностей эксплуатации речных судов на извилистых стесненных фарватерах из-за часто возникающей интенсивной нестационарной вибрации, порождает в дальнейшем негативное восприятие пассажирами условий обитания.

## **Движение на неуставившихся режимах типа «зигзаг»**

Unsteady movement conditions (zig-zag)

При движении «зигзагами» (описание режимов дано в параграфе «Анализ неуставившихся режи-

мов движения») в обитаемых помещениях наблюдается нестационарная вибрация при изменяющихся в процессе маневров оборотах. При этом мгновенные значения лопастных компонент растут при снижении оборотов, достигая максимума в его конце, и снижаются при увеличении оборотов. Анализ этих данных позволяет заключить, что увеличение средних значений виброускорений по совокупности «зигзагов» (математических ожиданий случайных виброускорений), по сравнению со стационарным движением, на малых оборотах в конце снижения оборотов составляет 10 и более раз.

Особого рассмотрения требует анализ вибрации в гостиной. Установлено, что на установившихся режимах, в отличие от остальных помещений, в гостиной основной вклад в общий уровень вибрации вносят компоненты, вызванные работой ГДГ на частотах 12,5 и 25 Гц. Очевидно, что вызываемый этой вибрацией дискомфорт в значительной мере обусловлен расположением помещений, предназначенных для отдыха пассажиров, в непосредственной близости от источников вибрации.

Основным способом передачи этой вибрации на перекрытие верхней палубы, как правило, является распространение через подвесы системы газовыхлопа. Крепление системы газовыхлопа непосредственно к жилой палубе противоречит документу [4] по обеспечению качественной виброизоляции вышележащих перекрытий, который рекомендует осуществлять подвеску к промежуточной системе перекрестных балок, в свою очередь опертых на переборки и пиллерсы.

## Исследование возможностей снижения вибрации в помещениях верхней палубы, вызванной работой дизель-генераторов

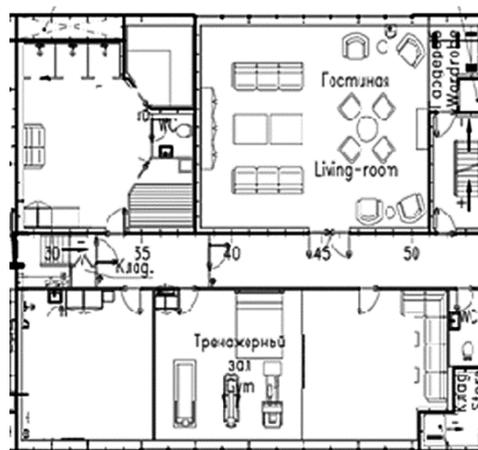
Ways to reduce vibrations in upper-deck spaces due to operation of diesel generators

В машинном отделении расположены четыре ГДГ с системой газовыхлопа (рис. 3). На ходу одновременно работают три из них. Гостиная и тренажерный зал расположены на верхней палубе непосредственно над машинным отделением.

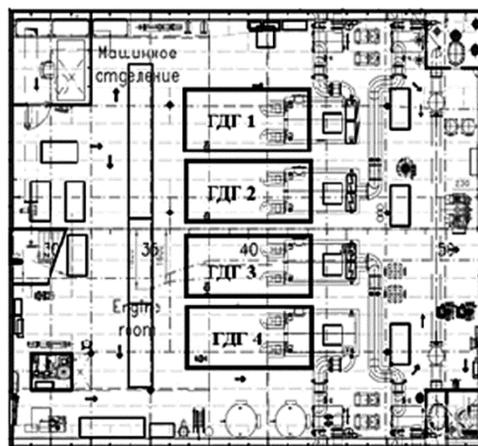
Первым этапом работы являлось определение уровней вибрации при совместной работе трех ГДГ, их распределения по площади помещения, а также оценка спектрального состава. Как видно из графика на рис. 4, в спектрах вибрации помещений выделяются дискретные, соответствующие частоте враще-

ния коленвалов ГДГ и ее кратных порядков: 12,5, 25, 50 Гц. Также прослеживаются широкие зоны увеличения вибрации, соответствующие частотам совместных свободных колебаний палубного перекрытия и навешенных масс системы газовыхлопа (37, 45 Гц), что приводит к повышению ЧКУ.

Распределение уровней вибрации по площади помещений на частотах 12,5 и 25 Гц, совпадающих с частотами двух первых гармоник частоты вращения валов ГДГ, приведено на рис. 5 (см. вклейку). Исходя из представленных данных, можно заключить, что на этих частотах зоны максимальных уровней вибрации охватывают значительные площади перекрытия, в то время как на частоте 50 Гц (рис. 6, см. вклейку) вибрация локализована в ме-



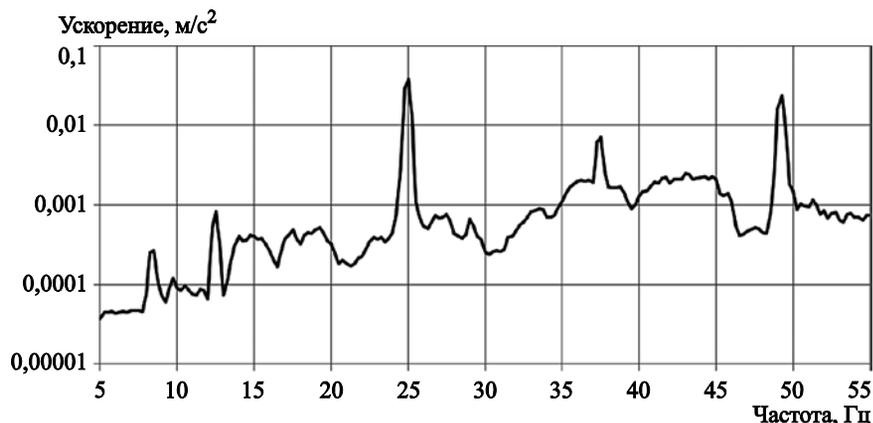
а)



б)

Рис. 3. Объекты исследования: а) верхняя палуба; б) главная палуба

Fig. 3. Test objects: a) upper deck; b) main deck



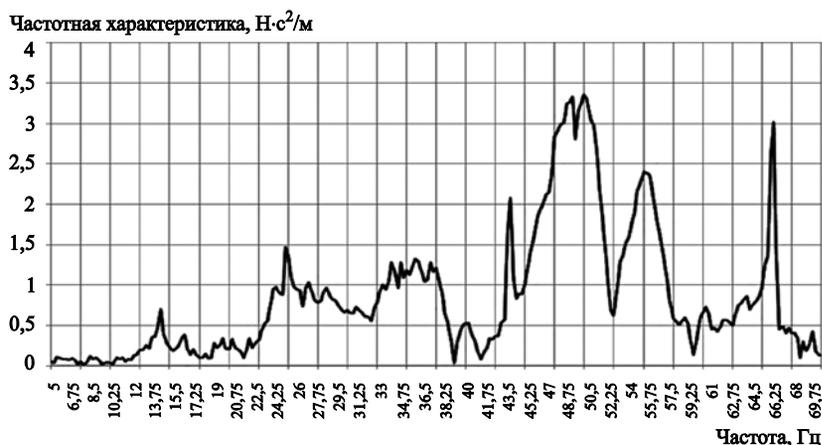
**Рис. 4.** Спектральный состав вибрации в помещениях верхней палубы

**Fig. 4.** Vibration spectrum in upper-deck spaces

стах расположения элементов системы охлаждения газовыхлопа у бортов.

Причиной высоких уровней вибрации палуб являются резонансные колебания, обусловленные совпадением частот возмущающих сил, вызванных работой оборудования (в данном случае ГДГ) с собственными частотами перекрытия или его от-

дельных участков, а также упруго скрепленных с ним масс. С целью определения значений указанных собственных частот были проведены частотные испытания палубы при импульсном возбуждении вибрации с помощью ударного молотка. Полученные частотные характеристики перекрытий гостинной и тренажерного зала представлены на рис. 7,



**Рис. 7.** Частотная характеристика перекрытия гостинной

**Fig. 7.** Grillage frequency characteristic – Lounge



**Рис. 8.** Частотная характеристика перекрытия тренажерного зала

**Fig. 8.** Grillage frequency characteristic – Gym

8, а соответствующие формы колебаний – на рис. 9, 10 (см. вклейку). В качестве фона форм колебаний для наглядности использована схема машинного отделения.

Анализ построенных частотных характеристик и форм колебаний объясняет резонансное увеличение вибрации на 2-й гармонике частоты вращения валов ГДГ.

Проведенные измерения перепада амортизации подвесов элементов системы газовыхлопа показали, что виброизоляция палубы также не обеспечена. Элементы системы газовыхлопа ГДГ можно разделить на две группы:

- глушители – блоки, расположенные непосредственно у каждого ГДГ;
- система охлаждения – блоки, расположенные у бортов.

Результаты частотных испытаний указанных элементов показали наличие ярко выраженных резонансных зон в районе 14, 20, 25 и 50 Гц, близких к частотам основных порядков, генерируемых ГДГ, что приводит к усилению передачи вибрации на палубу через крепление. Сопоставление уровней вибрации обеих групп элементов показало, что ускорения на блоках системы охлаждения в 10–100 раз больше, чем на блоках глушителей. Учитывая, что масса блоков глушителей и охлаждения примерно одинаковая, можно сделать вывод о таком же соотношении инерционных усилий, генерируемых ими на палубное перекрытие.

Предлагаемые мероприятия по снижению вибрации сводятся к установке дополнительных пиллерсов в районах с максимальными уровнями вибрации, а также увеличению виброизолирующих свойств подвесов.

## Совместный вибрационный и гидродинамический анализ результатов комплексных испытаний круизного судна

Joint analysis (vibrations and hydrodynamics) of integrated test data for cruise ship

При работе ГВ ВРК вибрация корпусных конструкций возбуждается двумя путями: пульсацией сил и моментов на гребном валу и пульсацией давлений на обшивке корпуса над ГВ. В обоих случаях вибрационные нагрузки воспринимают фундаменты ВРК. Для анализа вибрационных процессов, вызванных работой ГВ, выбраны две точки измерений на фундаментах ВРК ПБ и ЛБ (рис. 11). В каждой точке измерялись две компоненты виброускорений: вертикальная и траверзная.

Распределение вибрационной энергии по компонентам и по частотам сложным образом зависит от характера возбуждения и от частотных характеристик корпусных конструкций. Общая интенсивность вибраций оценивалась интегральным параметром:

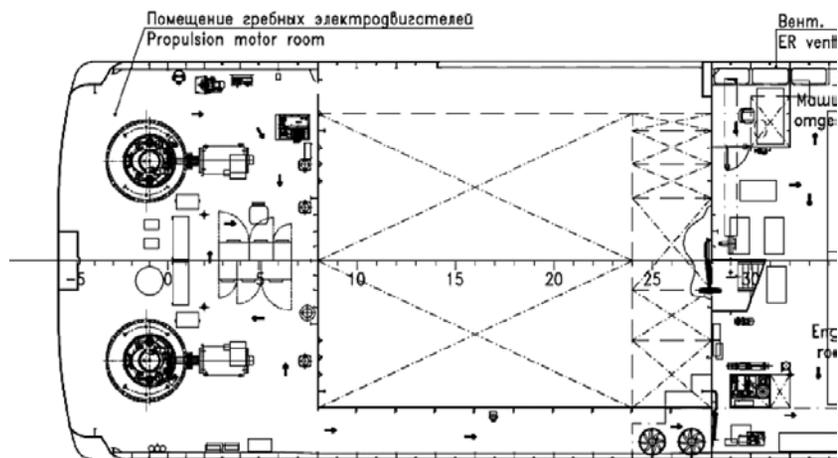
$$A = \sqrt{(A_Z)^2 + (A_Y)^2}, \quad (1)$$

где  $A_Z$  и  $A_Y$  – вертикальная и траверзная компоненты виброускорений на лопастной частоте.

## Анализ прямолинейных установившихся режимов движения

Analysis of movement conditions (steady straight running)

Анализ установившихся режимов движения при различных частотах вращения ГВ ВРК показывает,



**Рис. 11.** Точки контроля вибрации на фундаментах винторулевых колонок  
**Fig. 11.** Vibration measurement points at foundations of pod units

что для удержания курса размах задаваемых углов перекадки ВРК в среднем составил  $16^\circ$  (максимум  $27^\circ$ ). При этом размах фактических углов перекадки ВРК составил  $13^\circ$  (максимум  $24^\circ$ ). Столь большие углы перекадки ВРК обусловлены речными условиями, особенностями системы управления ВРК и курсовой неустойчивостью судна, которая проявляется в быстром нарастании скорости поворота, размах которой в среднем составил 28 град/мин (максимум 44 град/мин). С ростом частоты вращения ГВ ВРК суммарные виброускорения  $A$  на фундаментах ВРК растут, не превышая  $0,07 \text{ м/с}^2$ . На рис. 12 (см. вклейку) приведены основные параметры движения судна на одном из установившихся режимов.

### **Анализ неустановившихся режимов движения**

#### **Analysis of unsteady movement conditions**

На рис. 13 (см. вклейку) приведены интегральные параметры  $A$  виброускорений на фундаментах обеих ВРК для неустановившихся режимов движения судна в сравнении с максимальным уровнем параметра  $A$  для установившихся режимов. Видно, что при разгоне в штатном режиме пиковые значения  $A$  могут в 2–3 раза превышать их максимальные значения на установившемся прямолинейном режиме движения. Детальный анализ разгонов и выбегов судна позволяет заключить, что максимальные значения  $A$  могут быть обусловлены не только ростом углов атаки лопастей ГВ при разгоне, но и перекадками ВРК для удержания курса в сочетании с неблагоприятными флуктуациями поля скорости в кормовой оконечности.

Наибольшие значения  $A$  наблюдались при выполнении маневров «зигзаг». Они были выполнены не по схеме, рекомендованной для маневренных испытаний (на реке для этого мало места), а для демонстрации эксплуатационных режимов работы судна и основных его механизмов при движении по извилистым стесненным фарватерам малых рек. В ходе КИ было выполнено три маневра «зигзаг»:

- по течению при основной посадке и синхронном управлении обеими ВРК;
- против течения при уменьшенной посадке и синхронном управлении обеими ВРК;
- против течения при уменьшенной посадке и независимом управлении ВРК так, что перекадывалась только внутренняя ВРК, а внешняя ВРК удерживалась в ДП.

Для всех «зигзагов» был рекомендован угол перекадки ВРК  $45^\circ$ . Однако и задаваемые, и фактические углы перекадки ВРК были заметно выше, иногда превышая  $60^\circ$ . Связано это прежде всего с отмеченными выше эргономическими особенностями средств управления ВРК и условиями движения по фарватеру: на реке рулевому сложно делить свое внимание между окружающей обстановкой и шкалами на комбинированной рукоятке управления ВРК, а тактильной информации (не требующей непосредственного визуального контроля) комбинированная рукоятка управления ВРК дает недостаточно. Все перекадки ВРК выполнялись сразу на значительные углы, поэтому, как правило, при каждой перекадке достигалась максимальная угловая скорость поворота ВРК.

Все «зигзаги» выполнены при частоте вращения ГВ ВРК, близкой к максимальной. При больших углах перекадки ВРК мощности гребного электродвигателя (ГЭД) не хватает для удержания частоты вращения ГВ, и она снижается тем больше, чем больше угол перекадки ВРК (на наружной ВРК на 100 об/мин и более, на внутренней ВРК – заметно меньше). Снижение частоты вращения ГВ ВРК носит импульсный характер: при перекадке ВРК – резкое падение, после остановки ВРК – столь же резкий частичный подъем и при удержании ВРК – более медленное (но тоже импульсами) восстановление частоты вращения. Все «зигзаги» выполнялись достаточно быстро, и времени на полное восстановление частоты вращения ГВ при переложенной ВРК не хватало, однако, как только началась перекадка ВРК на другой борт, частота вращения быстро достигала начального значения ( $350 \text{ об/мин}$ ).

Описанное поведение частоты вращения ГВ ВРК позволяет предположить, что при больших и быстрых перекадках ВРК на ГВ возникают столь значительные скосы внешнего потока, что лопасти ГВ некоторое время работают в отрывном режиме – при этом резко возрастает вибрация. При удержании ВРК на большом угле перекадки работающий ГВ постепенно изменяет поток, скосы потока уменьшаются и, соответственно, снижается вибрация.

В качестве параметра, определяющего описанный процесс, был выбран угол скоса внешнего потока ВРК (рис. 14), определяемый параметрами движения судна и углом перекадки ВРК по формулам:

$$\text{TFAR} = \text{TFA} - \text{RAR}, \text{TFAL} = \text{TFA} - \text{RAL}, \quad (2)$$

$$\text{TFA} = \arctg(\text{TTV} / V \cos(\text{DRF})), \quad (3)$$

$$\text{TTV} = V \sin(\text{DRF}) + L_{\text{ВПК}} \Omega_{\text{H}}, \quad (4)$$

$$V = V_S \cdot 1852/3600, \quad (5)$$

$$\Omega_{\text{H}} = -\text{DHDT}/60/180 \cdot \pi. \quad (6)$$

На рис. 15 и 16 (см. вклейку) представлены параметры движения судна и параметры вибрации фундаментов ВПК на зигзагах 2 и 3 (рис. 13), и можно заметить, что пики провалов частоты вращения ГВ ВПК соответствуют максимальным значениям углов скоса внешнего потока на ВПК (TFAR и TFAL), которые приближаются к  $90^\circ$ .

Следует подчеркнуть, что TFAR и TFAL – это приближенные оценки фактических углов скоса потока на ВПК. Тем не менее эти параметры можно использовать для характеристики виброактивности ВПК. Анализ рис. 15 и 16 позволяет считать критическим углом скоса внешнего потока ВПК  $30^\circ$ : при углах скоса выше этого значения амплитуды измеренных виброускорений на лопастной частоте превышают  $0,2 \text{ м/с}^2$ . На этот диапазон TFAR и TFAL приходится и основная часть провала частоты вращения ГВ ВПК.

Одновременно с перекладкой ВПК и снижением частоты вращения ГВ ВПК снижается скорость хода. Это обусловлено рядом причин:

- потеря тяги при перекладке ВПК (уменьшение проекции упора ГВ на ДП);
- снижение КПД ГВ в косом внешнем потоке (и снижение упора ГВ);
- увеличение сопротивления корпуса судна при дрейфе.

Рис. 15 и 16 показывают, что наибольший вклад в снижение скорости хода дает первая причина: при удержании одной из ВПК в ДП потеря скорости хода уменьшается вдвое (с 3 до 1,5 уз) по сравнению с синхронной работой ВПК.

## Выводы и рекомендации по результатам комплексных испытаний

Conclusions and recommendations as per the results of integrated tests

Анализ результатов комплексных испытаний круизного судна привел к следующим выводам в отношении причин и механизмов развития вибрационных процессов:

1. Вибрация на фундаментах ВПК возбуждается одновременно пульсациями крутящего момента на гребном валу ВПК, пульсациями попе-

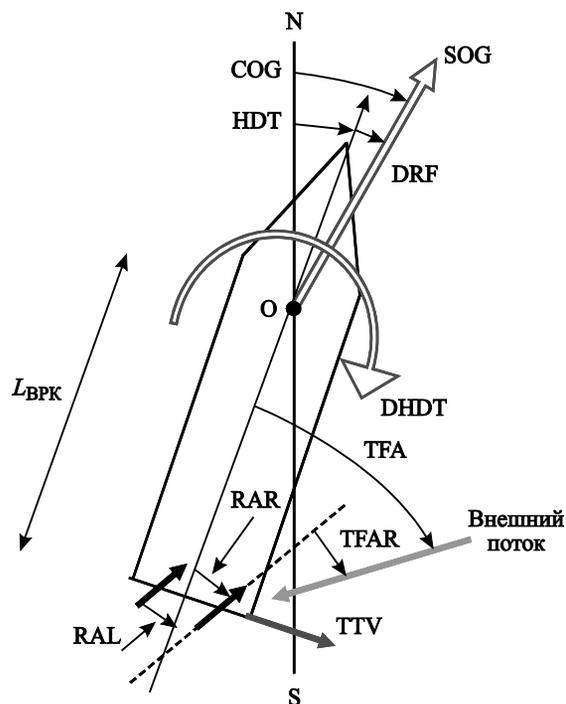


Рис. 14. Параметры, определяющие скос внешнего потока на гребном винте винторулевой колонки

Fig. 14. Flow obliquity parameters on pod unit propeller

- речных гидродинамических сил от ГВ и пульсациями гидродинамических давлений на корпусе над ГВ.
2. Вибрация в жилых помещениях и зонах отдыха, расположенных в нос от машинного отделения, в основном также возбуждается работающими ГВ, а в зонах отдыха, расположенных над машинным отделением, – работающими ГДГ.
3. При прямолинейном установившемся движении вибрация, обусловленная работой ГВ, как правило, незначительна.
4. Наибольшие виброускорения возникают при быстрых и больших перекладках ВПК на высоких скоростях хода, когда углы скоса внешнего потока ВПК приближаются к  $90^\circ$  и лопасти ГВ кратковременно работают в отрывном режиме. При этом на фундаментах ВПК рост виброускорений на лопастной частоте в вертикальном и поперечном направлениях достигает 7–10 раз, а в обитаемых помещениях – до 10 раз и выше.
5. При больших углах перекладки ВПК значительно снижается скорость хода. Экспериментально показано, что падение скорости хода при маневрировании значительно уменьшается, если одна из ВПК постоянно удерживается в ДП.

6. Максимальный рост вибраций при маневрировании связан с параметром «угол скоса внешнего потока ВРК». Установлено его критическое значение  $30^\circ$ , превышение которого сопровождается ростом виброускорений на фундаментах ВРК свыше  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Влияние других параметров достоверно оценить затруднительно из-за быстроменяющихся в реке внешних факторов: глубина и рельеф русла, скорость и направление ветра, скорость и направление течения и т.п.

Для улучшения в целом вибрационной обстановки на обследованном круизном судне рекомендовано:

- исключение резонансов перекрытия верхней палубы над машинным отделением путем установки дополнительных пиллерсов, а также повышение ее виброизоляции путем оптимизации конструкций подвесов системы газовыхлопа;
- корректировка техники управления судном.

В отсутствие данных о виброактивности ГВ в отрывных режимах натурное исследование механизма возникновения интенсивной вибрации при маневрировании на извилистых стесненных фарватерах малых рек не позволяет рекомендовать конструктивные мероприятия для снижения виброактивности ГВ (в т.ч. увеличение числа лопастей ГВ). При угле скоса внешнего потока  $90^\circ$  лопасти любого реального винта будут работать в отрывном режиме. В данном случае большего эффекта можно ожидать от корректировки техники управления судном для исключения или сведения к минимуму отрывных режимов работы лопастей ГВ ВРК.

Техника управления судном включает два аспекта: субъективный и объективный. Субъективный аспект охватывает сферу ответственности и действий рулевого, а объективный аспект – функциональные возможности и техническое состояние штатных бортовых средств управления судном.

Техника управления судна существенно отличается в зависимости от внешних условий и целей управления. В данном случае рассматривается техника управления судном на речном фарватере с максимальной скоростью хода и минимальной виброактивностью ГВ ВРК. Нижеследующие рекомендации состоят из двух разделов. В первом разделе обоснована оптимальная техника управления судном (к чему должен стремиться рулевой). Во втором разделе обоснованы требования к системе управления движением судна (чем она должна помогать рулевому).

## Рекомендуемая техника управления движением судна

Recommended technique of ship steering

1. На прямом курсе следить за скоростью поворота судна, не допуская быстрого ее роста, снижать скорость поворота малыми переключками одной ВРК.
2. Планировать изменение курса с минимальной скоростью поворота. Готовить изменение курса путем создания скорости поворота судна в нужном направлении.
3. При изменении курса удерживать одну ВРК в ДП для минимизации потери скорости хода. Следить, чтобы после возвращения в ДП одной ВРК переключка другой ВРК начиналась не ранее чем через  $3\div 4$  с.
4. Начинать изменение курса переключкой внутренней ВРК на небольшой угол (наружная ВРК в ДП тоже даст поворачивающий момент, но без потери тяги). После достижения желаемой скорости поворота вернуть внутреннюю ВРК в ДП и затем корректировать скорость поворота небольшими переключками наружной ВРК.
5. Выход из циркуляции (снижение скорости поворота до нуля) выполнять небольшими переключками наружной ВРК на внутренний борт.

Рекомендуемая техника управления движением судна может быть отработана экипажем судна самостоятельно. Однако применение этой техники управления требует от рулевого повышенного внимания к средствам управления движением (к пульту управления ВРК и показаниям различных приборов). Это неизбежно отвлекает рулевого от анализа окружающей обстановки. Очевидно, что в сложных речных условиях приоритет для рулевого – безопасность судна. Помочь рулевому соблюдать рекомендованную технику управления может система управления движением судна. Для этого она должна удовлетворять ряду функциональных требований.

## Требования к системе управления движением судна

Requirements to ship steering system

1. Поддержка хотя бы двух predetermined режимов работы: режим удержания курса и режим изменения курса. (Желательно обеспечить создание и применение пользовательских наборов правил и ограничений.)
2. Быстрое переключение между режимами. (Желательно автоматическое переключение в зави-

- симости от заданных параметров, например частоты вращения ГВ.)
3. Обязательный набор контролируемых параметров:
    - 3.1. Скорость поворота судна (параметр  $DHDT$ ).
    - 3.2. Частота вращения ГВ ВРК (для каждой ВРК).
    - 3.3. Угол поворота ВРК (для каждой ВРК).
  4. В режиме удержания курса система управления движением должна обеспечивать:
    - 4.1. Ограничение для малых углов перекадки ВРК в зависимости от частоты вращения ГВ ВРК.
    - 4.2. Правила перекадки ВРК (одной или обеих одновременно) в зависимости от величины и знака скорости поворота судна.
  5. В режиме изменения курса система управления движением должна обеспечивать:
    - 5.1. Ограничение скорости перекадки ВРК в зависимости от частоты вращения ГВ.
    - 5.2. Ограничение угла перекадки ВРК в зависимости от частоты вращения ГВ.
    - 5.3. Правило перехода от управления одной ВРК к другой через установку в ДП обеих ВРК и одновременным удержанием их в ДП заданное время.
  6. Улучшенные эргономические характеристики средств управления ВРК:
    - 6.1. Тактильный отклик комбинированной рукоятки управления ВРК на всех делениях шкалы поворота ВРК.
    - 6.2. Возможность ручной перекадки ВРК с шагом  $0,5 \div 1^\circ$  в районе ДП.

Удовлетворяющую таким требованиям системе управления движением можно отнести к интеллектуальным системам управления движением судна [5, 6].

## Заключение

### Conclusion

При эксплуатации круизного судна в определенных условиях возникают вибрации и шум, неопасные для судна, но вызывающие дискомфорт и беспокойство у пассажиров. В силу традиционных требований Речного регистра к условиям контроля вибрации (прямой курс, отсутствие волнения, спецификационные режимы) эти явления не были выявлены в ходе приемо-сдаточных испытаний. Однако вследствие неблагоприятного сочетания конструктивных особенностей данного круизного судна,

условий и режимов его эксплуатации они стали регулярными и существенно усложнили его эксплуатацию, в т.ч. из-за снижения уровня комфорта пассажиров.

В зависимости от природы источников виброакустических явлений для их поиска и исследования используются разные подходы. Явления, обусловленные работой виброактивных механизмов судна, успешно обнаруживаются и исследуются традиционными методами. Для исследования явлений, возникающих при специфическом взаимодействии судна с окружающей средой, необходимо дополнительно привлекать и другие методы. Организационно-технически это осуществляется в рамках комплексных натурных испытаний судна, в которых участвуют специалисты по разным разделам теории корабля. Результаты комплексных испытаний судна анализируются как традиционными для каждого раздела теории корабля методами, так и совместно специалистами разного профиля.

За один световой день комплексных натурных испытаний на круизном судне были выявлены как внутренние, так и внешние источники вибрации. Внутренние источники вибрации – элементы энергетической установки – вполне традиционны, снизить обусловленные ими вибрации помогают конструктивные мероприятия, направленные на корректировку частотных характеристик корпусных конструкций.

Природа внешних источников вибрации и методы борьбы с ними оказались более сложными. При движении по извилистой мелкой реке круизное судно с двумя ВРК активно их перекачивает с борта на борт. Вследствие этого ГВ ВРК регулярно попадают в косой поток, и их лопасти, работая в отрывном режиме, вызывают шум и интенсивную вибрацию, которые конструктивными мероприятиями, такими как изменение жесткостных и инерционных характеристик конструкций, устранить практически невозможно. Для снижения интенсивности подобных явлений необходимо корректировать технику управления движением судна, чтобы исключить отрывные режимы обтекания лопастей гребных винтов.

В настоящее время виброактивность гребных винтов при их работе в отрывном режиме не изучена. Не отменяя необходимости исследований в данной области, а также применения антивибрационных мероприятий на стадии проектирования, в существующих условиях для снижения интенсивности вибрационных явлений на построенном судне необходимо корректировать

технику управления его движением, чтобы исключить или свести к минимуму отрывные режимы обтекания лопастей.

Применение рекомендуемой техники управления движением судна в ручном режиме возможно, но в сложных речных условиях рулевой сосредоточен на обеспечении безопасности судна и ему трудно соблюдать рекомендованную технику управления.

Помочь в этом может интеллектуальная система управления движением судна. Позднее обнаружение проблемы вибрации приводит не только к эксплуатационным издержкам, но и к снижению эффективности комплексных испытаний из-за ограничений на объем, время и место их проведения. Для эффективного выявления и решения таких проблем комплексные испытания по индивидуально разработанной программе и методике следует включать в программу приемо-сдаточных испытаний речных круизных судов, особенно в случае предъявления повышенных требований к комфорту.

## Список использованной литературы

1. Справочник по теории корабля : в 3 т. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
2. Васильев Н.В., Краснов К.В., Некрасов В.Н. Определение наукоемких характеристик судов и их мониторинг в процессе комплексных натурных и эксплуатационных испытаний // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (Судометрика-2012) : тезисы докладов Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 19–22.
3. СП 2.5.3650-20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры : утв. постановлением Главного врача РФ от 16 октября 2020 г. № 30. Москва : Моркнига, 2023. 112 с.
4. РД5.0231-84. Средства защиты от шума помещений судов. Проектирование и комплексное применение. Основные положения. Ленинград, [1984].
5. Васильев Н.В., Паутов Л.Г. Интеллектуализация – современный тренд развития систем электродвижения судов с ДРК в инновационных разработках Крыловского центра // Корабельная энергетика: из прошлого в будущее : материалы Всероссийского научно-технического форума. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2017. С. 32–35.
6. Инновационные разработки Крыловского государственного научного центра для повышения безопас-

ности и надежности судов с винто-рулевыми колонками в экстремальных ледовых условиях / В.А. Беляшов, Н.В. Васильев, В.В. Макаров, Л.Г. Паутов // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1(29). С. 92–103. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-92-103.

## References

1. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [Ya. Voitkunsky et al.]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (in Russian).
2. Vasilyev N.V., Krasnov K.V., Nekrasov V.N. Determination of science-intensive parameters of ships and their monitoring in the process of integrated full-scale and in-service trials // Measurements and tests in shipbuilding and related industries (Sudometrika-2012): Abstracts of messages, 4<sup>th</sup> All-Russian Scientific & Technical Conference. St. Petersburg : Concern CSRI Elektropribor, 2012. P. 19–22 (in Russian).
3. Health and hygiene rules. SP 2.5.3650-20. Health and hygiene requirements for some types of transport and transport infrastructure objects: [approved by decree of Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dt. 16 October 2020 No. 30] (in Russian).
4. Regulatory Document RD5.0231-84. Noise protection tools for ship spaces. Design and integrated application. Main provisions. Leningrad, 1984 (in Russian).
5. Vasilyev N.V., Pautov L.G. Artificial intelligence as modern trend in marine propulsion systems with electric pod units in innovative projects of Krylov State Research Centre // Marine power engineering: from the past into the future. Materials of All-Russian Scientific & Technical Forum. St. Petersburg State Maritime Technical University. St. Petersburg, 2017. P. 32–35 (in Russian).
6. Innovative developments of Krylov State Research Centre to improve safety and reliability of pod-propulsion vessels in extreme ice conditions / V.A. Belyashov, N.V. Vasilyev, V.V. Makarov, L.G. Pautov // Arctic: Ecology and Economy. 2018. No. 1(29). P. 92–103 (in Russian).

---

## Сведения об авторах

Белов Исай Маркович, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-66. E-mail: im\_belov@ksrc.ru.  
Васильев Николай Васильевич, начальник стенда комплексного обеспечения натурных испытаний 21 лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Мос-

ковское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-52. E-mail:  
n\_vasilev@ksrc.ru.

*Зенков Солон Геннадьевич*, к.т.н., начальник сектора  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр».  
Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Москов-  
ское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-31. E-mail:  
s\_zenkov@ksrc.ru.

### **About the authors**

*Isay M. Belov*, Lead Engineer, Krylov State Research Centre.  
Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code  
196158. Tel.: +7 (812) 415-47-66. E-mail: im\_belov@ksrc.ru.

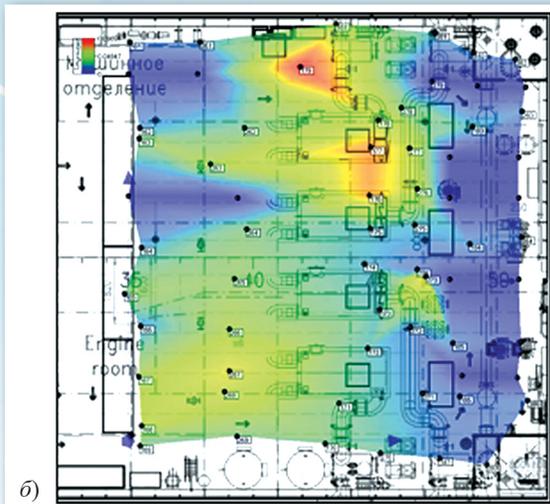
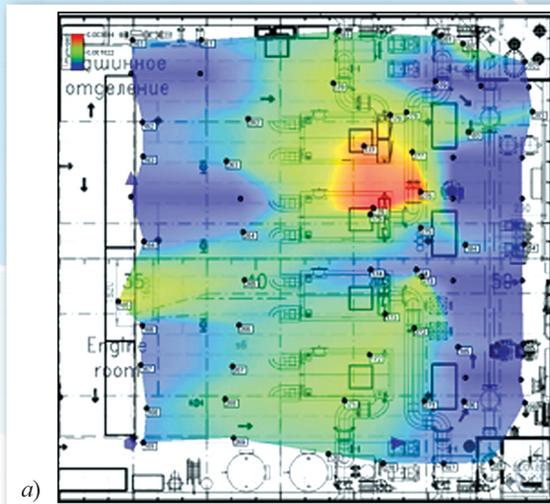
*Nikolay V. Vasilyev*, Head of the Stand of Complex Support  
of Full-scale Tests of Vessels, Krylov State Research Centre.  
Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code  
196158. Tel.: +7 (812) 748-63-52. E-mail: n\_vasilev@ksrc.ru.

*Solon G. Zenkov*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov  
State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Pe-  
tersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-31.  
E-mail: s\_zenkov@ksrc.ru.

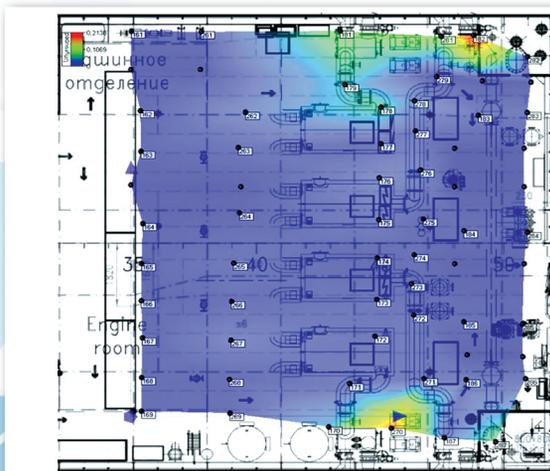
Поступила / Received: 18.03.24

Принята в печать / Accepted: 24.05.24

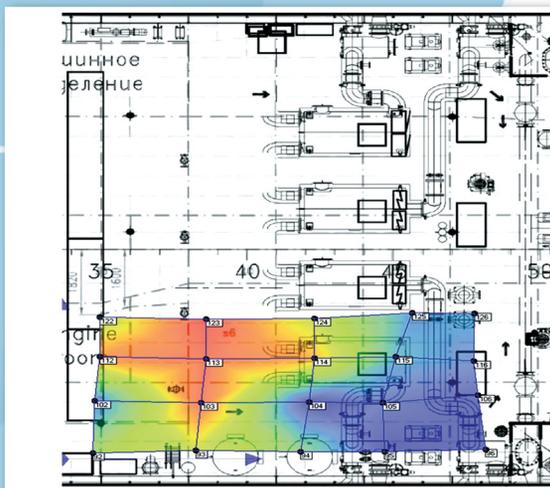
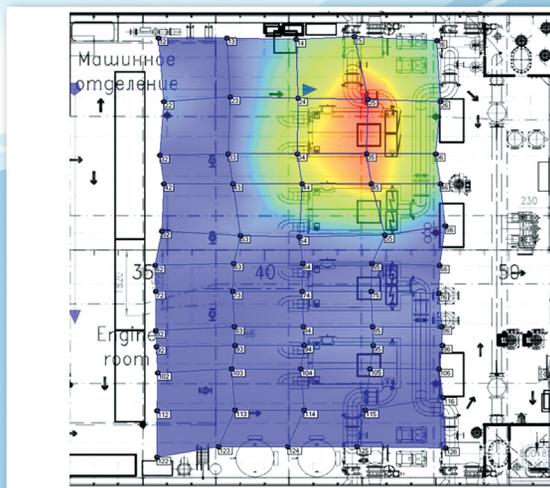
© Белов И.М., Васильев Н.В., Зенков С.Г., 2024



**Рис. 5.** Распределение вибрации по верхней палубе: а) на частоте 12,5 Гц; б) на частоте 25 Гц  
**Fig. 5.** Vibration distribution over upper deck at frequencies 12.5 Hz (a) and 25 Hz (b)



**Рис. 6.** Распределение вибрации на частоте 50 Гц  
**Fig. 6.** Vibration distribution at 50 Hz frequency



**Рис. 9.** Форма колебаний перекрытия гостиной на частоте 25 Гц  
**Fig. 9.** Lounge vibration mode at frequency 25 Hz

**Рис. 10.** Форма колебаний перекрытия тренажерного зала на частоте 25 Гц  
**Fig. 10.** Gym vibration mode at frequency 25 Hz

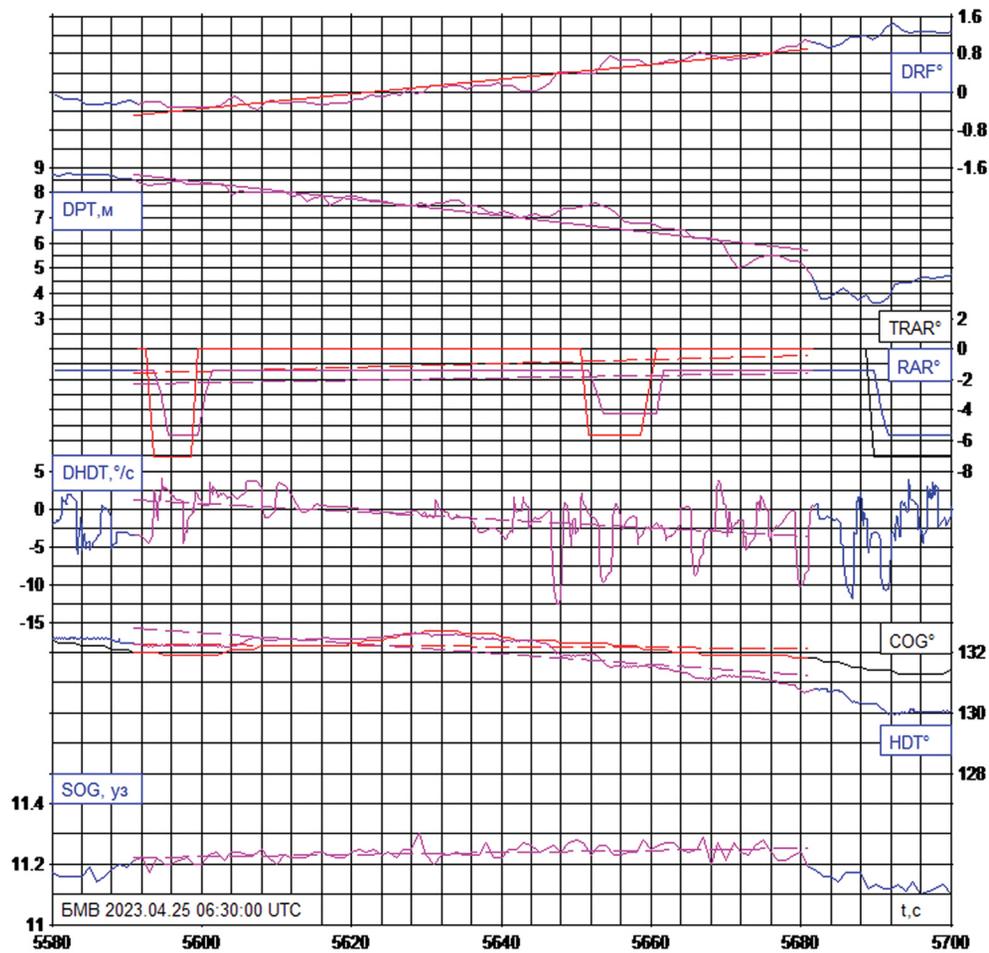


Рис. 12. Прямолинейный установившийся режим движения по реке,  $n = 310$  об/мин  
 Fig. 12. Steady straight sailing along the river,  $n = 310$  RPM

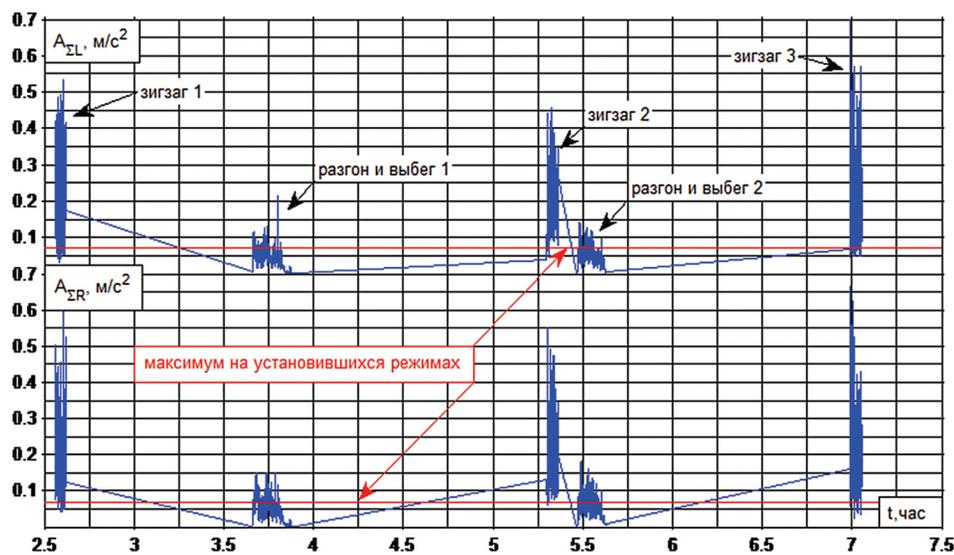
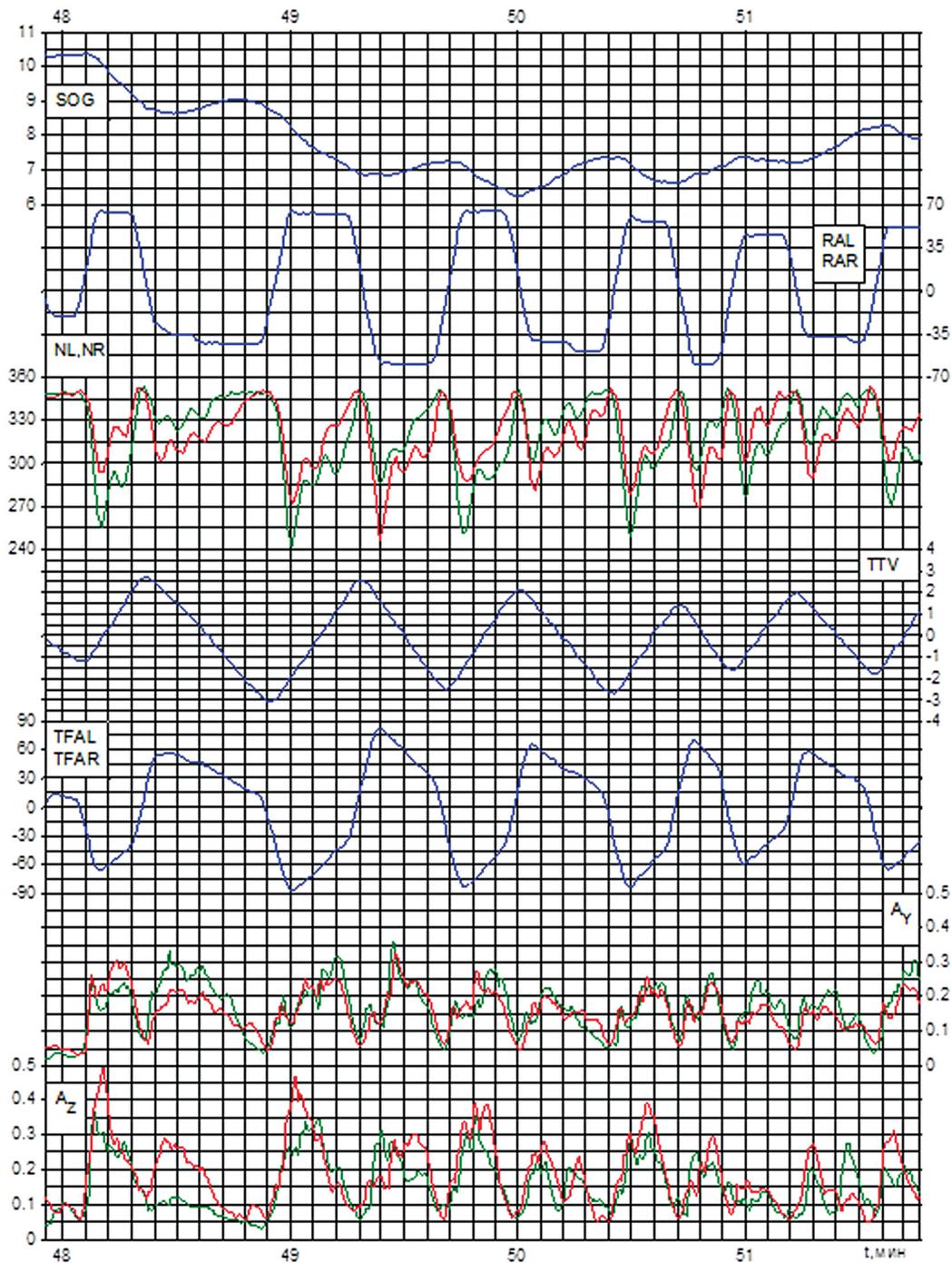
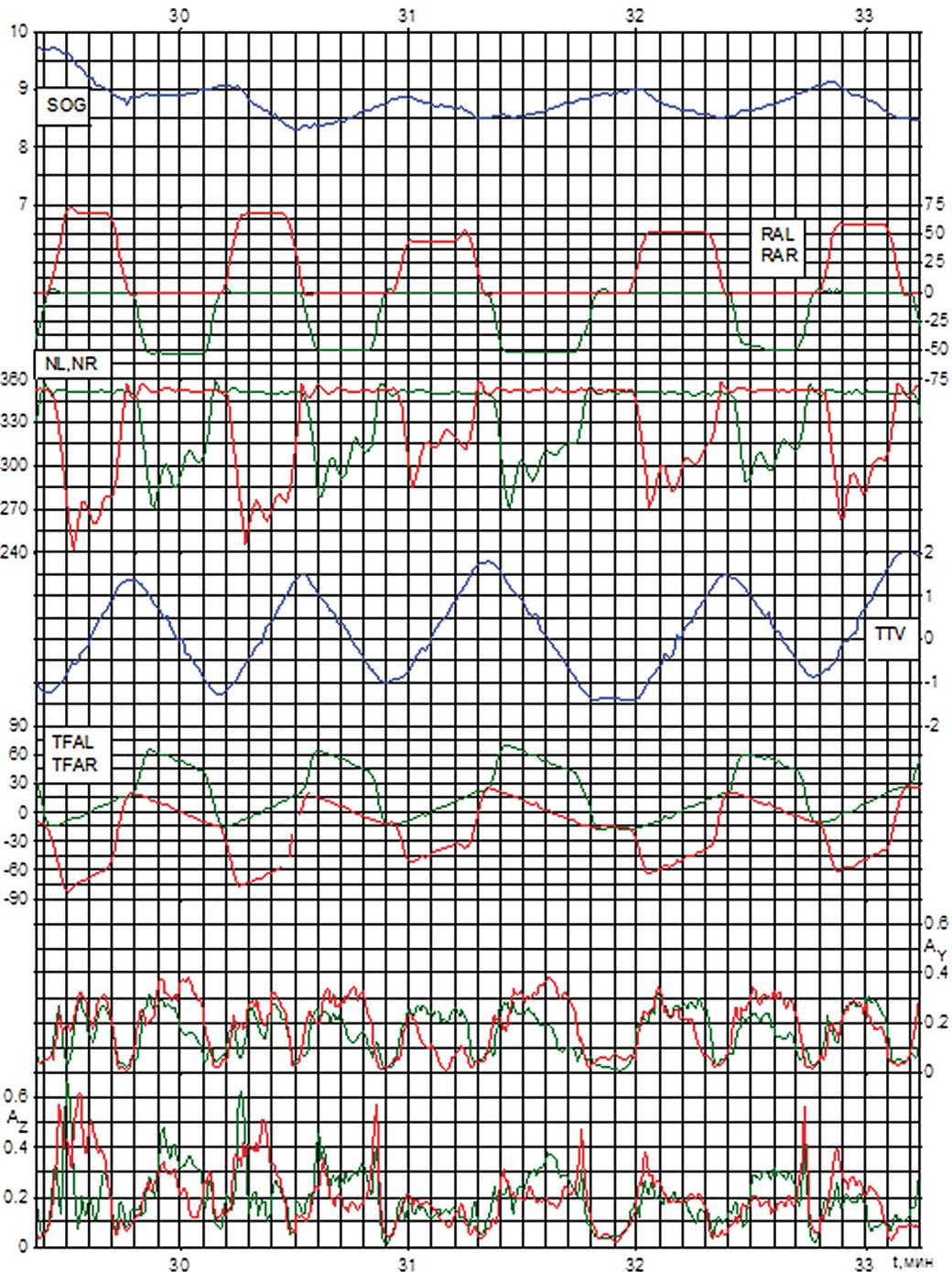


Рис. 13. Виброускорения фундаментов винторулевых колонок при неустановившихся режимах движения  
 Fig. 13. Vibration accelerations on pod unit foundations in unsteady movement conditions



**Рис. 15.** Параметры движения судна и вибрации винторулевых колонок. Зигзаг 2, синхронное управление винторулевыми колонками  
 При перекладке винторулевых колонок на левый борт ( $RAR, RAL < 0$ ) судно поворачивает на правый борт ( $HDT$  растет,  $DHDT > 0$ ), корма обтекается слева ( $TTV < 0$ ). При первой перекладке обе ВПК обтекаются справа, как при входе в циркуляцию или при изменении курса ( $TFAR, TFAL < 0$ ). Первая перекладка ВПК небольшая ( $RAR, RAL < 30^\circ$ ) и мощности гребного электродвигателя достаточно для удержания частоты вращения.

**Fig. 15.** Parameters of ship movement and pod unit vibrations. Zigzag 2, pod units controlled jointly  
 With pod units turning apart ( $RAR, RAL < 0$ ), the ship turns astarboard ( $HDT$  growing,  $DHDT > 0$ ), stern flow goes at port side ( $TTV < 0$ ). In the first turn, both pod units have flow from the starboard side, as if the ship was starting a turning circle or changing its heading ( $TFAR, TFAL < 0$ ). The first turning of pod units is not great ( $RAR, RAL < 30^\circ$ ), so propulsion motor power is sufficient to maintain required RPM.



**Рис. 16.** Параметры движения судна и вибрации винторулевых колонок. Зигзаг 3, независимое управление винторулевыми колонками

При перекладке винторулевой колонки правого борта на левый борт ( $RAR < 0$ ) судно поворачивает на правый борт ( $HDT$  растёт,  $DHDT > 0$ ), корма обтекается слева ( $TTV < 0$ ). При первой перекладке ВПК правого борта обтекается справа (как при входе в циркуляцию или при изменении курса), а ВПК левого борта – слева (из-за дрейфа на левый борт). Первая перекладка винторулевых колонок большая ( $RAR \sim 45^\circ$ ) и мощности гребного электродвигателя недостаточно для удержания частоты вращения.

**Fig. 16.** Parameters of ship movement and pod unit vibrations. Zigzag 3, pod units controlled independently  
As starboard pod unit turns apart ( $RAR < 0$ ), the ship turns astarboard ( $HDT$  growing,  $DHDT > 0$ ), stern flow goes at port side ( $TTV < 0$ ). In the first turn, starboard pod unit has flow from the starboard side, as if the ship was starting a turning circle or changing its heading, whereas the port-side pod unit has flow from its port side (due to the drift apart). The first turning of pod units is great ( $RAR \sim 45^\circ$ ), so propulsion motor does not have enough power to maintain required RPM.