

## ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ КРЫЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СУДОВ С ВИНТО-РУЛЕВЫМИ КОЛОНКАМИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

В. А. Беляшов, Н. В. Васильев, В. В. Макаров, Л. Г. Паутов

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2017 г.

*Представлен инновационный подход к обеспечению безопасности и надежности движительных комплексов ледокольных судов, основанный на комплексном мониторинге их параметров и использовании данных мониторинга в системе управления движением судна. Представлены новейшие разработки Крыловского центра для реализации предлагаемого подхода применительно к современным ледокольным судам, оборудованным винто-рулевыми колонками.*

**Ключевые слова:** ледокольное судно, ледокольный гребной винт, винто-рулевая колонка, система электродвижения, система управления.

### Введение

Случаи поломки лопастей ледокольных гребных винтов (ЛГВ) нередки (рис. 1). Минимальный ущерб в таких случаях — потери, связанные с изготовлением и заменой лопасти. Надежность ЛГВ обеспечивается конструктивным запасом прочности (в том числе лопастей), величина которого зависит от ледового класса судна. При этом снижается гидродинамическая эффективность ЛГВ. Но поломки такой пассивный подход не исключает, ибо из-за высокой степени неопределенности ледовых нагрузок на ледокольные гребные винты фактические их величины могут существенно превышать расчетные.

Дополнительно повысить надежность ЛГВ может активный подход, суть которого состоит в непрерывном наблюдении (мониторинге) и оценке текущего режима работы ЛГВ, а также в использовании данных мониторинга в системах управления (СУ) движением судна для безопасного выхода из опасных ситуаций, возникающих при ухудшении внешних условий.

На ледокольных судах часто устанавливают винто-рулевые колонки (ВРК). Гребной вал ВРК расположен в гондоле, подвешенной на консоли,

а механические ВРК содержат еще и Z-образную передачу. Валопровод ВРК воспринимает ледовые нагрузки и от ЛГВ (через гребной вал), и через корпус ВРК. Виброактивность такого валопровода выше, чем традиционных валопроводов, защищенных корпусом судна. Поэтому задачи обеспечения надежности валопровода ВРК, ЛГВ и корпуса ВРК тесно связаны. Доступ внутрь ВРК закрыт или ограничен, и средства измерений приходится встраивать в ВРК, создавая промышленную измерительную систему, способную надежно работать длительное время.

На ледокольных судах с ВРК активный подход целесообразно применять для повышения безопасности и надежности всей ВРК. Помимо снижения рисков поломки ЛГВ он позволит минимизировать время работы ВРК в режимах ускоренного износа ее валопровода.

### Современный подход к обеспечению надежности движителей ледокольных судов

Анализ опыта эксплуатации ЛГВ позволяет сделать три практически важных вывода [1]:

- поломки ЛГВ обусловлены как статической, так и усталостной прочностью;

- частота поломок зависит от расположения ЛГВ (бортовые ЛГВ ломаются чаще);
- возможны нерасчетные режимы взаимодействия ЛГВ со льдом, когда риск поломки лопасти растет (удар лопасти о лед плашмя, навал на лед при остановленных ЛГВ).

Традиционный валопровод фиксирует расположение ЛГВ относительно корпуса. Это позволяет предусмотреть конструктивные меры для снижения интенсивности контактов ЛГВ со льдом (руль за ЛГВ, специальные обводы корпуса и пр.). Число штатных сценариев, приводящих к нерасчетному режиму, при этом невелико.

Перекидка ВРК меняет положение ЛГВ относительно корпуса судна, и эффективность конструктивных мер снижается. При этом взаимодействие лопастей ЛГВ со льдом интенсифицируется, и число сценариев с риском нерасчетных режимов взаимодействия ЛГВ со льдом растет. Более того, ВРК позволили реализовать концепцию DAS (Double Action Ship). Легкие ледовые поля DAS-судно преодолевает носом вперед, а в тяжелых — разворачивает ВРК на 180° и ломает лед задним ходом, т. е. использует ВРК и как средство создания тяги, и как средство разрушения льда.

Качественное изменение условий работы ЛГВ требовало пересмотра подходов к обеспечению надежности судов ледового плавания, ледоколов и к нормированию прочности ЛГВ [1]. Сегодня эксплуатационную надежность ЛГВ обеспечивает следующий комплекс норм и принципов [2]:

- нормы прочности ЛГВ, основанные на совместном учете статического и усталостного механизмов разрушения лопастей при расчетных режимах взаимодействия ЛГВ со льдом и расчетных нагрузках, назначаемых на основе накопленного опыта в зависимости от особенностей конструкции, расположения и условий работы ЛГВ, а также класса ледовых усилений судна;

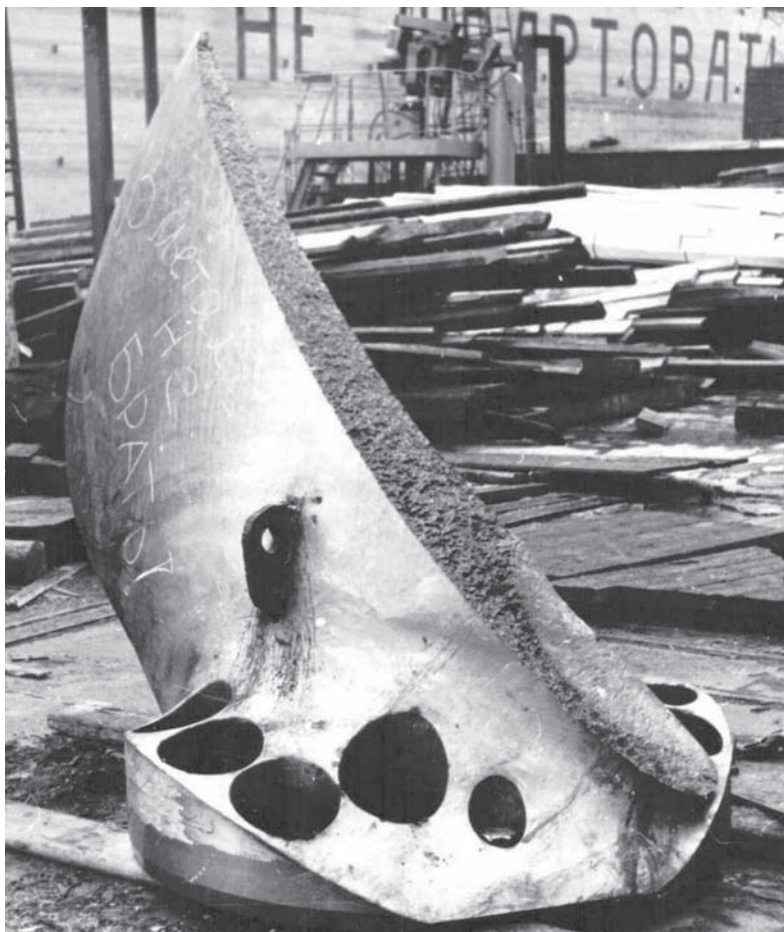


Рис. 1. Поломка лопасти ледокольного гребного винта

- принцип «селективной» (пирамидальной) прочности, который обеспечивает при поломке лопасти неповрежденность ступицы ЛГВ и прочих элементов валопровода;
  - ледовый сертификат («ледовый паспорт») судна, содержащий рекомендации в виде допустимых скоростей движения, ограничивающих зону безопасной эксплуатации судна с учетом характера его работы в ледовых условиях;
  - запас мощности привода, обеспечивающий работу ЛГВ в условиях кратковременных перегрузок при его взаимодействии со льдом.
- Нормы и принципы проектирования ЛГВ направлены на создание необходимого запаса прочности ЛГВ в расчетных режимах. Эксплуатационные ограничения нацелены на недопущение нерасчетных режимов взаимодействия ЛГВ со льдом и предотвращение недопустимых ледовых нагрузок на расчетных режимах. Запас мощности привода снижает риск возникновения нерасчетных режимов работы ЛГВ вследствие остановки движителя.

Увеличение запаса прочности ЛГВ расширяет зону его безопасной работы, но накладывает ряд ограничений на форму лопастей, требует увеличения их толщины и ухудшает их гидродинамические характеристики на чистой воде. Эта проблема особенно актуальна для судов, обеспечивающих вывоз углеводородных ресурсов из Арктики, трассы которых лишь частично покрыты льдом [3].

Сложность и многообразие условий взаимодействия ЛГВ со льдом, особенно для судов с ВРК и судов типа DAS, требует включения в ледовый паспорт ограничений, обеспечивающих безопасность не только

корпуса, но и элементов пропульсивного комплекса судна [2; 3].

Разработка норм прочности ЛГВ затрудняется:

- недостаточностью натурных данных о фактических ледовых нагрузках на лопасти ЛГВ;
- разнообразием режимов взаимодействия ЛГВ со льдом;
- возможностью нерасчетных режимов взаимодействия ЛГВ со льдом.

Поэтому фактический запас прочности ЛГВ может не соответствовать реальным условиям эксплуатации судна. Если запас мал, растет риск поломки, если избыточен, снижается экономичность судна на чистой воде. Новые технические решения, такие как ВРК и суда типа DAS, существенно усиливают роль фактора неопределенности ледовых нагрузок на лопасти ЛГВ, и вероятность постройки судна с необоснованным (в ту или другую сторону) запасом прочности ЛГВ растет.

*Запас мощности привода* также должен соответствовать запасу прочности ЛГВ. При избыточном запасе мощности на расчетных режимах будут чаще возникать недопустимые нагрузки. Недостаточный запас мощности увеличивает риск нерасчетных режимов взаимодействия ЛГВ со льдом из-за его остановок.

*Нормы прочности ЛГВ* обоснованы знанием физических механизмов взаимодействия ЛГВ со льдом. В этой связи особую ценность имеют натурные исследования ледовых нагрузок на лопасти ЛГВ. Многочисленные известные попытки [4—6] позволили обосновать расчетные режимы взаимодействия ЛГВ со льдом и нормировать величины ледовых нагрузок.

Но конструктивный запас прочности, снижая вероятность повреждений, не отвечает на вопрос, безопасен ли выбранный режим работы ЛГВ в текущих ледовых условиях. И до сих пор он решается на основе опыта и интуиции ледовых капитанов.

### **Особенности работы двигателей в ледовых условиях**

В основе современных норм прочности ЛГВ лежат оценки вероятности возникновения предельных ледовых нагрузок. Это обусловлено неопределенностью физико-механических характеристик льда, схемы взаимодействия лопастей ЛГВ со льдом и резонансных реакций валопровода, величина которых зависит от добротности форм колебаний и от мощности вызвавших их возмущений.

Проблему неопределенности фактических нагрузок на ЛГВ во льдах кардинально можно решить, измеряя деформации прямо на лопастях ЛГВ, но это до сих пор крайне сложная задача, и единственной защитой ЛГВ в условиях неопределенности ледовых нагрузок остается конструктивный запас прочности.

### **Особенности винто-рулевых колонок ледокольных судов**

Валопровод ледокольного судна подвержен статическим и усталостным повреждениям и содержит элементы, подверженные износу: опорные и упорные подшипники, а для механических ВРК — и зубчатые передачи. Наибольшую опасность для этих элементов валопровода представляют внешние ледовые нагрузки: радиальные и продольные нагрузки быстро разбивают упорный и опорные подшипники, разрушают дейдвудное уплотнение. Динамические продольные и тангенциальные силы и перемещения препятствуют смазке и повышают ударный износ.

Доступ к валопроводу ВРК для обслуживания затруднен, особенно в небольших механических ВРК, заполненных маслом, и требует постановки судна в док. Это повышает требования к надежности ВРК, и большое значение приобретают встроенные средства диагностики. Широкое распространение получили средства вибродиагностики, которые позволяют без разборки ВРК оценить техническое состояние валопровода, идентифицировать поврежденный элемент и дать рекомендации по объему и срокам его ремонта. Таким образом, реализуется техническое обслуживание по фактическому состоянию и существенно снижаются эксплуатационные расходы [7].

### **Оценка зарубежного опыта обеспечения надежности ВРК**

Системы мониторинга ВРК могут быть встроенными и внешними. Возможности внешних систем, не имеющих доступа внутрь ВРК, ограничены. Функционал встроенных систем потенциально не ограничен, но требует участия разработчика и производителя ВРК. Поэтому на рынке систем мониторинга ВРК ведущую роль играют производители ВРК.

Концепции систем мониторинга зарубежных производителей ВРК схожи. Они идут по пути создания систем сервисного обслуживания ВРК на базе общей теории надежности, использующей данные эксплуатационного мониторинга параметров ВРК. Это обеспечивает жесткую привязку судна к сервисным службам производителя ВРК и контроль соблюдения правил эксплуатации.

Система мониторинга удорожает ВРК. Зарубежные производители ВРК решают эту проблему, предлагая схему технического обслуживания и ремонта (ТОиР) «по состоянию». Вместе с платой за сервисное обслуживание своих ВРК зарубежные производители дополнительно и бесплатно (точнее, за счет судовладельцев) получают объективные данные о работе ВРК в различных условиях и используют их для анализа статистики отказов, совершенствования конструкции и технологии производства ВРК.

Централизация услуг по сбору, хранению и анализу эксплуатационных данных позволяет снижать стоимость обслуживания единицы оборудования как за счет увеличения числа клиентов, так и за счет

включения в эту систему помимо ВРК и другого судового оборудования.

Такая организация ТОиР ВРК аналогична сети сервисного обслуживания автомобилей. Но некоторые особенности судов вынуждают сделать ряд критических замечаний:

- меньшая серийность судового оборудования повышает стоимость ТОиР;
- более опасные условия эксплуатации, большой ущерб при катастрофах, высокая стоимость спасательных операций на море, особенно во льдах — диктуют ужесточение требований к надежности и безопасности судна вне зависимости от системы ТОиР;
- высокая степень неопределенности внешних нагрузок в сочетании с недостаточным опытом применения ВРК в экстремальных ледовых условиях может значительно снизить и даже обесценить достоинства систем ТОиР, основанных на общей теории надежности.

#### **Инновационный подход к обеспечению надежности движителей ледокольных судов**

В ледовых условиях влияние внешних факторов на режим работы и техническое состояние двигатель-двигательного комплекса судна становится определяющим. Достаточно сказать, что пиковые значения крутящего момента в валопроводе могут превышать номинальный момент двигателя на порядок, а средние значения — в два-три раза. В таких условиях остро стоят две задачи:

- снижение рисков аварий (отказов);
- сбережение технического ресурса всего валопровода.

При этом возрастает значение *средств оперативного контроля* режима работы и технического состояния движителя и судна в целом.

Новый подход к обеспечению надежности и безопасности движителей ледокольных судов разрабатывался применительно к ВРК как наиболее сложному и наименее изученному типу движителей, однако, по мнению авторов, он может использоваться и для судов с традиционными типами движителей. Построен он на следующих принципах:

- **Объективность.** Использование данных промышленных систем измерений.
- **Комплексность.** Учет данных, характеризующих режим работы, техническое состояние движителя, внешние условия работы движителей и судна в целом.
- **Наукоемкость.** Применение современных математических моделей судна и движителя для оценки режима работы и технического состояния движителя и обеспечения избирательности накопления эксплуатационных данных.
- **Бортовая поддержка.** Оперативное предоставление натуральных данных и основанных на них научных

оценок системам управления судном и системам поддержки ТОиР.

- **Береговая поддержка.** Регулярная передача накопленных на судне эксплуатационных данных в береговые центры поддержки ведомственного и отраслевого уровня для систематизации, анализа и выработки рекомендаций всем участникам процесса создания и эксплуатации ледокольных судов и их движителей.
- **Кооперативность.** Открытая формулировка и сбалансированный учет интересов всех участников процесса создания и эксплуатации ледокольных судов и их движителей, прежде всего в отношении общего информационного ресурса — натуральных данных.

Суть нового подхода — использование научного потенциала судостроительной отрасли непосредственно на борту судна для комплексного решения оперативных и стратегических задач его эксплуатации. Сама же отрасль может рассчитывать на комплексный эффект, включая финансово-экономические, производственно-технологические, проектно-конструкторские и научно-методические составляющие.

Система сервисного обслуживания ВРК, построенная на этих принципах, будет кардинально отличаться от большинства зарубежных аналогов ориентацией бортового сегмента системы на автономное решение оперативных задач судовождения и меньшей зависимостью от берегового сегмента.

Ядро бортового сегмента такой системы могут составить две новейшие разработки ФГУП «Крыловский государственный научный центр», созданные в 2015—2016 гг. по федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009—2016 годы» [8; 9]:

- система комплексного мониторинга движительно-рулевой колонки (КМ-ДРК), способная выдавать оперативные оценки текущего режима работы и технического состояния ВРК;
- интеллектуальная система управления электродвижением (ИСУ-ЭД-КМ), способная использовать данные КМ-ДРК для вывода ВРК и судна в целом из опасного или аварийного режима работы, сложившегося в результате неблагоприятного изменения внешних условий.

#### **Система комплексного мониторинга винто-рулевой колонки**

Отечественная система КМ-ДРК [8] предназначена для сбора объективной информации и выработки научно обоснованных оценок текущего режима работы и технического состояния ВРК в целом и ее отдельных элементов для использования в бортовых информационно-управляющих системах, системах сервисного обслуживания ВРК и системах контроля качества предприятий.

Таблица 1. Дефекты валопроводов ВРК [12]

Участок	Дефекты	Причины
Зубчатые передачи	Выкрашивание и отслаивание материала	Превышение предельных значений контактных напряжений
	Наволакивание	Резкое повышение температуры и пластическое течение материала зубьев при разрыве масляной пленки
Подшипники	Неоднородности дорожек обоймы	Недостаточная вязкость масла Разбалансировка и расцентровка вала
	Нарушение геометрии шарика (ролика)	Ударные нагрузки
	Разрушение сепаратора	Предельные значения радиальных и продольных колебаний вала

Для механической ВРК контроль осуществляется по следующим направлениям:

- гребной винт;
- несущие элементы валопровода (валы, упорный подшипник, зубчатые передачи);
- изнашивающиеся элементы валопровода (подшипники, зубчатые передачи);
- электрокоррозионные процессы в валопроводе.

Текущий режим работы ЛГВ и несущих элементов валопровода оценивается по критериям статической и усталостной прочности для напряжений в наиболее опасных сечениях теми же методами, которые используются при их проектировании. Для лопастей ЛГВ используются правила «Det Norske Veritas» [10] (они наиболее детально формулируют расчетные ледовые нагрузки и требования к прочным размерам лопастей), для несущих элементов валопровода — правила Российского морского регистра судоходства (РМРС) [11]. Для конкретной ВРК критерии прочности и алгоритмы их оперативного контроля реализуются индивидуально и корректируются в ходе сдаточных испытаний судна. Значения усталостных счетчиков по каждому элементу валопровода и по каждой лопасти ЛГВ накапливаются и характеризуют их текущее техническое состояние. Закономерности изменения усталостных счетчиков в зависимости от условий эксплуатации судна позволяют прогнозировать выработку усталостного ресурса ЛГВ и несущих элементов валопровода. Оперативный контроль критериев прочности ЛГВ и несущих элементов валопровода позволяет снизить риск их поломки в процессе эксплуатации.

Основные виды дефектов валопроводов механических ВРК представлены в табл. 1. Кроме того, в валолинии ВРК могут наводиться импульсные электрические токи от СЭД и токи гальванического происхождения (при электрокоррозии). Эти токи могут вызывать искровую коррозию и резко ускорять износ зубчатых передач и подшипников. Поломки валопроводов, как правило, происходят вследствие накопления дефектов.

Износ валопровода всегда связан с нарушениями геометрии его элементов и приводит к изменению уровней и характера вибрации, поэтому для оценки технического состояния валопровода широко применяется вибродиагностика. При анализе вибрации ВРК важно учитывать влияние других источников вибрации на судне и характера взаимодействия корпуса судна и самой ВРК с внешней средой, особенно со льдом.

При разработке модели ТОиР хорошо развитые методы вибродиагностики стационарных режимов позволяют использовать регламентные испытания наблюдаемого оборудования при характерных режимах его работы в одинаковых внешних условиях. Для ледовых ВРК такой подход констатирует текущее состояние валопровода, но не позволяет сберечь технический ресурс по критериям износа. Для решения последней задачи нужно оперативно выявлять режимы и условия работы ВРК с ускоренным износом валопровода и минимизировать время работы ВРК в этих режимах. Но при взаимодействии со льдом ВРК часто работает в неустановившихся режимах, которые и представляют наибольшую опасность с точки зрения износа. Поэтому для ледовых ВРК нужны методы нестационарной вибродиагностики.

КМ-ДРК сочетает оба подхода. Регламентный подход используется для оценки степени износа валопровода традиционными методами вибродиагностики при испытаниях на чистой воде, причем для целей периодического освидетельствования могут использоваться нормы вибрации РМРС [13]. Оперативный подход используется также для оценки опасности текущего режима работы ВРК по критериям износа.

КМ-ДРК построена по модульному принципу: ядро представляет собой систему промышленных измерений, аппаратные элементы которой встраиваются в ВРК, в том числе в ее поворотную часть; алгоритмы оперативного контроля выделены в опциональные программные модули, которые включаются и настраиваются для учета особенностей конкретной ВРК и конкретного судна (рис. 2).



Рис. 2. Структура системы КМ-ДРК [8]

КМ-ДРК способна передавать данные внешним информационным и управляющим системам для решения практических и научных задач, связанных с эксплуатацией судна.

Экран оперативного ВРК контроля (рис. 3) отображает общую оценку ВРК по шкале «НОРМА/ОПАСНО/

АВАРИЯ», а при возникновении опасной ситуации идентифицирует ее природу и источник.

КМ-ДРК превращает ВРК в «интеллектуальное» средство управления (ВРК-КМ), способное оценивать свой режим работы и техническое состояние и информировать об этом экипаж и информацион-

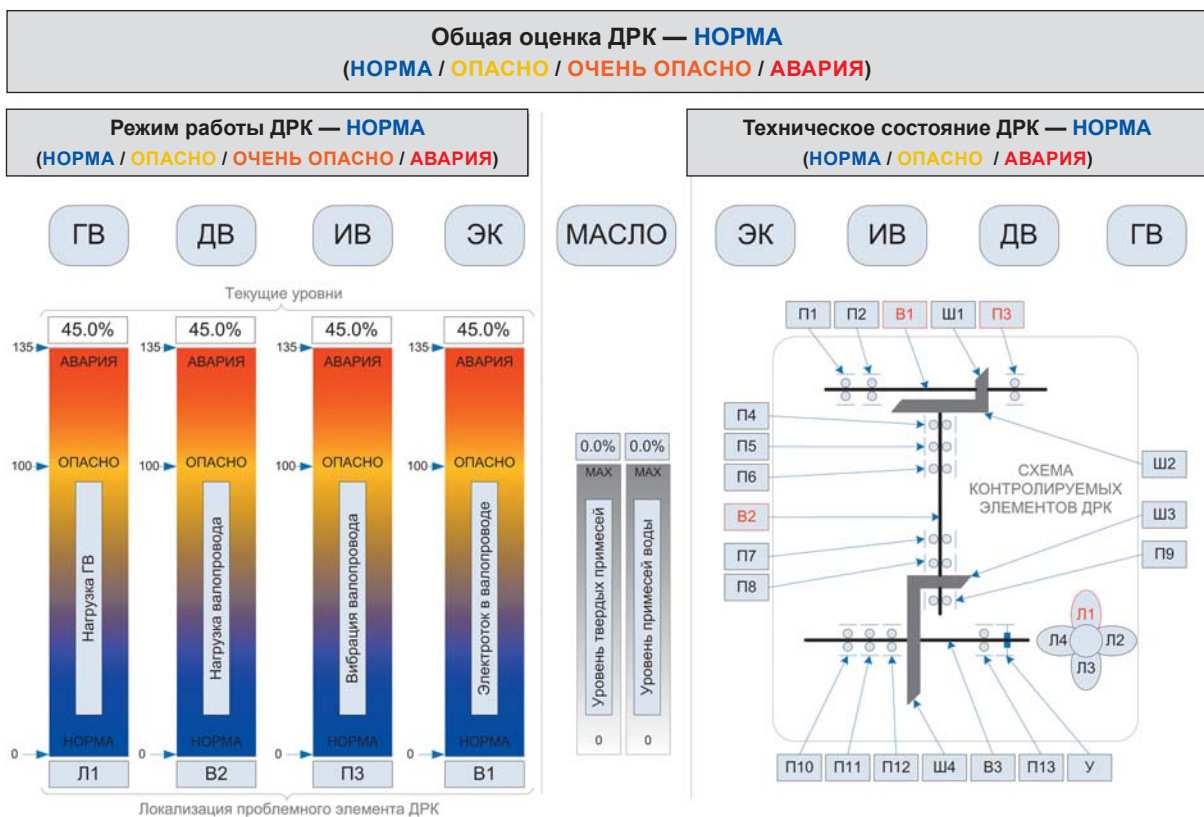


Рис. 3. Экран оперативного контроля КМ-ДРК [8]

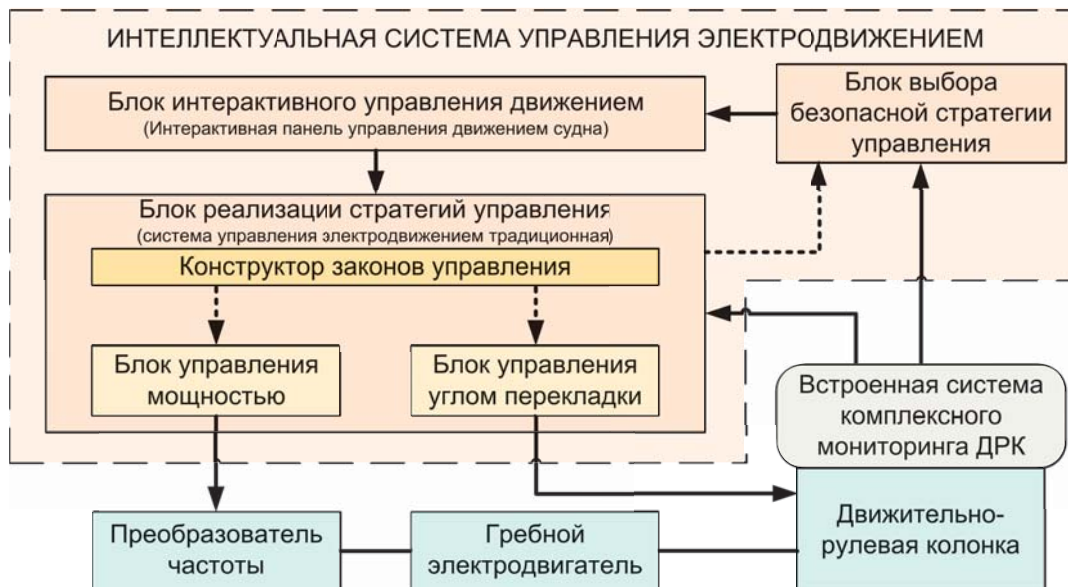


Рис. 4. Функциональная схема системы ИСУ-ЭД-КМ [9]

но-управляющие системы судна. Но при быстром развитии опасной ситуации человек может не успеть принять и реализовать правильное решение. Поэтому для эффективной реализации интеллектуального потенциала КМ-ДРК необходима соответствующая СУ движением судна, которая, с одной стороны, учитывает структуру, возможности и ограничения энергетической системы судна, а с другой — «знает», как управлять элементами движительно-рулевого комплекса, чтобы безопасно вывести судно из опасной или аварийной ситуации.

#### Интеллектуальная система управления электродвижением

Отечественная система ИСУ-ЭД-КМ [9] предназначена для безопасного вывода ВРК и судна в целом из опасных ситуаций, складывающихся вследствие неблагоприятного изменения внешних условий.

Для идентификации опасной ситуации ИСУ-ЭД-КМ использует оперативные оценки текущего режима работы, получаемые от КМ-ДРК. Разнообразие опасных ситуаций предопределяет множественность стратегий управления по выходу из них. В ИСУ-ЭД-КМ эта проблема решается введением двух уровней управления (рис. 4).

На верхнем уровне по таблице решений выбирается конкретная стратегия управления, адекватная возникшей опасной ситуации, и автоматически генерируются необходимые законы управления с жесткими обратными связями, по которым нижний уровень управления реализует выбранную стратегию. Использование таблицы решений позволяет реализовать ИСУ-ЭД-КМ как надстройку к имеющейся СУ-ЭД, которая активизируется при обнаружении опасной ситуации, генерирует необходимые законы и возвращает управление СУ-ЭД для реализации стратегии.

Используя таблицу решений, инкапсулирующую практический опыт управления ледокольным судном в экстремальных условиях, ИСУ-ЭД-КМ предлагает возможные в данной ситуации стратегии управления, ожидает решения оператора, а затем реализует выбранную стратегию. Таким образом, ИСУ-ЭД-КМ является системой поддержки принятия решений. При этом генерируемые законы управления должны учитывать конструктивные, аппаратные и программные особенности всего оборудования СЭД, поэтому доводку ИСУ-ЭД-КМ следует выполнять при испытаниях СЭД на заводском стенде. В противном случае функциональность ИСУ-ЭД-КМ может быть ограничена особенностями судового оборудования, изначально не предусматривающего применение КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ.

#### Прямые и косвенные результаты эксплуатационного мониторинга ВРК

Совместная работа систем КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ позволит:

- снизить риски аварий за счет недопущения перерастания опасных ситуаций в аварийные;
- сберечь технический ресурс ВРК за счет снижения времени ее работы в опасных и аварийных режимах.

Это даст реальное повышение надежности и безопасности ВРК при работе в экстремальных ледовых условиях. Использование КМ-ДРК в качестве штатной системы безразборной диагностики позволит снизить эксплуатационные расходы благодаря оптимизации процессов освидетельствования ВРК и ТОиР.

Кроме прямых результатов, достигаемых в процессе эксплуатации судна, накопление и последующий анализ данных эксплуатационного мониторинга

ВРК откроют новые возможности для развития судостроительной отрасли:

- исследование физических процессов в ВРК в зависимости от внешних условий плавания и законов управления движением — основа совершенствования используемых в КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ математических моделей, от достоверности которых зависит надежность оценок режима работы и технического состояния ВРК и соответственно эффективность работы КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ;
- уточнение исходных технических требований к ледокольным судам и их движителям с учетом фактических условий эксплуатации позволит создавать суда, лучше приспособленные к определенным условиям плавания;
- научно обоснованная оценка качества технических и технологических решений, принятых при проектировании и строительстве судна, — основа совершенствования системы контроля качества конечной продукции на предприятиях судостроительной промышленности.

Реализация новых возможностей, очевидно, будет способствовать повышению качества новых ледокольных судов и конкурентоспособности судостроительной отрасли. Вместе с тем оснащение судна наукоемкими системами типа КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ вносит некоторые особенности в его жизненный цикл.

#### **Особенности жизненного цикла судна с КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ**

Отладка совместной работы ВРК-КМ и ИСУ-ЭД-КМ выливается в многоэтапное научное исследование в ходе сдаточных испытаний и опытной эксплуатации головного судна с целью доводки наукоемких элементов обеих систем.

Главные задачи ВРК-КМ и ИСУ-ЭД-КМ на судне:

- оперативная оценка текущего режима работы ВРК;
- оценка технического состояния ВРК;
- идентификация опасных и аварийных ситуаций, возникающих при работе ВРК в результате негативного изменения внешних (в том числе ледовых) условий;
- безопасный вывод ВРК и судна в целом из опасного или аварийного режима.

Особенности ВРК-КМ и ИСУ-ЭД-КМ ставят также ряд специфических задач:

- калибровка измерительных каналов КМ-ДРК;
- экспериментальная проверка таблицы решений ИСУ-ЭД-КМ;
- отладка контрольных процедур до и после работы ВРК;
- эксплуатационные испытания для контроля технического состояния и регулярного освидетельствования ВРК, а также контроля состояния системы КМ-ДРК;
- анализ нештатных ситуаций при эксплуатации ВРК-КМ и дополнительная настройка КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ.

Ниже эти задачи описаны в привязке к этапам жизненного цикла перспективной ВРК-КМ.

#### *Разработка*

С учетом требований к судну и особенностей выбранного проекта ВРК согласовываются функциональные возможности и состав КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ.

Типовая РКД базовой конфигурации КМ-ДРК адаптируется к выбранному проекту ВРК. Разрабатываются математические модели опциональных модулей КМ-ДРК, учитывающие особенности ВРК и судна. Уточняются программы и методики швартовых и ходовых испытаний.

Формируется таблица решений ИСУ-ЭД-КМ. Дополняются требования к управлению силовыми преобразователями частоты СЭД для реализации специальных законов управления ВРК, генерируемых ИСУ-ЭД-КМ.

#### *Изготовление*

Оснащение ВРК элементами системы мониторинга осуществляется непосредственно в процессе сборки ВРК. После установки датчиков некоторые элементы ВРК (например гребной вал) становятся средствами измерений и нуждаются в калибровке на специальных стендах. Определяются частотные характеристики отдельных элементов ВРК.

На завершающем этапе сборки ВРК выполняются пуск и наладка КМ-ДРК.

Большее число обратных связей и более информативный пульт управления не вносят существенных отличий в производство ИСУ-ЭД-КМ по сравнению с традиционной СУ-ЭД.

#### *Заводские приемочные испытания*

В ходе заводских приемочных испытаний ВРК-КМ производятся комплексная проверка системы КМ-ДРК и определение стендовых характеристик самой ВРК. Эти данные используются для оценки качества изготовления ВРК, а затем для оценки качества монтажа ВРК на судне.

Для головных образцов ВРК проверяется наличие резонансов отдельных элементов ВРК с рабочими частотами вращения вала, зубчатых передач и подшипников.

При поставке ИСУ-ЭД-КМ в составе системы электродвижения (СЭД) на заводском стенде проверяется генерация ИСУ-ЭД-КМ разнообразных законов управления гребным электродвигателем и их реализация СУ-ЭД. Для создания различных эксплуатационных случаев нагружения вала электродвигателя заводской стенд должен иметь многофункциональное нагрузочное устройство.

#### *Монтаж и пуско-наладка на судне*

После монтажа ВРК-КМ на судне выполняются комплексная проверка системы КМ-ДРК и ее настройка для учета расположения ВРК и влияния



корпусных конструкций на характеристики ВРК, в том числе вибрационные. После этого и до завершения сдаточных испытаний КМ-ДРК используется в режиме опытной эксплуатации.

Производится подключение КМ-ДРК к ИСУ-ЭД-КМ и проверяется их информационно-техническое сопряжение.

### Сдаточные испытания судна

В ходе заводских швартовых и ходовых испытаний (ШИ и ЗХИ) решаются две задачи, влияющие на эффективность применения КМ-ДРК:

- *Оценка и учет влияния судна на характеристики ВРК.* Сравнительный анализ стендовых характеристик ВРК, в том числе вибрационных, с характеристиками ВРК в схожих условиях работы на судне позволяет оценить качество монтажа ВРК. При этом определяются эталонные вибромаски, характеризующие исходное техническое состояние ВРК.
- *Адаптация к судну заложенных в КМ-ДРК математических моделей.* При проектировании ВРК для судна на основе расчетов и модельных испытаний определяются параметры математических моделей, которые должны быть уточнены с использованием результатов натурных испытаний судна с ВРК на чистой воде.

Для проверки и корректировки предварительной таблицы решений ИСУ-ЭД-КМ сначала выполняется специальный комплекс переходных режимов движения судна на чистой воде. Второй этап проверки таблицы решений ИСУ-ЭД-КМ выполняется по результатам ледовых испытаний судна (на этапе эксплуатации).

### Эксплуатация судна

При эксплуатации судна КМ-ДРК решает две задачи, связанные с ВРК:

1. *Оценка текущего технического состояния ВРК* относительно исходного состояния, в качестве которого первоначально используются эталонные данные ШИ и ЗХИ. В процессе работы ВРК вырабатывается оперативная оценка. Наиболее полную и надежную оценку состояния ВРК дают эксплуатационные испытания на чистой воде по программе и методике, аналогичным ШИ и ЗХИ (но в меньшем объеме). По данным этих испытаний определяется новое исходное состояние ВРК, в том числе обновляются эталонные вибромаски. Эти испытания рекомендуется проводить перед очередным освидетельствованием ВРК и использовать для планирования ТОиР. Такие испытания перед постановкой судна в док и после выхода из дока обеспечивают объективные данные для проверки качества и эффективности ремонтных работ. Более продвинутый уровень поддержки могут обеспечить экспертные системы, накапливающие как данные эксплуатационных испытаний, так и оперативные эксплуатационные данные (в том числе о внешних условиях), ретроспективный анализ которых позволит

оценивать остаточный ресурс ключевых элементов ВРК и разрабатывать рекомендации по его сбережению на конкретном судне с учетом фактических условий эксплуатации (т. е. оптимизировать модель эксплуатации судна).

2. *Оценка текущего режима работы ВРК* выполняется для отдельных элементов ВРК:

- для ГВ и несущих элементов валопровода — с использованием математических моделей напряженно-деформированного состояния;
- для изнашивающихся элементов — сравнением текущих вибромасок с эталонными.

После этого формируется интегральная оценка текущего режима работы по шкале «НОРМА/ОПАСНО/АВАРИЯ». Вся информация может использоваться экипажем судна для принятия решения об изменении режима работы судна в экстремально сложных условиях, в том числе во льдах.

ИСУ-ЭД-КМ в связке с КМ-ДРК обеспечивает более полную поддержку принятия решений в экстремальных условиях и решает следующую задачу:

3. *Безопасный вывод ВРК и судна в целом из опасных и аварийных ситуаций, возникающих вследствие ухудшения внешних условий (в том числе ледовых).* Задача решается с использованием таблицы решений, которая первоначально разрабатывается на основании расчетов и модельных испытаний, проверяется и корректируется при сдаточных испытаниях судна с ВРК на чистой воде и дорабатывается в ходе ледовых испытаний судна.

Приближенный учет особенностей судна и ВРК в математических моделях может приводить к ошибкам в оценках текущего режима работы и технического состояния ВРК и к неправильной работе ИСУ-ЭД-КМ. Для доводки математических моделей КМ-ДРК и стратегий безопасного управления ИСУ-ЭД-КМ на головном судне рекомендуется период опытной эксплуатации — по меньшей мере до первых эксплуатационных испытаний и очередного освидетельствования ВРК. В течение этого периода должны регулярно производиться анализ и корректировка алгоритмов работы КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ с участием разработчиков.

### Заключение

Активный подход к обеспечению безопасности и надежности ледокольного судна предполагает мониторинг текущего режима работы и технического состояния движителей и использование их при управлении судном.

Владельцу ледокольного судна с ВРК комплексная реализация активного подхода путем мониторинга ВРК с помощью систем КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ обеспечит снижение затрат на эксплуатацию судна за счет:

- снижения риска поломки и сбережения технического ресурса ВРК;
- технической диагностики ВРК и переход к ТОиР по фактическому состоянию;

- оптимизации модели эксплуатации судна и практических приемов судовождения в различных ледовых условиях.

Для судостроительной промышленности внедрение систем КМ-ДРК и ИСУ-ЭД-КМ будет способствовать повышению конкурентоспособности в актуальной области создания судов с ВРК, особенно ледокольных, за счет:

- контроля качества изготовления и монтажа ВРК на судне;
- контроля ВРК в гарантийный период эксплуатации;
- использования данных технической диагностики в системах поддержки ТОиР;
- накопления натуральных данных о режимах работы и фактических нагрузках на ВРК в ледовых условиях.

Для Крыловского государственного научного центра новый подход является радикальной инновацией, создающей новую сферу деятельности непосредственно на судах, которая возможна не иначе как в кооперации НИИ, КБ, верфи и судовладельца.

#### Литература

1. Андрюшин А. В. Анализ опыта эксплуатации гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов // Мор. вестн. — 2006. — № 2 (18). — С. 98—101.
2. Сергеев А. А., Иванов М. Ю., Серов А. В., Семионичев Д. С. Особенности эксплуатации гребных винтов современных судов ледового плавания и развитие правил Регистра // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 42—45.
3. Боруевич В. О., Габерцеттель Ф. И., Пустошный А. В., Фролова И. Г. О развитии требований к двигателям судов двойного действия // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2015. — № 38-39. — С. 94—97.
4. Алексеев Ю. Н., Беляшов В. А., Шпаков В. С. Исследование напряжений в лопасти гребного винта ледокола в натуральных условиях // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 1978. — Вып. 286. — С. 69—76.
5. Koskinen P., Jussila M. Potkurin lavan jääkuormien pitkäaikaismittaus m/s Gudingenilla [Long term

measurements of ice loads on propeller blade of M/S Gudingen]. Tiedotteita / Valtion teknillinen tutkimuskeskus. — Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1991. — 46 p. + app. 118 p. — (Research Notes 1260). — (In Finnish).

6. Андрюшин А. В. Анализ натуральных ледовых нагрузок на лопасти гребного винта регулируемого шага арктического ледокола // Проблемы морской ледотехники и океанотехники. — СПб.: ЦНИИ им. А. Н. Крылова, 2005. — (Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова; вып. 24 (308)).

7. Принципы диагностики технического состояния оборудования по параметрам вибрации: Технический отчет по контракту S001-08 RU11CSTC TR09 004-RSD15610753535991281. — СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2009.

8. Разработка и испытание на опытном образце технологии комплексного мониторинга движительно-рулевых колонок ледовых судов с электродвижением: Отчет об ОКР «КМ ДРК СЭД», заключительный. — СПб.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2016. — (Вып. 48564).

9. Разработка системы управления электродвижением, интегрированной с системой комплексного мониторинга движительно-рулевых колонок и корпусных конструкций для судов ледового класса и ледоколов: Отчет об ОКР «Колонка-СУ», итоговый. — СПб.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2016. — (Вып. 48569).

10. Rules for classification of ships. — Pt. 5, chap. 1. — Det Norske Veritas AS, 2013.

11. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 2, ч. 7, разд. 5. — СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2015.

12. Мышинский Э. Л. Борьба с вибрацией и шумом в инженерной практике / ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — СПб., 2011.

13. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. — Ч. 2: Техническое наблюдение за судами в эксплуатации в соответствии с правилами регистра. — СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2004.

#### Информация об авторах

**Беляшов Валерий Адамович**, кандидат технических наук, главный конструктор, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44), e-mail: 5\_otd@ksrc.ru.

**Васильев Николай Васильевич**, начальник стенда, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44), e-mail: N\_Vasilev@ksrc.ru.

**Макаров Вячеслав Владиславович**, инженер, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44), e-mail: v-makarov@yandex.ru.

**Паутов Леонид Геннадьевич**, начальник отдела, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44), e-mail: pautovl@yandex.ru.

#### Библиографическое описание данной статьи

Беляшов В. А., Васильев Н. В., Макаров В. В., Паутов Л. Г. Инновационные разработки Крыловского государственного научного центра для повышения безопасности и надежности судов с винто-рулевыми колонками в экстремальных ледовых условиях // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 92—103. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-92-103.

## INNOVATIVE DEVELOPMENTS OF KRYLOV STATE RESEARCH CENTRE TO IMPROVE THE SAFETY AND RELIABILITY OF VESSELS WITH PODDED THRUST UNITS IN EXTREME ICE CONDITIONS

Belyashov V. A., Vasilev N. V., Makarov V. V., Pautov L. G.  
Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

### Financing Source

The budget of the Russian Federation.

### Abstract

The increasing demands to safety and reliability of vessels in ice conditions requires new approaches to ensure the reliability of the propeller.

Traditional passive approach involves the creation of a constructive margin of the blades. The resulting significant decrease in their efficiency on pure water, however it does not guarantee against damage due to high uncertainty of loads, characteristic for extreme ice conditions. The problem is compounded by the widespread use on icebreaking ships podded thrust units (POD), much more vulnerable and much less studied in ice conditions than the propellers on the shafts coming out of the hull.

In addition to the traditional proposed a proactive approach based on the comprehensive monitoring of parameters of the propulsion and use of monitoring data in control system of ship motion. This approach will allow us to assess both the technical status and the operating mode of propulsion and use these assessments to identify and putting the ship out of dangerous situations.

Presented the latest developments of Krylov State Research Centre for the implementation of the proposed approach in relation to modern icebreaking vessels with the POD:

- built-in system of comprehensive monitoring of the RMC, ensuring the collection of objective data and evaluation of current operating mode and technical condition of the POD;
- intelligent control system of ship motion, able to use monitoring data for safe withdrawal of the POD and of the vessel from a dangerous situation.

Together, these two systems will reduce the risks of breakdowns of the POD due to prevent the escalation of dangerous situations in an emergency and to save technical resource of the POD by reducing working time in dangerous and emergency modes.

**Keywords:** *icebreaking vessel, icebreaker propeller, podded thrust unit, electric propulsion system, control system.*

### References

1. *Andryushin A. V.* Analiz opyta ekspluatatsii grebnykh vintov sudov ledovogo plavaniya i ledokolov. [Analysis of experience of operation of propellers of ice ships and icebreakers]. *Mor. vestn.*, 2006, no. 2 (18), pp. 98—101. (In Russian).
2. *Sergeev A. A., Ivanov M. Yu., Serov A. V., Semionichev D. S.* Osobennosti ekspluatatsii grebnykh vintov sovremennykh sudov ledovogo plavaniya i razvitie pravil Registra. [Features of operation of propellers of modern ice ships and the development of the Rules of the Register]. *Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva*, 2014, no. 37, pp. 42—45. (In Russian).
3. *Borusevich V. O., Gabertsettel' F. I., Pustoshnyi A. V., Frolova I. G.* O razvitii trebovaniy k dvizhitelyam sudov dvoynogo deistviya. [On the development of requirements to the propulsion of double-action vessels]. *Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva*, 2015, no. 38-39, pp. 94—97. (In Russian).
4. *Alekseev Yu. N., Belyashov V. A., Shpakov V. S.* Issledovanie napryazheniy v lopasti grebnogo vinta ledokola v naturnykh usloviyakh. [A study of the stresses in the blades of the propeller of an icebreaker in situ]. *Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova*, 1978, iss. 286, pp. 69—76. (In Russian).
5. *Koskinen P., Jussila M.* Potkurin lavan jääkuormien pitkäaikaismittaus m/s Gudingeniilla [Long term measurements of ice loads on propeller blade of M/S Gudingeni]. *Tiedotteita / Valtion teknillinen tutkimuskeskus*. Espoo, Technical Research Centre of Finland, 1991, 46 p. + app. 118 p. (Research Notes 1260). (In Finnish).
6. *Andryushin A. V.* Analiz naturnykh ledovykh nagruzok na lopasti grebnogo vinta reguliruemogo shaga arkticheskogo ledokola. [Analysis of full-scale ice loads on CPP-propeller blades of Arctic icebreaker]. *Problemy morskoi ledotekhniki i okeanotekhniki*. St. Petersburg, TsNII im. A. N. Krylova, 2005. (Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova; iss. 24 (308)). (In Russian).
7. *Printsipy diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya po parametram vibratsii: Tekhnicheskii otchet po kontraktu S001-08 RU11CSTC TR09 004-RSD15610753535991281.* [Principles of diagnostics of the equipment technical condition on vibration parameters. Technical contract report S001-08

- RU11CSTC TR09 004-RSD15610753535991281]. St. Petersburg, FGUP "TsNII im. akad. A. N. Krylova", 2009. (In Russian).
8. Razrabotka i ispytanie na opytном obratse tekhnologii kompleksnogo monitoringa dvizhitel'no-rulevykh kolonok ledovykh sudov s elektrodvizheniem: Otchet ob OKR "KM DRK SED", zaklyuchitel'nyi. [Develop and test with prototype a technology of comprehensive monitoring of podded thrust unit of ice vessels with electric propulsion system. Technical report]. St. Petersburg, GNTs RF FGUP "TsNII im. akad. A. N. Krylova", 2016. (Iss. 48564). (In Russian).
9. Razrabotka sistemy upravleniya elektrodvizheniem, integrirovannoi s sistemoi kompleksnogo monitoringa dvizhitel'no-rulevykh kolonok i korpusnykh konstruksii dlya sudov ledovogo klassa i ledokolov: Otchet ob OKR "Kolonka-SU", itogovy. [Development of a electric propulsion system integrated with a comprehensive monitoring system of podded thrust unit and hull structures for ice-class vessels and icebreakers. Technical report]. St. Petersburg, GNTs RF FGUP "TsNII im. akad. A. N. Krylova", 2016. (Iss. 48569). (In Russian).
10. Rules for classification of ships. Pt. 5, chap. 1. Det Norske Veritas AS, 2013.
11. Pravila klassifikatsii i postroiки morskikh sudov. T. 2, ch. 7, razd. 5. [Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part VII, Chapter 5]. St. Petersburg, Ros. mor. registr sudokhodstva, 2015. (In Russian).
12. Myshinskii E. L. Bor'ba s vibratsiei i shumom v inzhenernoi praktike. [The suppression of vibration and noise in engineering practice]. TsNII im. akad. A. N. Krylova. St. Petersburg, 2011. (In Russian).
13. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniю za sudami v ekspluatatsii. Ch. 2: Tekhnicheskoe nablyudenie za sudami v ekspluatatsii v sootvetstvii s pravilami registra. [Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service. Part II, Carrying out classification surveys of ships]. St. Petersburg, Ros. mor. registr sudokhodstva, 2004. (In Russian).

---

#### Information about the authors

**Belyashov Valerij Adamovich**, Ph.D. (Technics), Chief designer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: 5\_otd@ksrc.ru.

**Vasilev Nikolai Vasil'evich**, Head of Stand, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: N\_Vasilev@ksrc.ru.

**Makarov Vyacheslav Vladislavovich**, Engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: v-makarov@yandex.ru.

**Pautov Leonid Gennad'evich**, Head of Division, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: pautovl@yandex.ru.

#### Bibliographic description

**Belyachov V. A., Vasilev N. V., Makarov V. V., Pautov L. G.** Innovative developments of Krylov State Research Centre to improve the safety and reliability of vessels with podded trust units in extreme ice conditions. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 1 (29), pp. 92—103. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-92-103. (In Russian).