

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30
УДК 629.561.5+629.5.064

Н.В. Васильев, И.М. Калинин , В.Н. Половинкин , А.В. Пустошный ,
О.В. Савченко, К.Е. Сазонов 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

О МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРУЗКИ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕДОКОЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ И ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Исследуются ледовые нагрузки на валопроводы ледоколов и судов ледового плавания при взаимодействии гребного винта со льдом. Сведения об этих нагрузках необходимы для использования в качестве исходных данных при разработке и наладке систем управления электродвижением, в т.ч. с применением нагрузочных стендов, с конечной целью обеспечения надежной и безопасной работы электрических пропульсивных установок в ледовых условиях плавания.

Материалы и методы. В работе использованы данные публикаций по ледовым нагрузкам валопроводов электрических пропульсивных установок. Рассмотрена терминология, применяемая при исследованиях по данному вопросу. Проведен анализ данных по скручивающим моментам на валолинии, полученных в ходе натурных ледовых испытаний на научно-экспедиционном судне ледового класса «Академик Трёшников».

Основные результаты. Описаны характерные случаи появления экстремальных нагрузок на пропульсивный комплекс при взаимодействии со льдом, получены исходные данные, характеризующие эти нагрузки, необходимые, в частности, для численного моделирования ледовых нагрузок на валопроводе при отработке управления системой электродвижения (СЭД) с помощью компьютерного моделирования или нагрузочного стенда. Показана важность учета инерционных составляющих элементов валолинии для корректного определения предельных нагрузок. Сформулированы задачи, решение которых необходимо для создания эффективных систем управления электрическими пропульсивными установками ледоколов и судов ледового плавания. Определены требования к проведению специальных натурных испытаний для валидации расчетных методов определения нагрузок на валолинии.

Заключение. При разработке СЭД судов ледового плавания необходимо создать высокоэффективную систему управления гребным электродвигателем, обеспечивающую надежную и безопасную его работу при взаимодействии винта со льдом. Сложность создания такой системы связана с большим разнообразием нагрузок на валолинию и трудностями их прогнозирования. Одним из путей отработки СЭД является создание стенда, нагрузочная часть которого должна моделировать различные варианты нагрузок на валолинию с использованием разработанной для этой цели математической модели, валидированной на основе накопленной в ходе натурных испытаний базы данных о ледовых нагрузках валолинии. Продемонстрирована важность корректного учета в системе управления гребным электродвигателем не только внешних нагрузок, но и инерционных моментов валопровода, ротора электродвигателя и винта с присоединенными массами воды.

Ключевые слова: система электродвижения, ледовые нагрузки, система управления, натурные испытания.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-15-30
UDC 629.561.5+629.5.064

Для цитирования: Васильев Н.В., Калинин И.М., Половинкин В.Н., Пустошный А.В., Савченко О.В., Сазонов К.Е. О моделировании нагрузки гребных электродвигателей ледоколов при проведении стендовых и виртуальных испытаний систем электродвижения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 15–30.

For citations: Vasilyev N., Kalinin I., Polovinkin V., Pustoshny A., Savchenko O., Sazonov K. Load simulation of icebreaker propulsion motors at laboratory and virtual tests of electric propulsion systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 15–30 (in Russian).

N. Vasilyev, I. Kalinin , V. Polovinkin , A. Pustoshny ,
O. Savchenko, K. Sazonov 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

LOAD SIMULATION OF ICEBREAKER PROPULSION MOTORS AT LABORATORY AND VIRTUAL TESTS OF ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

Object and purpose of research. This paper discusses ice loads on shaft-lines of icebreakers and ice-going ships as their propellers interact with ice. These loads are needed as inputs for development and fine-tuning of electric propulsion control systems, including those involving load test rigs, with the final purpose of ensuring reliable and safe operation of electric propulsion plants in ice navigation conditions.

Materials and methods. This study is based on the publications about ice loads on shafting of electric propulsion plants. It analyses the terminology used in the papers on this subject. It also analyses the data on ice-induced shafting torques, as obtained from full-scale trials of *Akademik Tryoshnikov* ice-class research vessel.

Main results. The paper describes typical cases of extreme ice loads on the propulsion system, with the input data characterizing these loads and needed, in particular, for numerical simulation of ice loads on shafting in order to fine-tune electric propulsion control system by means of computer-based simulations or laboratory tests. The paper shows the importance of considering the inertial elements of the shaft line for correct determination of limit loads. It also formulates the challenges that have to be solved in order to obtain efficient control systems for electric propulsion plants of icebreakers and ice-going ships. It determines the requirements to special full-scale trials needed to validate calculation methods for shafting loads.

Conclusion. Electric propulsion systems of ice-going ships must have highly efficient control tools for the propulsion motor that would ensure its reliable and safe operation as propeller interacts with ice. Such a tool is quite hard to obtain because shafting loads are quite various and difficult to predict. One of the ways to improve an electric propulsion system is to build up a test rig with the load part simulating various scenarios of shafting loads as per the mathematical model specially developed for this purpose and validated by the accumulated database of full-scale ice loads on shaft lines. The paper also demonstrates that propulsion motor control system must properly take into account not only external loads but also inertial torques of shaft line, motor rotor and propeller with added water mass.

Keywords: electric propulsion system, ice loads, control system, full-scale trials.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Расширение поставок отечественного энергетического оборудования для ледоколов и судов ледового плавания потребовало совершенствования систем электродвижения с целью обеспечения более надежной, безопасной и эффективной их эксплуатации.

Для таких судов нагрузки на валопровод при взаимодействии винтов со льдом характеризуются широким диапазоном и разнообразием характера их изменения во времени. Это предъявляет повышенные требования к СЭД в целом, существенно осложняет разработку системы управления (СУ) гребным электродвигателем (ГЭД) и ведет к увеличению сроков пусконаладочных работ электрических пропульсивных установок строящихся судов в процессе ввода их в эксплуатацию.

По опыту сдачи судов зарубежной постройки, эти проблемы носят интернациональный характер. Перенос даже части этих работ на электротехниче-

ский стенд и расширение использования компьютерного моделирования позволят существенно сократить сроки пусконаладочных работ на судах, в т.ч. за счет предварительной настройки СУ.

Создание нагрузки на таком стенде осуществляется при помощи нагрузочного устройства (НУ). В идеале НУ электротехнического стенда должно воспроизводить весь спектр нагрузок, возникающих в валопроводах ледоколов и судов ледового плавания как при проведении ледовых операций, так и в экстремальных ситуациях на тихой воде. При наличии такого НУ электротехнический стенд позволит решать задачи испытания СЭД при эксплуатационных нагрузках, а также разрабатывать и проверять законы управления СЭД, обеспечивающие надежную и безопасную ее работу и функционирование всего валопровода при характерных вариантах внешней нагрузки.

Однако такая задача сложна как с точки зрения математического моделирования, так и из-за трудоемкости получения точных исходных данных по нагрузкам для рассматриваемого судна. Поэтому

в качестве промежуточного шага могут быть использованы упрощенные модели нагрузок. Но даже в этом случае моделированные нагрузки должны отражать характеристики натуральных ледовых нагрузок по диапазону, временной протяженности и характеру их изменения во времени. Для моделирования различных вариантов нагрузок НУ стенда необходимо создание математической модели, генерирующей симулированную нагрузку для воспроизведения НУ.

Специалисты ледовой лаборатории Крыловского государственного научного центра, основываясь на опыте изучения взаимодействия гребных винтов (ГВ) со льдом для судов различных типов, отмечают, что характеристики ледовых нагрузок на винте и на валолинии для каждого типа судов различаются в зависимости от обводов корпуса, а также от ледовых условий и характера проведения ледовых операций. Рассматриваемый стенд предназначен для испытаний СЭД судов и должен быть универсальным, допускающим работу с установками для различных проектов. Поэтому математическая модель нагрузки для НУ должна иметь обобщенный характер, включать возможность адаптации под различные проекты, а ее работоспособность и точность результатов должны быть проверены сравнением с результатами измерений ледовых моментов на элементах валопровода, желательно на нескольких разнотипных судах.

Настоящая статья анализирует нагрузки на валопроводе, которые необходимо моделировать на нагрузочном стенде с помощью НУ. Рассмотрены также научные задачи, решение которых необходимо для создания системы управления СЭД, удовлетворяющей заданным требованиям.

1. Основные понятия и требования для системы управления электродвижением ледоколов

1. Control system for electric-propulsion icebreakers: main notions and requirements

Работа ледоколов во льдах характеризуется длительными и энергоемкими режимами с существенно переменными нагрузками на винтах. Особенности работы энергетических установок ледоколов и терминология в популярной форме освещены, например, в работах [1, 2].

Моменты на гребных валах ледоколов также меняются в широком диапазоне. На рис. 1 из ра-

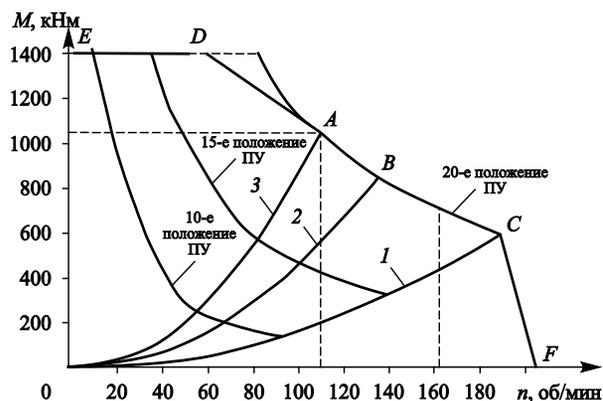


Рис. 1. Винтовые характеристики ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» и механические характеристики гребного электродвигателя

Fig. 1. Power and mechanical characteristics of propulsion motors aboard *Taymyr* and *Vaigach* icebreakers

боты [2] представлены механические характеристики ГЭД ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» (зависимость вращающего момента M от частоты вращения двигателя n). Там же нанесены винтовые диаграммы-линии (1–3), охватывающие возможные изменения нагрузок винта от хода в свободной воде, на мелководье и на швартовном режиме.

Для анализируемых в работе [2] атомных ледоколов изменение нагрузки на винте приводит к соответствующему изменению мощности источника энергии – ядерного реактора. Частые и значительные изменения мощности реактора сопровождаются тепловой нестабильностью элементов активной зоны и отрицательно сказываются на надежности его работы.

Поэтому на атомных ледоколах «Таймыр» и «Вайгач» используется способ раздельного управления мощностью реактора и гребной электрической установкой (ГЭУ), при котором мощность реактора завышается, исходя из максимальной потребности на ГВ в данных ледовых условиях. При снижении нагрузки создается избыток пара, сбрасываемый в конденсатор. Это резко снижает коэффициент полезного использования ядерной электрической установки (ЯЭУ).

Первое требование к системе управления ГЭУ, в связи с вышесказанным, – это требование поддержания постоянства мощности ГЭД при изменяющихся условиях плавания (частоте вращения вала) (линия ABC для 20-го положения поста управления на рис. 1).

При работе ледокола в ледовых условиях гребные винты находятся в постоянном взаимодействии со льдом, отбрасывая или разрушая его. Момент на валу при этом резко увеличивается, а частота вращения понижается до возможной полной остановки – заклинивания винта. Этот режим опасен с точки зрения как угрозы поломки гребного винта, так и нарушения надежности работы ГЭУ. Избежать заклинивания можно, если обеспечить на ГВ вращающий момент, достаточный для преодоления момента сопротивления на винте от усилий, возникающих при фрезеровании льда лопастями, и гидродинамического момента на винте.

Второе требование к системе автоматического регулирования состоит в возможности применения повышенного вращающего момента на гребном валу, который обеспечивает работу без заклинивания (линия *DE* на рис. 1).

В дальнейшем указанный необходимый повышенный вращающий момент на гребном валу будем называть устоявшимся в российской ледотехнике термином «оверторк» (от англ. *overtorque* – «перегрузка по моменту»), т.е. превышение максимального момента, создаваемого гребным винтом, максимального момента на швартовном режиме. Для определенности на рис. 1 номинальный момент ГЭД равен 1042 кНм, максимальный момент ГЭД – 1400 кНм, т.е. оверторк равен 1,35.

Третье требование к системе управления – ограничение частоты вращения при резком уменьшении момента сопротивления, что возможно при потере лопастей винта (линия *CF* на рис. 1). Для данных ледоколов в систему автоматического регулирования введено более жесткое ограничение максимальной частоты вращения на уровне ~162 об/мин (пунктирная линия).

Четвертое требование – в динамических режимах работы (пуск, остановка, реверс ГЭД, переход с одного уровня мощности на другой и т.д.) система управления не должна допускать перегрузку генераторов и турбин.

Пятое требование – это сохранение на долевых режимах мощности вида механических характеристик ГЭД таким же, как для номинальной мощности (пример показан на рис. 1 для 20-го, 15-го и 10-го положений поста управления ГЭУ).

Если немедленно после превышения $M_{ном}$ частота вращения вала начинает снижаться, это приведет к снижению упора и скорости хода. Если за счет оверторка компенсировать кратковременный рост нагрузки (длительность оверторка, как правило, определяется допустимым нагревом),

вызванный взаимодействием ГВ со льдом, это позволит удержать частоту вращения вала, средний упор ГВ и скорость хода. Как, например, показали испытания финского ледокола *Fennica*, величина оверторка 40 % номинального момента ГЭД позволила увеличить среднюю скорость судна во льдах на несколько узлов [1].

Рассмотрение нагрузки во льдах на пропульсивную установку в целом для определения характеристик ее работы тесно связано с рассмотрением нагрузок на каждый элемент валопровода – винт, вал, муфты (если есть), а также ГЭД в рамках решения задачи обеспечения их адекватной прочности во льдах.

Ледовые нагрузки на винте возникают при взаимодействии лезвий с лопастями. Прочность лопасти определяется нагрузками при режиме фрезерования льда. Величина силы на винте зависит от массы льдины и прочности льда, а также от скорости взаимодействия, определяемой комбинацией частоты вращения гребного винта, его диаметра, скорости движения судна и скорости льдины относительно судна.

При проектировании ледоколов и судов ледового плавания предпринимаются различные меры конструктивной защиты гребных винтов от взаимодействия со льдом, например увеличение величины зазора между винтом и корпусом судна. Однако никакая конструктивная защита не может гарантировать полное отсутствие взаимодействия движителя со льдом при выполнении любых маневров, особенно при выходе из канала, под кромками которого имеются подсои льда, или при преодолении торосистого образования. Прежде всего, для таких ситуаций и требуется наличие оверторка.

Если частота вращения винта достаточно высока, несколько лопастей могут взаимодействовать с одной льдиной. Это т.н. фрезерование льда, которое приводит к пульсирующим нагрузкам на винте с главной лопастью частотой. Данные нагрузки являются причиной вынужденных крутильных колебаний валопровода. Поскольку лопасть частота имеет тот же порядок величины, что и нижние собственные частоты линии вала, пульсирующие нагрузки на лопастях могут приводить к резонансному усилению амплитуды колебаний. Такая ситуация часто фиксируется при натурных измерениях момента на валу путем измерения деформаций сдвига. Этот отклик валопровода показан на рис. 2.

Задача о нагрузках на вал подробно рассматривается применительно к обеспечению прочности

вала при его проектировании. Поскольку все валы отличаются между собой, трудно указать проектный момент для вала, можно определить только нагрузки на винте и возмущения момента, так что проектировщики должны делать структурный анализ для собственной конструкции.

В [1] со ссылкой на работу [4] предложены формулы для амплитуды проектного момента на винте (1, 2). Амплитуда момента представлена двумя формулами для различных величин диаметра винта – предел зависит от толщины льдины (размеры льдины предполагаются равными $H_{ice}/2H_{ice}/3H_{ice}$).

$$Q_{max} = k_{open} \cdot \left[1 - \frac{d}{D}\right] \cdot \left[\frac{P_{0,7}}{D}\right]^{0,16} \times [n \cdot D]^{0,17} \cdot D^3 \text{ [кНм]}, \quad D < 1,8H_{ice}, \quad (1)$$

$$Q_{max} = 1,9 \cdot k_{open} \cdot \left[1 - \frac{d}{D}\right] \cdot \left[\frac{P_{0,7}}{D}\right]^{0,16} \cdot [n \cdot D]^{0,17} \times D^{1,9} \cdot [H_{ice}]^{1,1} \text{ [кНм]}, \quad D \geq 1,8H_{ice}, \quad (2)$$

здесь d – диаметр ступицы, $P_{0,7}/D$ – шаг на относительном радиусе 0,7, n – частота вращения винта (об/с) на швартовном режиме. Фактор k_{open} – коэффициент, изменяющийся в пределах 10–15, характеристика операционной зоны.

Если лопастная частота не очень близка к собственным частотам вала, то согласно FSICR 2008 момент для любого компонента валопровода Q_r может быть оценен по формуле:

$$Q_r = Q_{e\max} + Q_{max} \cdot \frac{I}{I_t}, \quad (3)$$

где, в обозначениях цитируемой работы, I – эквивалентный момент инерции масс всех частей на стороне двигателя рассматриваемых компонентов, I_t – эквивалентный момент инерции масс всей пропуль-

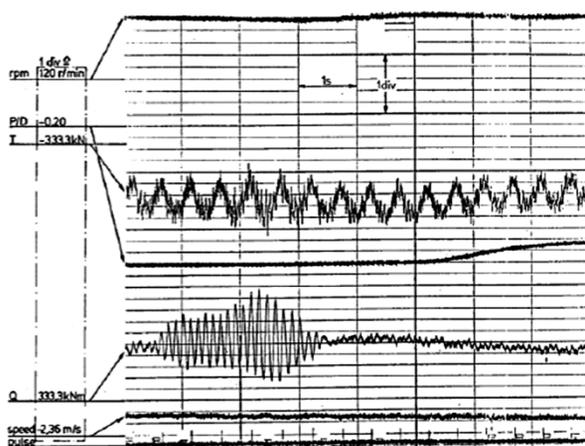


Рис. 2. Временная запись частоты вращения, шага, упора T , момента Q , скорости и пульсаций по данным [1] со ссылкой на [3]

Fig. 2. Time history: RPM, pitch, thrust T , torque Q , speed and pulses as per [1] referring to [3]

сивной системы, $Q_{e\max}$ – максимальный момент, развиваемый машиной.

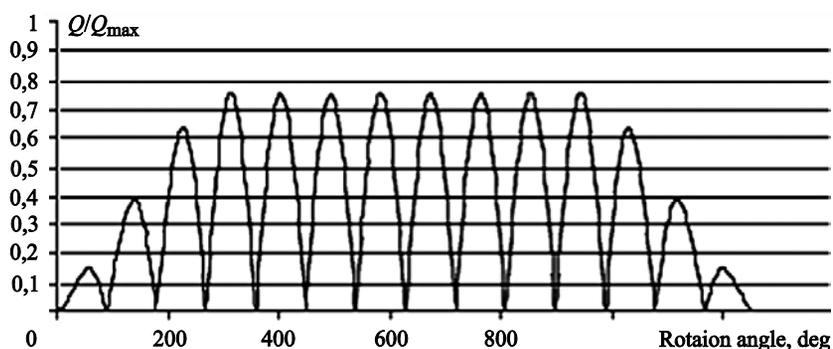
На рис. 3 представлен график возбуждения момента на валу от взаимодействия лопастей со льдом, рекомендованный в Финско-шведских правилах для ледовых судов [5]. Следует обратить внимание, что значения моментов составляют около 0,75 максимального момента.

Силы на лопасти определяются по формулам классификационных обществ. Однако в последнее время большое распространение получили расчеты напряжений в лопасти при пяти стандартизованных вариантах распределенной нагрузки, представленных в Правилах РМРС [7], соответствующих Правилам IACS. Величина распределенной нагрузки зависит от ледового класса.

В отечественной практике используются подходы, близкие к изложенным выше. Так, в учебнике по автоматизированным гребным установкам [7]

Рис. 3. Расчетный график момента от угла поворота для проектирования валопровода (FSICR 2008 [5])

Fig. 3. Calculated time history of torque for shafting design (FSICR 2008 [5])



требования к гребной электрической установке обоснованы следующим образом:

«Анализ повреждений гребных винтов и валов ледоколов и судов ледового плавания показал, что они происходят, как правило, либо после остановки винта, либо при несоответствии направления вращения винта ходу судна. Остановка гребного винта при продвижении судна во льдах представляет собой наибольшую опасность. Она может привести к поломке гребного винта или вала, поскольку при неподвижном винте его лопасти воспринимают деформацию изгиба и ломаются под действием движущегося судна. Следовательно, при повышении момента сопротивления вращению винта гребной электродвигатель должен также развивать повышенный момент, чтобы предотвратить понижение частоты вращения винта до состояния заклинивания, т.е. до полной остановки. При этом в системе автоматического регулирования ГЭУ не должно быть динамических всплесков тока якорей главных электрических машин выше максимально допустимого значения (из условий коммутации и нагрева)».

Для примера ниже приведена формулировка требований по вращающему моменту M применительно к ледоколу проекта 22220 (рис. 4):

- режим фрезерования льда: $M_n < M < 1,6M_n$ и $0,4n_n < n < 0,6n_n$ – не более 30 с;
- режим заклинивания: $M_n < M < 1,8M_n$ и $0 < n < 0,4n_n$ – не более 10 с.

В формулах M_n – номинальный вращающий момент при частоте вращения $n_n = 120$ об/мин. Эти требования графически представлены также на рис. 4.

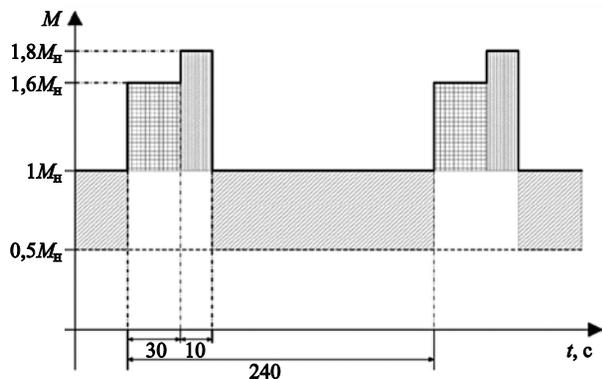


Рис. 4. Требования к вращающему моменту гребного электродвигателя ледокола проекта 22220

Fig. 4. Requirements to propulsion motor shaft torque for Project 22220 icebreaker

Изложенное позволяет сформулировать следующие положения.

Системы управления ГЭД должны допускать кратковременный оверторк для нивелирования резких повышений нагрузки от взаимодействия лопасти со льдом. Величина этого превышения момента над номинальным моментом, обычно определяемым для швартовного режима, должна быть достаточной, чтобы перекрыть все возможные превышения нагрузки, и может составлять, к примеру, 60–80 % для ледокола проекта 22220 и 40–50 % для ледоколов, спроектированных для Балтийского моря. При взаимодействии винта со льдом максимальные нагрузки на лопасти могут быть оценены по режиму фрезерования льда, например, следуя правилам классификационных обществ.

Нагрузки на лопастях имеют основную лопастную частоту, но могут приводить к динамическому возбуждению валопровода на собственных частотах, которое нужно учитывать при определении максимальных моментов в валопровode.

2. Рассмотрение возможных перегрузок по моменту на валу во льдах по результатам натурных испытаний судна «Академик Трёшников» в Антарктиде

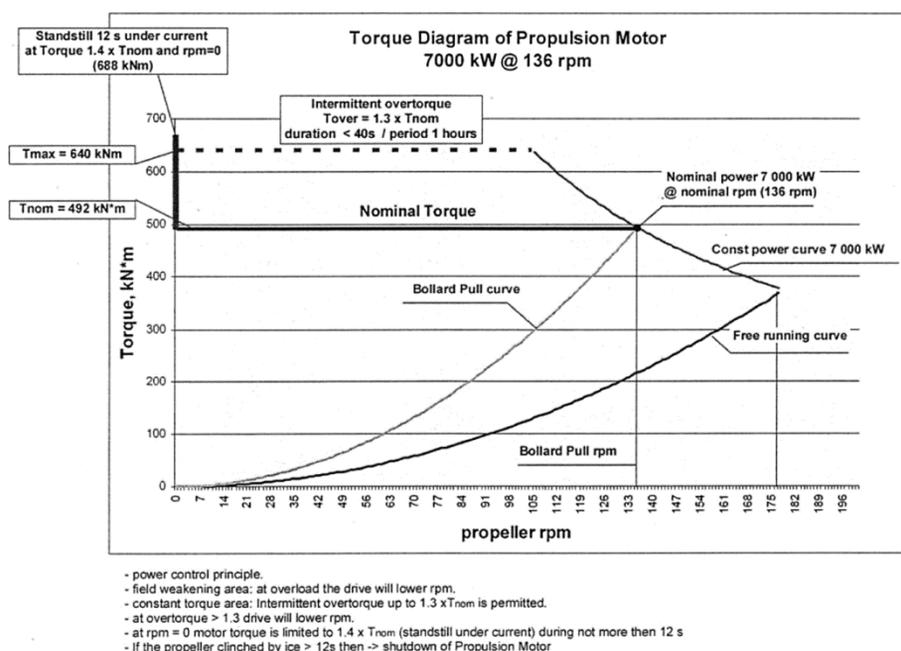
2. Possible shaft over-torques in ice conditions as per the results of *Akademik Tryoshnikov* trials in the Antarctic

Для анализа реальных величин изменения моментов ниже приведены некоторые результаты мониторинга момента, выполненного исследовательской командой Крыловского центра на научно-экспедиционном судне (НЭС) «Академик Трёшников» во время его первого экспедиционного рейса в Антарктиду в 2012–2013 гг.

Измерения проводились с использованием комплексной системы мониторинга, разработанной в Крыловском центре в 2010–2012 гг. под руководством Н.В. Васильева в рамках НИР «Мониторинг-супер» ФЦП РГМТ [8]. Эти результаты являются наиболее полными документированными данными, полученными с помощью современной аппаратуры и координированными с данными о ледовой обстановке, из опубликованных в последние годы в России.

Рис. 5. Механическая характеристика гребного электродвигателя от производителя

Fig. 5. Speed-torque curve of propulsion motor (preliminary, as given by the manufacturer)



НЭС «Академик Трёшников» было построено на АО «Адмиралтейские верфи» в 2012 г. Главные размерения: длина наибольшая 133,59 м; ширина 23,0 м; осадка 8,9 м; водоизмещение 12 700 т. Судно оснащено тремя дизель-генераторами Wartsila (2×6300 кВт и 1×4200 кВт) и двумя гребными электродвигателями мощностью 2×7000 кВт.

Характеристики гребного винта: диаметр 4,4 м; шаг на относительном радиусе $0,7 - P/D_{0,7} = 0,94$; дисковое отношение $A/Ad = 0,656$. Проектная точка – скорость 16 уз, 150 об/мин; мощность двигателя 4130 кВт; коэффициент упора $Kt = 0,14$; коэффициент момента $10Kq = 0,241$. На швартовном режиме $n_{max} = 134$ об/с; $Kt = 0,419$; $10Kq = 0,556$; мощность двигателя 7000 кВт.

Механическая характеристика ГЭД (зависимость момента от частоты вращения) представлена на рис. 5. В данном документе производителя момент обозначен как T (в остальных разделах настоящей работы момент обозначается Q).

Приведем формальный перевод примечания к документу производителя (курсивом) с дополнительными комментариями.

«Принципы управления мощностью:

- *Зона ослабления поля – при перегрузках система снижает обороты.*
- *Зона постоянного момента – допускается периодический оверторк $1,3T_{nom}$.*
- *При оверторке свыше $1,3T_{nom}$ мотор снижает обороты.*

- *При нулевых оборотах двигателя под током (остановка винта) допускается момент $1,4T_{nom}$ в течение 12 с.*
- *Если винт заклинен льдом более чем на 12 с, происходит отключение двигателя».*

Как видно из рис. 5, номинальный момент составляет $T_{nom} = 492$ кНм, двигатели допускают оверторк, равный $1,3T_{nom}$ до 640 кНм. Достижение такой величины момента допускается на период длительностью до 40 с с периодичностью 1 раз в час (intermittent overtorque на рис. 5). Кроме того, в течение 12 с допускается работа при $1,4T_{nom}$ при блокировке винта до остановки, с моментом, равным 688 кНм (standstill 12 s under current at torque $1,4 \times T_{nom}$ and $rpm = 0$ на рис. 5). Если винт заклинен льдом более чем на 12 с, происходит отключение ГЭД. Номинальная мощность на швартовах равна 7000 кВт при 136 об/мин.

На судне было установлено множество датчиков ледовой нагрузки на корпусе и на гребном валу. Синхронно регистрировались параметры движения судна в целом, вибрации в характерных точках корпуса и основных механизмов, деформаций обшивки в носовой оконечности корпуса, а также частоты вращения, момента на валу (момента вращения, пропорционального углу скручивания вала, измеренного с помощью тензометрических датчиков) и упора на гребных валах. Запись натурных данных, как правило, велась в режиме эксплуатационного мониторинга (все ходовое время).

Перед каждым этапом ледовых испытаний специалисты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) определяли также параметры ледового поля. В настоящей работе анализируются только записи момента на валу и частоты вращения, которые служат индикатором изменения нагрузки на гребном винте.

Ниже (рис. 6–13, см. вклейку) рассмотрены режимы, наиболее интересные для практики эксплуатации судна, включая те, что характеризуются наибольшими нагрузками пропульсивного комплекса.

Для каждого режима в единой шкале времени представлены реализации скорости хода V_s , усредненной за оборот частоты вращения n , и скручивающего момента Q одного из двух гребных валов судна.

Движение в тонком ледовом поле

Судно шло во льду толщиной 60–70 см с установленной скоростью на режиме, соответствующем 75 % мощности (практически постоянный вращающий момент на валу составлял примерно 400 кНм). Как видно из рис. 6 (см. вклейку), мгновенное значение момента при случайной встрече со льдом (скорее всего, это удары отдельных льдин) не превышало спецификационного, хотя и было близко к ним.

Движение по каналу в толстом ледовом поле

Более существенно изменяется момент на валу при случайном контакте со льдом в процессе разгона по каналу в толстом ледовом поле (рис. 7, см. вклейку).

При контакте со льдом момент на валу растет менее чем за 1,5 с с 300 кНм до примерно 450 кНм, т.е. не превышает не только допустимого оверторка, но и номинального вращающего момента. При этом частота вращения винта падает с 118 до 111 об/мин под действием момента взаимодействия лопастей со льдом. Обращает на себя внимание длительный (12–13 циклов) затухающий процесс колебаний после снятия нагрузки с частотой около 6 Гц, что соответствует собственным частотам колебаний валолинии.

Движение задним ходом в толстом ледовом поле

На судне при проведении ледовых операций наряду с традиционными режимами, т.е. носом вперед,

предусмотрено использование режимов преодоления льдов кормой вперед, характерных для современных ледовых судов двойного действия (double action ship, DAS).

На режиме плавания задним ходом в ровных льдах, соответствующем по толщине максимальной ледопроеходимости (1,2 м), зарегистрированы высокие пиковые значения момента на валу (рис. 8–9, см. вклейку). Представленные рисунки показывают, что при нагрузке ГЭУ примерно 60 % номинального момента (300 кНм) при ледовых контактах мгновенные нагрузки в основном не превышают допускаемых величин (рис. 5), хотя и близки к ним. Снижение частоты вращения при таком возмущении составляет 1–2 об/мин. Для примера, на рис. 9 при отдельном контакте со льдом в момент времени по шкале на графике около 3964 с максимальный замеренный момент на валу достигает 600 кНм.

Общая длительность взаимодействия составляет около 2 с. Это вполне укладывается в предусмотренный для ГЭД оверторк и не требует включения регулирующей системой ограничений по моменту.

Движение набегам в тяжелом ледовом поле

В тяжелых льдах судно не может поддерживать постоянную скорость и продвигается набегам: отходит задним ходом по каналу, разгоняется и ломает лед за счет инерции до полной остановки. На режиме «набег» (рис. 10–11, см. вклейку) при исходном вращающем моменте на валу около 70 % от номинального максимальная скорость судна в канале достигала около 9 уз.

Максимальная нагрузка на движители на этом режиме возникает, когда судно практически останавливается, нагрузка на ГВ растет и он засасывает обломки льда из-под кромки поля. При этом максимальные пики мгновенной нагрузки на гребном валу в течение примерно 2 с достигают 630 кНм, т.е. находясь в пределах допустимого оверторка. В соответствии с механической характеристикой ГЭД (рис. 5) СУ ГЭУ обеспечивает поддержание постоянной мощности, и частота вращения снижается со 130 до 120 об/мин также на 2 с, после чего восстанавливается.

Выход задним ходом из канала в тяжелом ледовом поле

Наибольшие моменты на гребном валу зафиксированы на режиме выхода судна из канала задним

ходом в тяжелом ледовом поле (рис. 12–13, см. вклейку). Канал был забит обломками льда, заметную роль могли играть подсоны льда под кромками канала, а также торосистые образования, которые, согласно заметкам исследователей, находились на ледовом поле, где проводились испытания судна.

Момент на гребном валу, с которым судно начинало выход из канала (рис. 12), составлял около -350 кНм, т.е. 71 % номинального или 50 % максимально допустимого момента. В ходе взаимодействия со льдом пиковые величины момента на валу увеличивались с -350 кНм до -1350 кНм, и таким образом он достигал величины, которая превышает максимально допустимую кратковременную нагрузку при вращающемся винте 640 кНм в 2,1 раза. При этом в результате серии контактов ГВ со льдом за 5 с – с $8307,5$ до $8312,5$ с (рис. 13) частота вращения гребного вала снижается со 122 до 95 об/мин, пересекая зону крутильного резонанса валопровода в районе 105 об/мин (пунктир на рис. 12).

Данные, характеризующие взаимодействие ГВ со льдом при различных ледовых операциях, измеренные на судне «Академик Трешников», сведены в таблице.

Точных данных о работе СУ ГЭУ на НЭС «Академик Трешников» нет. Однако приведенные показатели демонстрируют, что в рассматриваемых режимах СУ обеспечивает регулирование частоты вращения на режимах с замеренными максимальными пиковыми значениями момента на валу (набег, выход задним ходом из канала) существенно (в 2–2,5 раза) превышающими максимальный момент электродвигателя.

Следует также заметить, что в ходе испытаний на НЭС «Академик Трешников» не было возможности вести мониторинг параметров гребного электродвигателя. Поэтому имеющиеся данные не позволяют судить о том, как СУ ГЭУ реагировала на всплески момента на валу, нет данных об изменении вращающего момента на выходном валу электродвигателя, нет данных об электромагнитных процессах ни в самом ГЭД, ни в системе электродвижения в целом. Эти данные не предоставляются производителем электрической пропульсивной системы. Следовательно, нельзя исключать, что представленная выше физическая картина могла включать в себя влияние процессов в системе электродвижения.

Таблица. Обобщение данных режимов, представленных на рис. 6–13

Table. Summary data on the scenarios given in Figs. 6–13

Условия нагрузки	Режим работы ГЭД	Пики момента, максимальные значения	Пики момента, продолжительность изменений	Снижение частоты вращения	Примечания
Случайные контакты ГВ со льдом в тонком поле	400 кНм, ок. 130 об/мин	460 кНм	Резкие контакты длительностью 2–3 с	0,6 об/мин	Рис. 6
Случайные контакты ГВ со льдом в канале в толстом поле	300 кНм, 119 об/мин	460 кНм	3,5 с (пакет из 24 лопастных пиков)	Снижение со 118 до 111 об/мин	Рис. 7
Частые контакты ГВ со льдом на заднем ходу в толстом поле	-300 кНм, 114,5 об/с	-580 кНм	2 с (пакет 15 лопастных пиков)	В пределах 1 об/мин	Рис. 8–9
Максимальные нагрузки при торможении в режиме «набег» в тяжелом ледовом поле	Рост 350–400 кНм, 130 об/мин	680 кНм	1,5 с	10 об/мин	Рис. 10–11
Выход задним ходом из канала в тяжелом ледовом поле	-350 кНм, 115 об/мин	-1353 кНм	Серия контактов 5 с	Со 122 до 95 об/мин	Рис. 12–13

3. Анализ составляющих уравнения вращательного движения валопровода

3. Analysis of the terms in the shaft rotation equations

Чтобы корректно проанализировать результаты измерений момента на валу на судне «Академик Трёшников», необходимо рассмотреть некоторые особенности работы электрической пропульсивной установки.

Как уже отмечалось, в ее состав входят гребной электродвигатель с системой управления, валопровод и гребной винт. Соответственно, гребной электропривод – это система, в которой следует рассматривать два процесса – электро-механический и электромагнитный, причем электромагнитный процесс значительно быстрее электро-механического.

В связи с этим СУ гребного электропривода должна иметь два канала регулирования – по частоте и по току (электромагнитному моменту). Задача канала регулирования по току – не допустить перегрузки ГЭД и силовых ключей преобразователей частоты (ПЧ). Нужно учитывать, что электромагнитный момент пропорционален току. Ток (как и момент) возрастает значительно быстрее изменений частоты вращения. Поэтому вводится строгое ограничение на ток (момент) ГЭД. Поскольку длительность процессов разная, то даже с учетом инерции самой системы управления правильно функционирующая СУ не ждет изменения частоты вращения, а работает исходя из ограничения по току.

Электро-механический процесс, происходящий в системе «винт – вал – ротор ГЭД», подчиняется уравнению вращательного движения валопровода:

$$M - M_c = J(d\omega/dt), \quad (4)$$

где M – вращающий момент ГЭД; M_c – момент на рабочем механизме (на винте); J – момент инерции вращения движущихся частей (ротор ГЭД, вал, винт с присоединенными массами воды, а также, при наличии, навешанные на вал устройства); ω – угловая скорость вала двигателя.

Учитывая задачи настоящей работы, уравнение (4) можно также представить в виде выражения для вращающего момента двигателя:

$$M = J(d\omega/dt) + M_c. \quad (5)$$

При работе рассматриваемой системы вращающий момент ГЭД M регулируется и ограничива-

ется как по току, так и в соответствии с заданными механическими характеристиками (рис. 5).

Момент на рабочем механизме (гребном винте) M_c при работе во льдах включает гидродинамический момент при работе ГВ и ледовый момент, возникающий при взаимодействии лопастей со льдом (вторая составляющая может существенно превышать первую). Формулы (1) и (2) для определения ледового момента рассмотрены в разделе 1.

Необходимо обратить внимание, что в уравнении член $J(d\omega/dt)$ зависит от момента инерции системы и производной по времени от угловой скорости вала (частоты вращения), т.е. отличен от 0 только при изменении частоты вращения. Этот член имеет размерность момента, и его можно назвать инерционной составляющей уравнения момента или инерционным моментом. При вращении вала с постоянной скоростью или при заклинке (полной остановке винта во льдах) инерционный момент равен нулю, и момент на валу равен вращающему моменту двигателя (в случае заклинка винта – это предельный кратковременный момент).

При снижении частоты вращения величина инерционной составляющей момента уже не равна 0, она отрицательна $J(d\omega/dt) < 0$, и согласно уравнению (5) вращающий момент двигателя будет меньше нагрузочного момента на винте.

Однако следует дополнительно обратить внимание, что, например на рис. 13, в зоне, где электропривод преодолел более чем двукратную пиковую нагрузку по моменту на валу (в диапазоне по времени 8311–8313 с на рис. 13), зависимость изменения частоты вращения качественно отличается по характеру от зарегистрированной временной функции мгновенного момента: отсутствуют высокие острые пики с лопастной частотой. График частоты скорее повторяет поведение огибающей или некоей осредненной зависимости момента от времени.

Можно предположить, что колебания мгновенного момента с лопастной частотой пиковых величин нивелируется инерционной составляющей (инерционным моментом) на валопроводе в уравнении (5), происходит т.н. автоматическое осреднение момента. При этом вопрос, как происходит это осреднение, т.е. какова связь между замеренными величинами момента и какая часть мгновенного момента доходит до гребного электродвигателя, остается открытым. Для получения ответа необходимы данные синхронной

фиксации параметров тока в электрической цепи и расчет электромагнитного момента. Это является одной из задач, которая должна решаться в дальнейшем.

По опыту ледовых испытаний ранее, при обработке осциллограммы измерений на гребных валах, за ледовый момент принималась его относительно медленно изменяющаяся во времени составляющая (т.е. также проводилось осреднение по времени). Вокруг этой относительно медленно меняющейся составляющей происходили осцилляции с лопастной частотой. При этом считалось, что характеристики гребных электроустановок не отзывались на крутильные колебания с лопастной частотой, реагируя только на существенно более низкочастотное изменение осредненного момента.

Если трактовать ледовый момент в приведенных натурных измерениях именно так, т.е. как некоторую осредненную величину, то для большинства обследованных случаев максимумы осредненного максимального ледового момента не будут превышать разрешенного оверторка, так что никаких экстремальных действий со стороны СУ не требуется.

Этот вопрос очень важный. Если данное предположение о работе системы верно, т.е. столь инерционная система, как «винт – валопровод – ротор», не может реагировать на возмущения высокой (лопастной) частоты, то возникают совершенно другие требования для описания ледовой нагрузки для НУ. В этом случае нет необходимости рассматривать отдельное взаимодействие лопасти со льдом, достаточно описать некий интегральный процесс.

Но в этой связи возникает целый ряд вопросов, которые еще необходимо изучать. Например, требуется определить частоту изменения нагрузки на валу, ниже которой электрический привод начинает изменять частоту вращения, а также узнать, какова связь между максимальными моментами в пакете лопастных пиков и тем, на что реагирует электросхема, что доходит до электросхемы с учетом механической инерции вращения составляющих системы.

Таким образом, проведенный анализ показал, что при динамических процессах (с изменением частоты вращения вала) при снижении оборотов проявляется влияние инерционного момента системы «винт – валопровод – ротор электродвигателя». Изменения момента на винте и электромагнитного момента двигателя уже не равны, значение элек-

тромагнитного момента может меняться меньше, чем значение момента на винте. При этом даже в сложных режимах ледовой нагрузки гребного винта (например, при выходе из канала задним ходом, рис. 13) пропульсивная система может благополучно преодолеть пиковые высокочастотные перегрузки по моменту на валу более чем в 2 раза. Это свидетельствует об обеспечении СУ в этом случае заявленных производителем механических характеристик ГЭД.

4. Задачи, которые необходимо решить при создании управления гребным электроприводом

4. Challenges in development of electric propulsion drive control system

В соответствии с проведенным выше анализом, при разработке компьютерного обеспечения стендовой отработки СУ СЭД ледовых судов для моделирования нагрузок на валолинии при взаимодействии винта со льдом должна быть в общем случае разработана обобщенная математическая модель.

Такая модель должна обеспечить расчет как различных вариантов нестационарной ледовой нагрузки, возникающей на валолинии ледокола при проведении различных ледовых операций и передающейся к электроприводу судна через валолинию с учетом ее инерционного момента, так и экстремальные нагрузки на тихой воде (например, при экстренном реверсе).

При компьютерной отработке СУ СЭД такая математическая модель может использоваться непосредственно. Для стендовой отработки системы управления понадобится обобщенная математическая модель внешней нагрузки, учитывающая возможности имеющегося НУ. Такая модель должна воспроизводить требуемую внешнюю нагрузку и применяться для автоматической генерации законов управления НУ с использованием нагрузки, рассчитанной с помощью математической модели валопровода.

При разработке программной части СУ СЭД необходимо учитывать, что при динамическом взаимодействии винта со льдом момент в любом сечении валолинии включает три указанные выше составляющие: момент от гребного винта, момент от электродвигателя и инерционный момент валолинии (с учетом присоединенных масс гребного винта). Указанные моменты зависят от характера и уровня возбуждающих нагрузок, частоты враще-

ния валопровода и ее изменения, а также влияния колебательных процессов на валопровод.

Для создания адекватной СУ ГЭУ необходимы математические модели:

1. гребного винта при различных режимах его взаимодействия со льдом;
2. валопровода при характерных колебательных и переходных режимах работы;
3. ГЭУ при характерных колебательных и ударных режимах изменения внешней нагрузки.

В настоящее время уровень разработки указанных математических моделей различен, и эти модели требуют уточнения, особенно учитывая жесткие требования к регулированию пропульсивной установки. Поэтому в ходе натурных испытаний судов (включая ледовые испытания) важно получать и систематически накапливать информацию о кинематических и динамических параметрах валопровода, а также – синхронно – измерять данные электромагнитных процессов в ЭД. После этого можно ставить задачу идентификации условий работы валопровода (т.е. вращающего момента электродвигателя, гидродинамического и механического моментов на ГВ) как условий, при которых математические модели адекватно воспроизводят происходящие процессы.

Для создания математической модели, способной наиболее полно симулировать нагрузки на валопровод, необходимо решение ряда научных и проектных задач. В их числе:

Уточнение условий взаимодействия лопастей со льдом и обоснование нагрузок на лопасти при выполнении ледокола или судном ледового плавления различных ледовых операций. Чтобы учесть особенности поведения льда вблизи корпуса рассматриваемого судна, эта работа должна выполняться в условиях ледового бассейна при испытаниях модели каждого рассматриваемого ледокола. Нужно определить параметры взаимодействия лопастей со льдом (удар или фрезерование, толщина и размеры надвигающихся на винт льдин) в зависимости от скорости, выполнения маневра во льдах, взаимодействия с неравномерным по толщине льдом. Кроме того, необходимо развивать проводившиеся ранее лабораторные испытания по фрезерованию льда (лучше в воде, а не в воздухе), обращая особое внимание на замеры изменения момента на валу.

Определение максимальных моментов, индуцированных на валопровод при взаимодействии лопастей со льдом при различных ледовых опера-

циях. Представляется, что в качестве простейшей модели для приближенного определения максимального момента на валу, индуцированного при взаимодействии винта со льдом, можно ориентироваться на момент при максимальной нагрузке на лопасть, принимаемой при расчете прочности гребных винтов по правилам классификационных обществ. Однако этот вопрос требует уточнения с учетом работы при выполнении различных ледовых операций.

Определение инерционной составляющей момента, а также динамических колебаний момента на валопроводе, приводящих к периодическому моменту на валу. Отработка алгоритма управления ГЭУ, позволяющего гасить динамические моменты на валопроводе.

Определение соответствия момента на валопроводе и электромагнитного момента на электродвигателе с учетом влияния инерционного момента системы «винт – валопровод – ротор двигателя», а также определение необходимого электромагнитного момента электродвигателя при выполнении различных ледовых операций.

Определение моментов на валопровод и характеристик реверса судна на чистой воде. В Крыловском центре еще в XX в. разработаны программы расчета реверса, позволяющие с приемлемой точностью определять интегральные характеристики реверса при использовании результатов модельных испытаний гребного винта в четырех квадрантах. Однако определение мгновенных нагрузок на винте при этом приближительное и нуждается в уточнении.

Создание программного обеспечения для расчета нагрузки на нагрузочной части стенда, соответствующей различным ледовым операциям. В связи с решением данной задачи необходимо отметить следующее. Как было указано выше, обобщенная математическая модель внешней нагрузки должна соответствовать возможностям НУ электротехнического стенда. На начальной стадии нагрузочная часть стенда (НУ и соответствующая ему математическая модель внешней нагрузки) может быть основана на воспроизведении простейших форм нагрузки, таких как: постоянная стационарная нагрузка; изменение нагрузки с постоянной скоростью с разными градиентами; синусоидальная нагрузка с заданной амплитудой и периодом (частотой); скачок (функция Хевисайда) – ударное изменение уровня нагрузки; всплеск (функция Дирака) – удар без изменения уровня нагрузки. Возможно также представление нагруз-

ки с помощью других известных функций. Естественным продолжением может быть комбинирование простейших форм нагрузки для реализации более сложных форм.

Однако, как указывалось ранее, при моделировании даже простейших видов функции нагрузки от времени следует использовать основные параметры (размах изменения момента с учетом инерционной составляющей, продолжительность воздействия нагрузки и вид ее зависимости по времени), которые должны соответствовать реальным величинам, полученным в ходе натурных испытаний. Важно, что при оценке параметров вращающего момента ГЭД, которые необходимо получить с помощью СУ для компенсации нагрузок на гребном винте, или при их моделировании на стенде СУ должна учитывать влияние инерционной составляющей системы «винт – валопровод – ротор двигателя – навесное оборудование».

5. О валидации математических моделей по результатам специализированных натурных испытаний

5. Validation of mathematical models as per the results of special full-scale trials

Сложность рассмотренных процессов требует обратить особое внимание на валидацию разработанных математических моделей. Наиболее надежным способом такой валидации является сопоставление расчетных параметров с данными натурального эксперимента. Поэтому задачей, которая во многом может определить успешность решения всех остальных, является проведение специально поставленных натурных измерений, обеспеченных соответствующей научной аппаратурой (наряду со штатными приборами, установленными на судне, которые, как правило, не в полной мере обеспечивают необходимую точность таких измерений).

Представленные выше материалы натурных испытаний НЭС «Академик Трешников» дают представление о способах получения и объемах натурных данных, необходимых для валидации математических моделей валопроводов. Кроме того, результаты этих испытаний могут быть непосредственно использованы для валидации разрабатываемой математической модели и программного обеспечения.

Однако «Академик Трешников» – это научно-экспедиционное судно, имеющее функции, близ-

кие к функциям транспортных судов. Современные ледоколы имеют обводы корпуса, отличающиеся от обводов НЭС, и их операционные режимы во льдах намного сложнее. Поэтому принципиально важно получить аналогичные материалы по нагрузкам на всех валовых линиях ледоколов (например, нагрузки на бортовых и среднем валах при трехвальной компоновке будут заведомо различаться). При этом особое внимание следует уделить режимам движения ледокола со скоростями 10–12 уз во льдах толщиной 1,5–2 м. Эти режимы являются наиболее благоприятными для эффективного функционирования транспортных систем для вывоза СПГ из арктических районов [9]. В то же время информация о ледовых воздействиях на систему «гребной винт – валопровод – ГЭД» при указанных скоростях движения практически отсутствует.

Для анализа эксплуатационных нагрузок на валопроводах современного многовального ледокола при различных режимах его работы необходимо провести комплексный мониторинг параметров движения судна в целом, средств управления движением (в т.ч. параметров СЭД) и напряженно деформируемого состояния всех трех валопроводов на этапе ледовых испытаний. Такие работы можно провести, например, при сдаточных испытаниях одного из ледоколов проекта 22220 при условии соответствующего дополнительного его оснащения.

Ледокол проекта 22220 имеет СЭД, подключенную к бортовой системе единого времени. СУ СЭД ведет собственную регистрацию данных, формируя базу данных, которую можно использовать при сдаточных испытаниях или рейсовом мониторинге. Однако частота записи в этой базе данных невелика (при испытаниях на ледоколе 22220 – не более 4 Гц). Этого недостаточно для анализа даже резонансных процессов в валопроводе (первая собственная частота крутильных колебаний составляла порядка 6 Гц), а также ударных процессов на ГВ с лопастной частотой. Кроме того, в случае отказа СЭД параметры преобразования частоты (ПЧ) сохраняются лишь за небольшой промежуток времени, непосредственно предшествующий отказу. Таким образом, штатной системы регистрации недостаточно для полного анализа высокочастотных процессов, возникающих в СЭД при работе во льдах.

Поэтому для получения полных и объективных данных о фактическом характере нагружения валопровода и о характере внешней нагрузки

СЭД необходима установка дополнительной системы измерений, подключенной к единой системе бортового времени, желательна на всех валопроводах (на каждом – в двух сечениях, в частности на выходном фланце ГЭД – для измерения частоты вращения и момента, и на гребном валу – для измерения упора, крутящего и изгибающего моментов).

Для проведения комплексного рейсового мониторинга на этапе ледовых испытаний на судне необходимо предусмотреть инфраструктуру натуральных испытаний, которую значительно проще создавать в ходе строительства (на готовом судне это сделать сложно). При этом целесообразно рассмотреть возможность более детального мониторинга СЭД с частотой не менее 100 Гц хотя бы в части параметров ГЭД.

Заключение

Conclusion

Как показано в приведенном анализе, при разработке СЭД для судов ледового плавания необходимо обеспечить высокоэффективную систему управления гребным электродвигателем. Система должна обеспечивать надежную и безопасную работу электродвигателя при взаимодействии винта со льдом в рамках требований, заложенных при разработке СЭД.

Сложность создания системы управления связана с большим разнообразием и трудностями прогнозирования нагрузок на валопровод. Поэтому одним из важных путей отработки такой системы является создание нагрузочного стенда. Нагрузочная часть такого стенда должна быть способна создавать различные варианты нагрузок на выходной вал ГЭД, чтобы обеспечить адекватную реакцию на них СЭД в целом.

Расчет нагрузок следует проводить с помощью математической модели с использованием накопленной в ходе натуральных испытаний базы данных о ледовых нагрузках валопровода. Указанные данные должны в максимальной степени учитывать особенности ледового взаимодействия корпуса и движителей каждого рассматриваемого судна со льдом. При этом необходимо учитывать инерционную составляющую системы «гребной винт – валопровод – ротор электродвигателя».

В качестве примера рассмотрены результаты натуральных измерений моментов на валу при работе в ледовых условиях судна «Академик Трешни-

ков». Эти результаты указывают на важность корректного учета в СУ ГЭД не только внешних гидродинамических и ледовых нагрузок, но и инерционных моментов валопровода, винта и ротора электродвигателя.

На основании проведенного анализа сформулирован ряд задач, решение которых необходимо, пусть даже с определенной степенью приближенности, для создания адекватных систем управления СЭД и стенда для их отработки.

Список использованной литературы

1. Riska K. Design of Ice Breaking Ships // Cold Regions Science and Marine Technology / Ed. Hayley H. Shen. [S.l.] : EOLSS, [2015]. Vol. 1. URL: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-178-45-00.pdf> (accessed: 19.01.2022).
2. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А.С. Быков, В.В. Башаев, В.А. Малышев, В.В. Романовский. Санкт-Петербург : Элмор, 2004. 318, [1] с.
3. Koskikivi J., Kujala P. Long-term Measurements of Ice Induced Loads on the Propulsion Machinery of Product Tunker Sotka. Helsinki : Technical Research Centre of Finland, 1986. 71, [32] p. (Research report / Winter Navigation Research Board; 42).
4. Browne R., Norhamo L. Background Notes to “Propeller Ice Interaction Loads” // IACS Unified Requirements for Polar Ships. London : International Association of Classification Societies, 2007. 15 p.
5. Ice class regulations 2008 (Finnish-Swedish ice class rules): Ad. in Helsinki on 8 December 2008 (No. 2530/30/2008) // Finnish Maritime Administration’s Bulletin. Helsinki, 2008. No. 10/10.12.2008. 48 p. (pag.var.).
6. Правила классификации и постройки морских судов (НД № 2-020101-044). Т. 3. Ч. XVII: Общие правила по конструкции и прочности нефтеналивных судов с двойными бортами / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2006. 582 с.
7. Хайкин А.Б., Васильев В.Н., Полонский В.И. Автоматизированные гребные электрические установки. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1986. 423, [1] с.
8. Pustoshny A.V., Vasiljev N.V., Shaposhnikov V.M. Some aspects of regulation for propulsors of ice class ships // 10th Annual Arctic Shipping Forum. Helsinki, 2014.
9. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов

в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3(27). С. 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.

References

1. *Riska K.* Design of Ice Breaking Ships // *Cold Regions Science and Marine Technology* / Ed. *Hayley H. Shen*. [S. 1.] : EOLSS, [2015]. Vol. 1. URL: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-178-45-00.pdf> (accessed: 19.01.2022).
2. *A. Bykov, V. Bashaev, V. Malyshev, V. Romanovsky.* Propulsion motors of nuclear icebreakers. St. Petersburg, Elmor, 2004, 318 [1] pp. (in Russian).
3. *Koskikivi J., Kujala P.* Long-term Measurements of Ice Induced Loads on the Propulsion Machinery of Product Tunker Sotka. Helsinki : Technical Research Centre of Finland, 1986. 71, [32] p. (Research report / Winter Navigation Research Board; 42).
4. *Browne R., Norhamo L.* Background Notes to “Propeller Ice Interaction Loads” // IACS Unified Requirements for Polar Ships. London : International Association of Classification Societies, 2007. 15 p.
5. Ice class regulations 2008 (Finnish-Swedish ice class rules): Ad. in Helsinki on 8 December 2008 (No. 2530/30/2008) // Finnish Maritime Administration’s Bulletin. Helsinki, 2008. No. 10/10.12.2008. 48 p. (pag.var.).
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVII: Common Structural Rules (CSR) for Double-Hull Oil Tankers. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2006.
7. *A. Khaikin, V. Vasilyev, V. Polonsky.* Automated propulsion motors. 4th ed., rev. and enl. Moscow, Transport, 1986, 423 [1] pp. (in Russian).
8. *Pustoshny A.V., Vasiljev N.V., Shaposhnikov V.M.* Some aspects of regulation for propulsors of ice class ships // 10th Annual Arctic Shipping Forum. Helsinki, 2014.
9. *A. Pustoshny, K. Sazonov.* Challenges in acceleration of all-year round operation of large carrier ships in the Arctic // *Arctic: Ecology and Economy*. 2017, No. 3(27), pp. 103–110 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.

Половинкин Валерий Николаевич, д.т.н., профессор, научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

Пустошный Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: a.pustoshny@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Васильев Николай Васильевич, начальник стенда комплексного обеспечения натурных испытаний 21-й лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-52. E-mail: n_vasilev@ksrc.ru.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Калинин Игорь Михайлович, д.т.н., начальник отдела перспективного развития и инновационных разработок ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kaigmi@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1532-4449>.

About the authors

Oleg V. Savchenko, Cand. Sci. (Eng.), Director General, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Valery N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Principal, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

Alexander V. Pustoshny, Dr. Sci. (Eng.), Corresponded member of Russian Academy of Science, Principal research scientist – consultant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: a.pustoshny@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Nikolay V. Vasiliev, Head of the Stand for Integrated Support of Full-scale Tests of the 21st Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-52. E-mail: n_vasilev@ksrc.ru

Сведения об авторах

Савченко Олег Владиславович, к.т.н., генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Kirill Ye. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Igor M. Kalinin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Prospective Development and Innovative Developments Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kaigmi@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1532-4449>.

Поступила / Received: 15.02.22
Принята в печать / Accepted: 04.03.22
© Коллектив авторов, 2022

Рис. 6. Случайные контакты гребного винта со льдом в тонком поле

Fig. 6. Random contacts of propeller with ice in a thin field

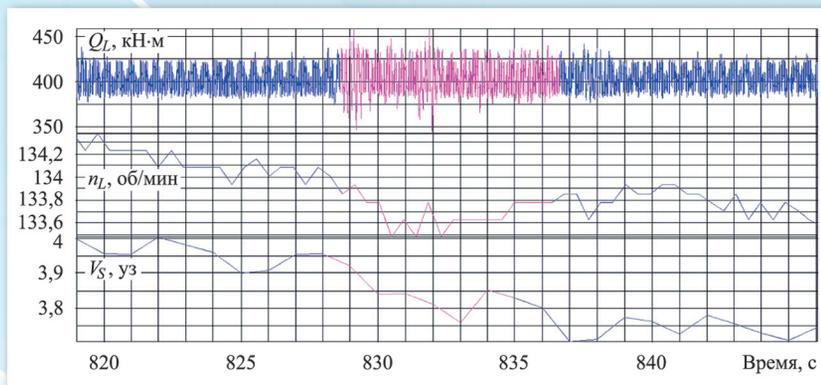


Рис. 7. Случайные контакты гребного винта со льдом при разгоне по каналу в толстом поле

Fig. 7. Accidental contacts of propeller with ice during acceleration through a channel in a thick field

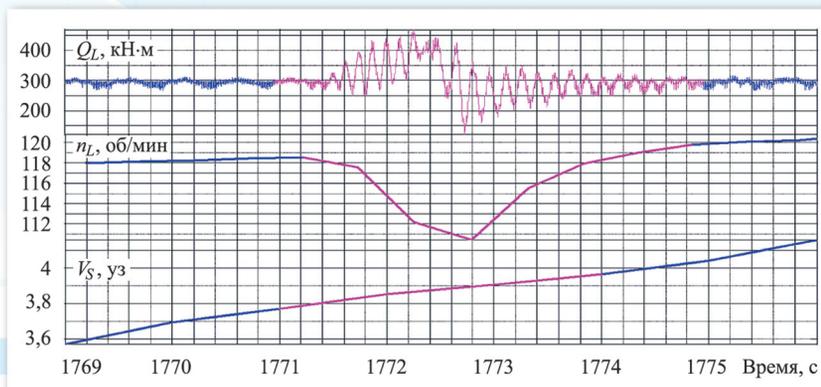


Рис. 8. Частые контакты гребного винта со льдом на заднем ходу в толстом поле

Fig. 8. Frequent contacts of propeller with ice while reversing in a thick field

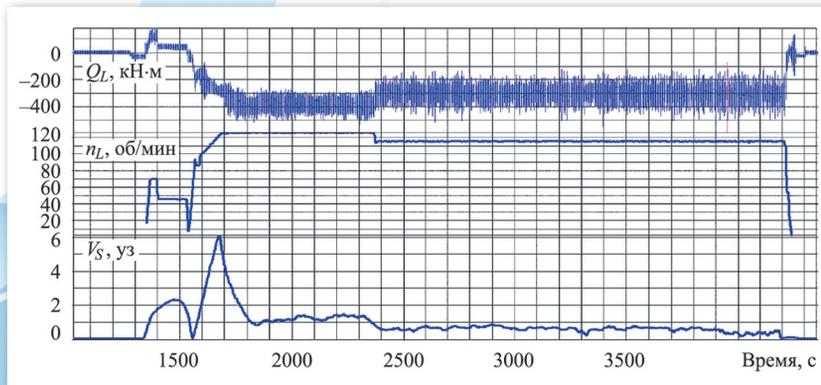
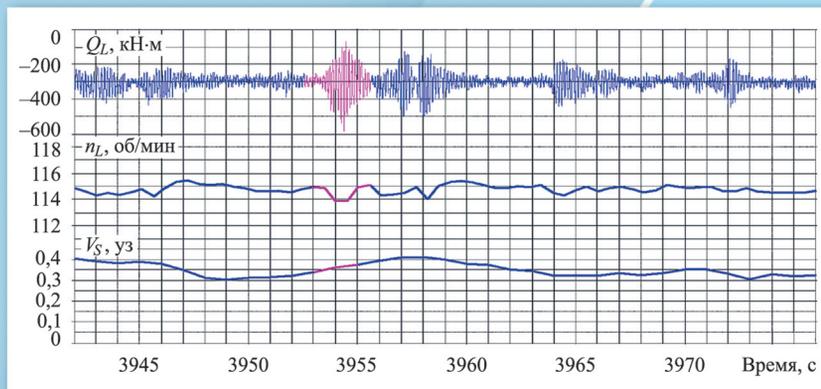


Рис. 9. Детализация контактов гребного винта со льдом на заднем ходу в толстом поле

Fig. 9. Detailing of propeller contacts with ice in reverse in a thick field



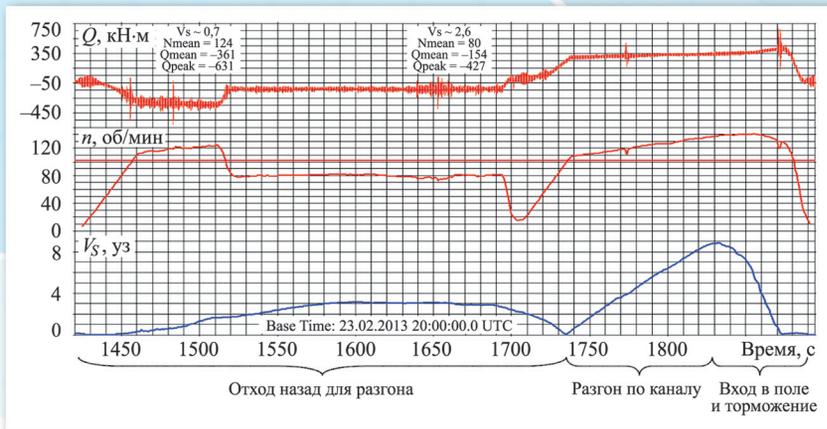


Рис. 10. Режим «набег» в тяжелом ледовом поле

Fig. 10. Mode "raid" in a heavy ice field

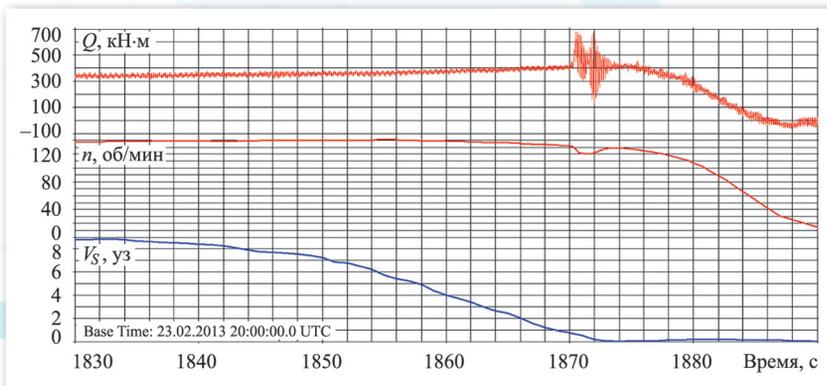


Рис. 11. Детализация максимальных нагрузок в режиме «набег» в тяжелом ледовом поле

Fig. 11. Detailing of the maximum loads in the "raid" mode in a heavy ice field

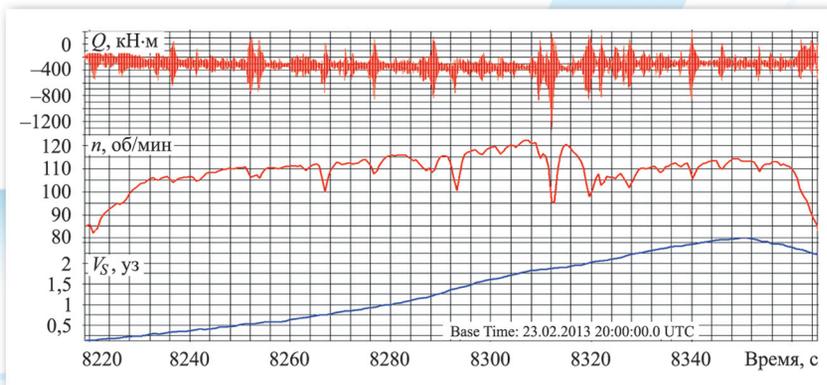


Рис. 12. Выход задним ходом из канала в тяжелом ледовом поле

Fig. 12. Reverse exit from the canal in a heavy ice field

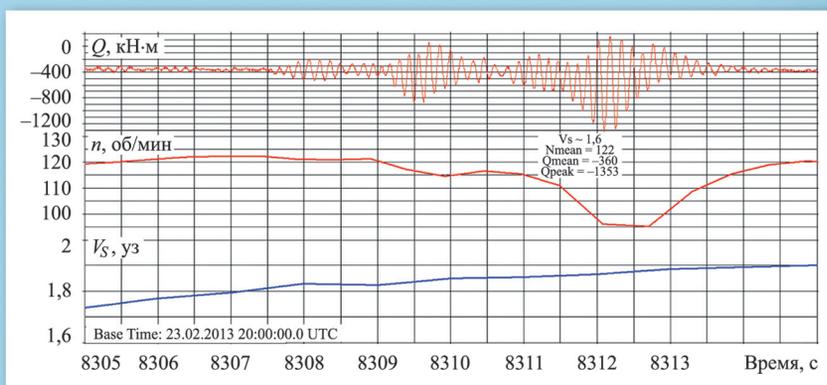


Рис. 13. Выход задним ходом из канала в тяжелом ледовом поле. Детализация пиковых нагрузок

Fig. 13. Exit in reverse from the canal in a heavy ice field. Detailing of peak loads