

## ИМИТАЦИОННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СУДАХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ

*В статье предложено рассмотрение вопросов надежности и качества судового электромеханического оборудования в части реализации задач функциональной диагностики и прогнозирования рисков их ухудшения на базе статистической концепции теории надежности. Реализация этого подхода позволит принимать более эффективные упреждающие управленческие решения по сравнению с традиционной практикой реагировать на уже случившиеся отказы техники. При этом непрерывная статистическая обработка основных параметров технологических процессов должна осуществляться непосредственно на борту судов и обеспечивать накопление данных всей предыстории текущих событий для анализа опасных тенденций их изменений (эволюции). Это положение соответствует требованиям Российского морского регистра судоходства к системе мониторинга механических установок на судах. Для достижения этой цели существует достаточно полный набор первичных датчиков, средства преобразования измерений в цифровой формат и соответствующие вычислительные ресурсы для их обработки. На судах уже эксплуатируются бортовые информационно-коммуникационные системы передачи текущих данных вахтенным операторам, смежным системам автоматизированного управления в системы регистрации аварийных ситуаций («черный ящик») и другим судовым потребителям информации. Однако необходимо дополнительно обеспечить экипажи судов результатами статистической обработки текущих параметров технологических процессов с учетом анализа всех предыдущих приборно-измеряемых данных. В статье обсуждаются способы хранения этих данных на судах в «статистически упакованном» виде и машинные методы их обработки с использованием ЭВМ. Объективный приборный контроль и автоматическое прогнозирование опасных тенденций ухудшения технического состояния судового оборудования обеспечит руководство судовладельческих компаний и командование экипажей возможностью своевременного планирования текущих задач эксплуатации, включая использование судов по прямому назначению и проведение ремонтно-восстановительных работ по фактическому состоянию техники. Кроме того, повысится безопасность мореплавания, снизятся сроки и стоимость технического обслуживания судов. Указанное направление исследований особенно важно для судов Арктического района плавания, для которых характерны повышенные требования к живучести судов и безопасности мореплавания, функционирование техники в условиях суровой природной среды и значительной удаленности от средств берегового обеспечения.*

*Ключевые слова:* суда, оборудование, параметры, имитационное моделирование, статистический анализ, надежность, диагностика, прогноз.

### Вводная часть

В настоящее время актуальной научно-методической проблемой в области управления жизненным циклом перспективной морской техники является переход от концепции «реагировать и выправлять» к более эффективной концепции — «прогнозировать и упреждать». Исследование надежности и качества морской техники методами статистического анализа измеряемых технологических параметров направлено на решение этой проблемы.

Классические подходы к определению показателей надежности техники в виде, например, оценки вероятности безотказной работы связаны с анализом группы экземпляров оборудования одинакового назначения, функционирующих в течение некоторого интервала времени с регистрацией случайной величины времени до их отказа. В настоящее время статистическая концепция процессов, лежащая в основе теории надежности техники, встречает трудности экспериментальной проверки для сложной и наукоёмкой продукции судостроения, изготавливаемой сравнительно небольшим числом уникальных образцов техники, в то время как срок жизни их составляет десятки лет. Для практического подтверждения высоких требований к надежности морской техники слишком мала серийность (массовость) производства техники и слишком велик реальный интервал времени для наблюдений и измерений. Следствием этих обстоятельств является недо-

статочная статистическая выборка неблагоприятных событий отказов морской техники для проведения доверительного статистического обобщения ее показателей надежности в режиме реального времени.

Дорогостоящие натурные стенды и ускоренные испытания практически никогда не могут создать условия эксплуатации, адекватные реальным, а статистическая выборка таких экспериментов малоубедительна для полных и точных оценок характеристик надежности (безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности). Однако экономическая потребность общества и морская практика позволили сформулировать задачу управления надежностью и качеством морской техники с целью снижения стоимости и сроков ее создания, сервисного обслуживания, а также своевременного обновления изделий в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке продукции судостроения. В зарубежных научно-технических публикациях [1] – [4] это направление исследований связано с разработкой информационно-коммуникационной технологии управления жизненным циклом *PLM (Product Lifecycle Management)*.

В настоящее время бурное развитие вычислительной техники, средств измерений и обработки данных (в том числе применяемых непосредственно на судах) обеспечили возможность контроля и прогнозирования эксплуатационных качеств морской техники непосредственно на борту судна в реальных условиях плавания без увеличения трудоемкости ее обслуживания. Подтверждением этого положения служат натурные испытания опытного образца бортовой автоматизированной информационно-измерительной системы, разработанной ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в ОКР «Мониторинг-Супер» и установленной на научно-экспедиционном судне «Академик Трёшников». Эффективность этой системы проверена в реальных условиях плавания в рамках 58-й Российской Антарктической экспедиции 2012 – 2013 гг. Вычислительная техника позволяет решать этот класс задач на базе статистических модельных исследований с целью оптимального управления сложными объектами морской техники в течение всего жизненного цикла (ЖЦ) эксплуатации судов. Для исследователей рассматриваемой области научных задач существует множество специализированных программных пакетов. Результаты статистического моделирования процессов позволяют оценивать риски (технические, экономические и экологические) при эксплуатации морской техники в реальных условиях и решать задачу обеспечения приемлемого значения рисков на основе более адекватных знаний.

Известно, что существует два принципиально различных подхода к определению показателей надежности – это *методы прямого и косвенного измерений* [5]. Прямым измерением показателя надежности является определение случайного числа отказавших однотипных объектов в зависимости от времени их работы до отказа, что оправдано для простых и малофункциональных устройств. Отличительной особенностью методов прямого измерения показателей надежности является то, что численная оценка вероятности сохранения или потери работоспособности агрегатов и устройств не зависит от их физической природы.

При косвенном измерении показателей надежности технического объекта используют оценку вероятности события сохранения или потери значений некоторых его технологических параметров в пределах допустимых значений в зависимости от времени функционирования этого объекта. Косвенные измерения используются для решения задач с помощью систем функциональной диагностики. Тогда условием потери надежности будет событие увеличения / уменьшения измеряемых технологических (диагностических) параметров выше / ниже некоторых предельно допустимых значений. Показатели надежности, полученные косвенным измерением, дают оценку вероятности более массовых и разнообразных по физической природе неблагоприятных событий или полной потери объектом работоспособности (например, потери прочности из-за старения или износа материалов). При этом имеется возможность различать характеристики надежности даже разных экземпляров однотипного оборудования, формируя технический паспорт всей истории их жизненного цикла. Данная возможность имеет преимущество по сравнению с традиционным усреднением их временных показателей надежности по множеству однотипных образцов техники. Поэтому специалисты возлагают большие надежды на повышение

эффективности системы управления технической готовностью морской техники и судов, снижение сроков и стоимости их сервисного обслуживания на базе развития средств безразборной параметрической диагностики морской техники и соответствующих методов статистической обработки полученных данных.

### Основная часть

Рассмотрим основные допущения и гипотезы в известных методических подходах по исследованиям надежности и качества морской техники, которые сдерживают решение задач, сформулированных ранее. Известно, что область исследований, связанных с технической диагностикой, предполагает рассмотрение трех типов задач [5]: задачи *диагностирования* — определения технического состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени; задачи *эволюции* (или *предыстории*) его технического состояния в прошлом до настоящего момента времени; задачи *прогнозирования* (на основе результатов решения первой и второй задач) — предсказания технического состояния, в котором окажется объект в некоторый будущий момент времени.

Статистическое описание параметров технологических процессов для целей контроля технического состояния и диагностики судового оборудования наиболее полно изложено в [6]. Задачу прогнозирования сводят к определению вероятности невыхода /выхода прогнозируемого процесса за установленные границы, когда известны функции распределения случайной величины диагностического показателя  $\xi(t)$  в моменты времени  $t_i (i = 1, 2, 3, \dots, n; t_i \in T_1)$ . Однако на практике законы распределения вероятностей случайной величины диагностических показателей  $\xi(t)$ , как правило, неизвестны до их измерений и соответствующей статистической обработки эмпирических данных. Для сложной наукоемкой морской техники решение этой научно-практической задачи остается в настоящее время актуальной и коммерчески целесообразной.

При вероятностном прогнозировании используются методы экстраполяции на основе уравнений регрессии для определения величины прогнозируемой переменной в виде математического ожидания  $m_{\xi}(t)$  в моменты времени  $t_j (j = n + 1, n + 2, \dots, n + m; t_j \in T_2)$ . При этом вряд ли следует согласиться с авторами [6, с. 136], что «... на практике значения диагностических параметров наиболее часто распределены по нормальному закону». И далее [6, с. 136], «... если закон распределения нормальный, то вероятностное прогнозирование может быть сведено к прогнозированию изменения математического ожидания». Данное допущение — лишь гипотеза, которая должна быть подтверждена непосредственным статистическим анализом случайных технологических и диагностических процессов по результатам эксплуатации судовой техники. Кроме того, оно никак не совпадает с реальной практикой повышения надежности судовых машин и механизмов, которая представляет безотказность оборудования с учетом его восстановления как нестационарный случайный процесс, включающий последовательные периоды «старения» и восстановления («омоложения») техники.

Математическая статистика [5] разделяет случайные процессы на *стационарные* и *нестационарные типы*. Случайный процесс называется стационарным, если все статистические и смешанные моменты инвариантны (независимы) во времени. В то же время нестационарный случайный процесс отличается наличием тренда линейного или более сложной формы. Основными статистическими характеристиками, имеющими большое значение для описания отдельных реализаций стационарных случайных процессов, являются следующие параметры: среднее выборочное значение и дисперсия, плотность вероятности распределения значений случайной величины, ковариационная функция, функция спектральной плотности мощности стационарной реализации. На коротких интервалах времени, когда выборка временного ряда случайной величины незначительна и тренд не может быть выявлен, процесс может считаться локально стационарным.

В целом реальные физические процессы, протекающие в сложных судовых системах в течение всего срока службы судна, всегда имеют медленные нестационарные изменения вслед-

ствие нестабильности внешних условий эксплуатации судов и внутренних условий нагружения оборудования, воздействия агрессивных рабочих сред, вибрации, старения материалов и т. п. Этот вид нестационарных процессов характеризуется тем, что случайный процесс ведет себя почти как стационарный на интервале времени, не слишком сильно превосходящем время корреляции. Однако в настоящее время при решении практических задач теории надежности действует основное допущение в виде гипотезы постоянной интенсивности отказов оборудования. Это допущение позволяет применить математический аппарат марковских случайных процессов. К сожалению, привлекательность указанной гипотезы связана с преимуществами численного решения только простых инженерных задач. Но, по существу, при таких допущениях игнорируется возможность учета накопления «ущерба» в системе из-за процессов «старения» материалов, ухудшения электрической прочности изоляции, износа кинематических сопряжений в механизмах и тому подобных явлений, существенных для нашей задачи описания нестационарных случайных процессов в характеристиках надежности и потери качества судовой техники.

В то же время система мониторинга технического состояния судового оборудования (в соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства, ч. VII. Механические установки, п. 11.3.6) должна предусматривать решение следующих задач: фиксирование измеренных значений диагностических параметров, анализ тенденций их изменений, прогноз технического состояния объекта контроля. Прогноз состояния выполняется на базе предыстории изменения диагностических параметров с достаточным числом их измерений. Это требование еще не выполняется в полном объеме [7], хоть и сделаны значительные шаги в области разработки и внедрения средств диагностики в морскую практику. До настоящего времени не разработаны эффективные методы статистического анализа технического состояния судового оборудования, эволюции его во времени и прогнозирования опасных тенденций его ухудшения.

Статистический анализ сложного оборудования в целях прогнозирования его технического состояния в значительной степени сдерживается трудностью описания реальных физических явлений, характеризующихся как нестационарные случайные процессы. Во многих случаях в классе нестационарных случайных процессов, соответствующих реальным физическим явлениям, можно выделить особые категории нестационарности, что упрощает задачу их измерения и анализа. Например, некоторые явления случайного характера могут быть описаны *нестационарным* случайным процессом  $\{y(t)\}$ , каждая выборочная функция которого имеет вид  $y(t) = A(t)x(t)$ . Здесь  $x(t)$  — выборочная функция *стационарного* случайного процесса  $\{x(t)\}$ ;  $A(t)$  — детерминированный множитель. Иными словами, такой процесс относится к нестационарным случайным процессам, выборочные функции которых обладают детерминированным трендом. Если нестационарный процесс соответствует конкретной модели такого типа, что потребует статистического подтверждения допустимости подобных гипотез, то для его описания нет необходимости производить осреднение по всему ансамблю. При этом достаточно производить осреднение по каждой выборке на равных интервалах времени (например, через каждые 100 ч выработанного технического ресурса агрегата) и определять линейную скорость изменения детерминированного множителя или их некоторой совокупности.

Таким образом, более общий случай по сравнению с положениями, изложенными ранее, представляет подход статистического описания нестационарного случайного процесса. На рис. 1 представлена иллюстрация нестационарного методического подхода к решению такой задачи на примере возможного изменения температуры газового тракта судового дизеля. Здесь область допустимых значений технологического параметра распределена в интервале от минимального до максимального значения. Кроме того, выделена область контролируемых отклонений текущих значений параметра при срабатывании аварийно-предупредительной сигнализации, аварийной защиты и повреждения оборудования в случае возникновения некоторых предельных (критических) перегрузок по контролируемому параметру.



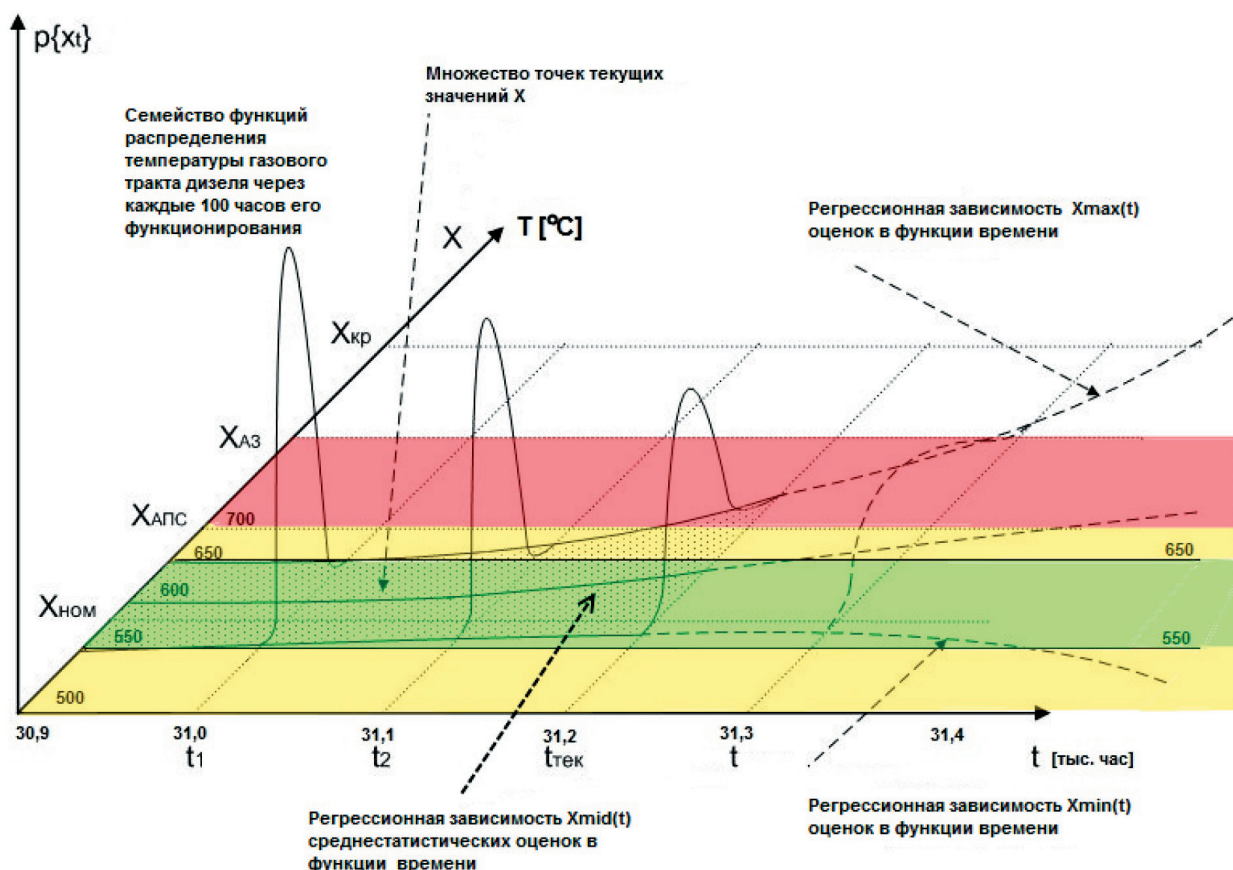


Рис. 1. Пример статистического описания процессов изменения характеристики  $X$  в дискретных интервалах времени через каждые 100 ч с учетом вычислений вероятностей их попадания в область нормальных и недопустимых значений

Будем различать нежелательные изменения текущих параметров технологических процессов и соответствующие изменения общего состояния оборудования по ожидаемому объему и трудоемкости последующих ремонтно-восстановительных работ. Здесь формальным признаком степени опасности повреждения оборудования являются следующие события, имеющие случайное время их наступления:

- срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации, которое потребует проведения работ (без разборки, без разрегулировки и расцентровки механизма), минимальной трудоемкости или только изменения режима его эксплуатации;
- срабатывание аварийной защиты, которое потребует проведения восстановительных работ с частичной разборкой и заменой второстепенных частей или деталей;
- превышение предельного или критического значения параметра, полученного экспериментальным или расчетным путем, которое потребует замены одной или нескольких основных частей с большим объемом ремонтно-восстановительных работ.

В процессе длительного эксплуатационного этапа жизненного цикла морской техники изменяется и математическое ожидание, и дисперсия случайной величины контролируемого технологического параметра агрегата или судовой конструкции. Кроме того, существует возможность регрессионного описания изменения во времени не только математического ожидания и среднеквадратического отклонения, но и максимального и минимального значений этой случайной величины с учетом допустимой погрешности для регистрации их установившихся значений. Каждая из указанных работ может быть описана интенсивностью восстановления, которые вместе с интенсивностью износа будут влиять на коэффициент готовности оборудования. Тогда статисти-

ческий анализ будем понимать как процедуры вычисления интервальных значений ожидаемых моментов времени, когда оборудование переходит из нормального состояния в указанные ранее нежелательные состояния.

Преобразование численных (точечных) значений эмпирических функций распределения по данным измерений (средних и среднеквадратических отклонений параметра  $X$ ) на границах каждого временного шага в кусочно-линейные зависимости простой регрессии может осуществляться методом наименьших квадратов. Это позволит получить аналитические зависимости выборочных средних, максимальных и минимальных значений температуры  $T$  [°C] в функции времени  $t$  (см. соответствующие кривые на плоскости  $T$  [°C],  $t$  (рис. 1)). Здесь зеленым цветом выделена область нормальных значений, желтым — область допустимых кратковременных отклонений, красным — область срабатывания аварийно-предупредительной сигнализации вплоть до срабатывания аварийной защиты (для прекращения соответствующего технологического процесса).

Принцип построения статистической модели динамики изменения некоторого условного параметра  $X$  поясняет рис. 1. Здесь представлено семейство функций распределения случайной величины параметра  $X$  (случайной величины  $X$ ). Например, численные значения указаны для температуры газового тракта дизеля через каждые 100 ч фактически выработанного технического ресурса. В каждом указанном интервале времени установившиеся текущие значения параметра  $X$  представлены в виде множества точек в пространстве характеристик  $T$  [°C],  $t$ , а соответствующая эмпирическая выборка может быть обработана как локально стационарный процесс. При этом принимается гипотеза, что в общем случае соответствующий тренд на коротких интервалах времени (100 ч) незначителен по сравнению с временным интервалом полного жизненного цикла эксплуатации судна, который может изменяться от 10 до 100 тыс. ч. На рис. 1 для наглядности представлено семейство функций распределения данных измерений как частный случай в виде нормальных законов. В общем случае статистика данных измерений может быть описана как стандартными теоретическими, так и эмпирическими функциями распределения случайных величин технологических параметров.

Далее представлены основные положения по организации имитационного моделирования нестационарных случайных технологических процессов судового оборудования. Статистический анализ технологических процессов по данным измеряемых параметров должен включать ряд вычислительных процедур. Как правило, изменение технологических характеристик судна является достаточно сложным процессом, поэтому для прогноза их изменения используется вероятностный подход. Оборудование, надежность которого контролируется технологическими и диагностическими инструментальными средствами, предлагается описывать *статистической моделью* изменения указанных характеристик в процессе эксплуатации судна. Построение данной модели базируется на принципах, изложенных в работе [5].

Следует отметить, что форма представления больших объемов статистической информации в виде текущих значений параметров всей генеральной совокупности измеряемых данных является недостаточно компактной и удобной для ее хранения. В этом случае целесообразно их хранить в виде численных значений функций распределения (через каждые 100 ч), а также средних выборочных величин, среднеквадратических отклонений, численных значений эксцессов и коэффициентов асимметрии, а также минимальных и максимальных значений. Каждый набор этих средних статистических значений может быть описан кусочно-линейными уравнениями регрессии в функции времени. Эти фактические данные должны отражать всю предысторию развития технологических процессов до текущего момента времени.

В таблице показан пример представления предыстории технического состояния судового дизеля в формате средневыворочных численных значений эмпирических данных (в части изменения температуры газового тракта для интервала времени 31,0 – 31,5 тыс. ч).

**Данные технического состояния судового дизеля в формате  
средневыборочных численных значений эмпирических данных**

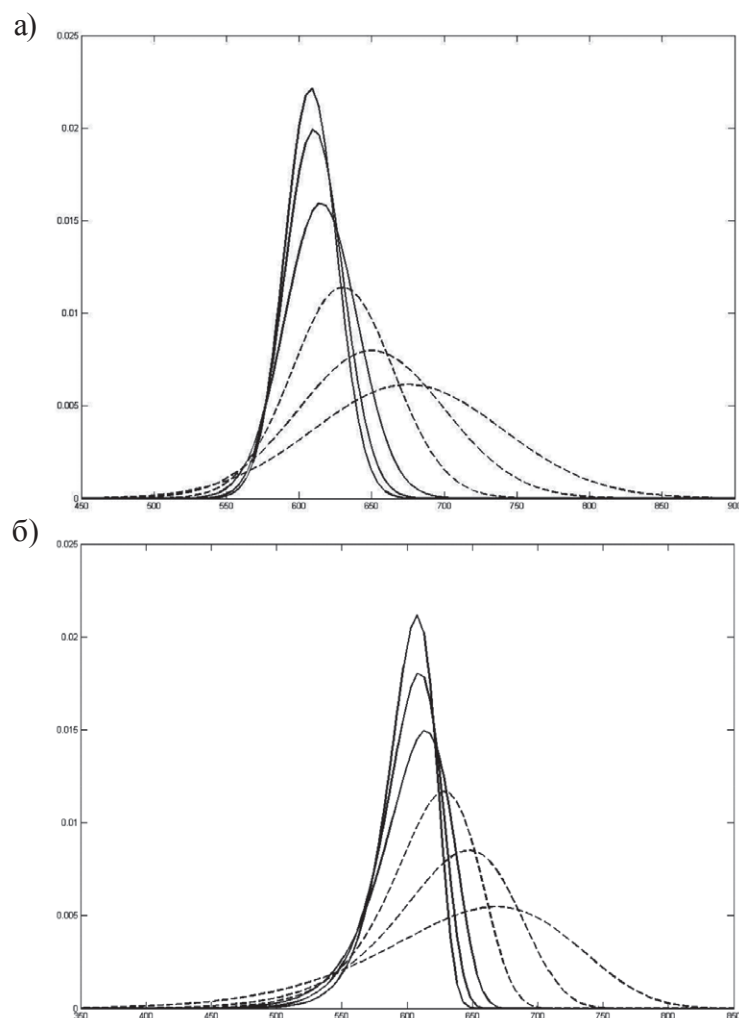
Номер графика	Выработанный ресурс ГД, тыс. ч	Mean $m^*(x)$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Distribution $\sigma^*(x)$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Min $x_{\min}^*$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Max $x_{\max}^*$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Ранг угрозы
1	31,0	608	108	554	662	0
2	31,1	610	120	550	670	1
3	31,2	615	150	540	690	2
4	31,3	630	210	525	735	3
5	31,4	650	300	500	800	4
6	31,5	675	390	480	870	4

*Примечания:*  $m^*(x)$  и  $\sigma^*(x)$  — статистические среднее и среднеквадратическое отклонение случайной измеряемой величины  $T$ ;  $x_{\min}^*$  и  $x_{\max}^*$  — минимальное и максимальное статистические значения случайной измеряемой величины  $T$ , которые зафиксированы в областях  $(x_{\max} < X(t_i) < x_{\text{АПС}})$  и  $(x_{\text{АПС}} < X(t_i) < x_{\text{АЗ}})$ , ограниченных соответствующими уставками.

Определение величин всех вышеуказанных прогнозируемых переменных обеспечит более полный объем прогнозных оценок для реальных нестационарных случайных параметров технологических процессов, которые могут существенно отличаться от гипотетических нормальных законов. Выполнение вышеизложенных действий осуществляет переход от статистического описания про-

цессов отказов оборудования к детерминированному регрессионному анализу кусочно-линейных функций статистических средних характеристик этих процессов как функций времени выработки срока службы техники.

На рис. 2 показаны графики теоретических функций распределения вероятностей (сплошные линии) и спрогнозированных значений (штрих-линии), вычисленных по уравнениям регрессии для некоторых наборов статистических средних и среднеквадратических отклонений данных измерений (на интервале времени от 31000 ч до 31200 ч). Упреждающее имитационное моделирование



*Рис. 2.* Проекция ансамбля кривых на плоскость  $p(X), T [^{\circ}\text{C}]$ , иллюстрирующая влияние времени в опасной области температуры газового тракта дизеля на статистику «дрейфа»: *а* — средних значений и дисперсий (с использованием нормального распределения); *б* — коэффициента асимметрии (с использованием распределения Вейбулла)

показано на примере возможного изменения данных на интервале времени от 31300 ч до 31500 ч выработанного ресурса с шагом 100 ч, что соответствует численным значениям процессов, приведенных на рис. 1 в аксонометрическом виде.

Статистическая реализация события, когда значение параметра  $CB[X]$  превышает уставки по срабатыванию предупредительной сигнализации и аварийной защиты, должно дополнительно учитываться случайным числом этих нежелательных событий и отказов техники, а также регистрацией времени, затраченного на восстановление работоспособности судового оборудования в море или в береговых условиях.

При рассмотрении распределений, отличных от нормальных, возникает необходимость количественной оценки этого различия. Для этого используют специальные числовые характеристики (в частности, асимметрию и эксцесс). Первое вычисляется как отношение центрального момента третьего порядка к кубу среднеквадратического отклонения, а второе — как отношение центрального момента четвертого порядка к среднеквадратическому отклонению четвертой степени.

Следует отметить, что программно-аппаратные средства имитационного моделирования технологических процессов, использующие распределение Вейбулла, предоставляют наиболее гибкий инструмент исследований надежности по статистическим данным.

### Обсуждение основных результатов

Вышеизложенный вероятностный подход на базе стандартных теоретических функций распределения должен предваряться оценкой их приемлемого (доверительного) использования, т. е. должна осуществляться проверка гипотез о близости их к эмпирическим функциям распределения. Специализированные программные пакеты позволяют по данным измерений оценить доверительные вероятности близости их к стандартным функциям распределения вероятностей по критериям Стьюдента, Фишера, Пирсона и Колмогорова–Смирнова.

В то же время получение доброкачественной оценки данных измерений должно служить необходимым условием для последующих статистических исследований по направлениям поиска рациональных путей повышения надежности техники, ее безотказности и ремонтпригодности. Так, например, представляет интерес вопрос о том, какой технологический процесс в судовом оборудовании является наиболее напряженным по времени выработки его ресурса. Кроме того, представляет интерес вопрос по сравнению надежности однотипной техники, эксплуатирующейся в различных условиях Мирового океана, о влиянии на надежность определенных факторов и технологий сервисного обслуживания судов, степени нестационарности контролируемых параметров основных технологических случайных процессов как фактора морального старения, износа и т. п.

Количественная оценка степени влияния того или иного фактора вызывает значительную сложность особенно при наличии взаимного влияния факторов. Специализированные программные пакеты предоставляют возможность совместного использования группы методов математической статистики: дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа для оценки этого влияния в ходе имитационного моделирования. Таким образом, прогнозные оценки надежности и остаточного ресурса морской техники на базе упреждающего имитационного моделирования технологических параметров (как нестационарных случайных процессов) позволяют сравнить эффективность альтернативных решений, направленных на поддержание заданной технической готовности судов и судового оборудования.

В зависимости от поставленной задачи метод упреждающего имитационного моделирования статистики технологических процессов должен предоставлять прогнозную информацию в следующих режимах:

- краткосрочного прогноза по данным предыстории развития параметров (с шагом 100 ч) в текущем интервале времени 1000 ч;
- среднесрочного прогноза по данным предыстории развития параметров (с шагом 1000 ч) в текущем интервале времени 10000 ч;



– дальнесрочных прогнозов по данным предыстории развития параметров (с шагом 10000 ч) в текущем интервале времени 100000 ч.

### Заключение

Современные научно-методические разработки для систем управления жизненным циклом продукции судостроения на базе марковского анализа и метода Монте-Карло, рекомендованные ГОСТ Р ИСО/МЭК31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска», не удовлетворяют требованиям морской практики Российского морского регистра судоходства. Главная причина такого положения — неучёт реальных физических процессов, отличающихся моральным и физическим устареванием техники. В математической трактовке это означает неучёт нестационарного характера случайных процессов выработки временного ресурса оборудования.

Для реализации обсуждаемых предложений уже существует достаточно полный набор первичных датчиков, средств преобразования измерений в цифровой формат и соответствующих вычислительных ресурсов для их обработки. На судах уже эксплуатируются бортовые информационно-коммуникационные системы передачи текущих данных вахтенным операторам, смежным системам автоматизированного управления в системы регистрации аварийных ситуаций («черный ящик») и другим судовым потребителям информации [7], [8]. Однако необходимо дополнительно обеспечить экипажи судов результатами статистической обработки текущих данных в море и предсказания опасных тенденций ухудшения технического состояния судового оборудования [9] – [13]. Эта возможность позволит обеспечить своевременное планирование текущих задач эксплуатации, включая использование по прямому назначению и проведение ремонтно-восстановительных работ, а также более объективную оценку объема сервисного обслуживания судна. Кроме того, повысится безопасность мореплавания, снизятся сроки и стоимость технического обслуживания судов. Указанное направление исследований особенно важно для судов Арктического района плавания, для которых характерны повышенные требования к живучести судов и безопасности мореплавания, функционирование техники в условиях суровой природной среды и значительной удаленности от средств берегового обеспечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmad R.* An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / R. Ahmad, S. Kamaruddin // *Computers & Industrial Engineering*. — 2012. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 135–149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
2. *Shin J-H.* On condition based maintenance policy / J-H Shin, H-B Jun // *Journal of Computational Design and Engineering*. — 2015. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
3. *Zhu W.* Condition-based maintenance policies for a combined wear and shock deterioration model with covariates / W. Zhu, M. Fouladirad, C. Béranger // *Computers & Industrial Engineering*. — 2015. — Vol. 85. — Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.cie.2015.04.005.
4. *Do P.* A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions / P. Do, A. Voisin, E. Levrat, B. Iung // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2015. — Vol. 133. — Pp. 22–32. DOI: 10.1016/j.ress.2014.08.011.
5. *Клюев В. В.* Технические средства диагностирования: справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.
6. *Калявин В. П.* Надежность и техническая диагностика судового электрооборудования и автоматики / В. П. Калявин, А. В. Мозгалецкий, В. Л. Галка. — СПб.: Элмор, 1996. — 296 с.
7. *Войтецкий В. В.* Управление судовыми энергетическими установками / В. В. Войтецкий // Гл. 6.3. «Энциклопедия машиностроения. Общая методология и теория кораблестроения», т. IV-20, кн. 1. — СПб.: Политехника, 2003. — С. 502–510.
8. *Мясников Ю. Н.* Информационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна / Ю. Н. Мясников, А. А. Иванченко, А. М. Никитин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 405 с.

9. Ковтун Л. И. Мониторинг, предупреждающее моделирование и ситуационный анализ аварийных процессов и мер противодействия для систем автоматизированного управления сложными комплексами машиностроения морской техники: программная разработка для ЭВМ / Л. И. Ковтун, Н. А. Шарков, Н. Л. Ковтун. — № 2010613335, от 20 мая 2010 г.

10. Шарков Н. А. Анализ и синтез иерархически-интегрированных человеко-машинных комплексов управления морской техникой в аварийных условиях на базе интеллектуальных технологий / Н. А. Шарков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 49–76.

11. Ковтун Л. И. Супервизорная система автоматизированного управления иерархически структурированными организационно-техническими комплексами морской техники с использованием имитационно-вычислительных симуляторов / Л. И. Ковтун // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 5–48.

12. Шарков Н. А. Имитационное моделирование процессов управления жизненным циклом продукции судостроения с использованием методов нейронечетких систем / Н. А. Шарков, Н. Л. Ковтун // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 78 (362). — С. 171–180.

13. Жиленков А. А. Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования / А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 90–97.

## **SIMULATION STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS OF ENGINEERING PROCESSES ON VESSELS FOR PREDICTION OF RELIABILITY OF EQUIPMENT**

*This article deals with questions of reliability and quality of the vessel electromechanical equipment regarding implementation of functional diagnostics and risks prediction based on the statistical model of the theory of reliability. Implementation of this approach will allow to make more effective management decisions in comparison with traditional practice to react to already happened failures of the equipment. At the same time continuous statistical processing of key parameters of the equipment shall be performed directly on board the vessels and provide accumulation of data of all events for the analysis of dangerous tendencies of their changes. This statement corresponds requirements of the Russian Maritime register of shipping to the vessel diagnostic system. To achieve this there are full range of digital sensors and the appropriate computing resources for processing information from this sensors onboard. Also there are onboard information systems for transferring data to operators, adjacent systems for automated control, blackboxes and other users. However it is necessary to provide the crew of the vessel with results of statistical processing of the current parameters of the equipment taking into account an analysis of previous measured data. This article deals with methods of storage of this data in "statistically packed" type and machine methods of processing of this data. Objective instrument control and automatic prediction of dangerous tendencies in technical conditions of vessel equipment will provide a management of the ship-owning companies and crews with a possibility of planning of the current tasks of maintenance, including use of vessels for the intended purpose and execution of repair works by the actual state of the equipment. Besides, safety of navigation will increase, terms and cost of maintenance of vessels will decrease. This research area is especially important for vessels of the Arctic navigation area, which have increased requirements to survivability and safety of navigation and functioning of the equipment in the severe environment and considerable remoteness from the coast.*

*Keywords: vessels, equipment, parameters, simulation modeling, statistical analysis, reliability, diagnostics, prediction.*

## **REFERENCES**

1. Ahmad, Rosmaini, and Shahrul Kamaruddin. "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application." *Computers & Industrial Engineering* 63.1 (2012): 135–149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
2. Shin, Jong-Ho, and Hong-Bae Jun. "On condition based maintenance policy." *Journal of Computational Design and Engineering* 2.2 (2015): 119–127. DOI: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
3. Zhu, Wenjin, Mitra Fouladirad, and Christophe Bérenguer. "Condition-based maintenance policies for a combined wear and shock deterioration model with covariates." *Computers & Industrial Engineering* 85 (2015): 268–283. DOI: 10.1016/j.cie.2015.04.005.

4. Do, P., A. Voisin, E. Levrat, and B. Iung. "A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions." *Reliability Engineering & System Safety* 133 (2015): 22–32. DOI: 10.1016/j.ress.2014.08.011.
5. Kljuev, V. V., P. P. Parhomenko, V. E. Abramchuk, et al. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1989.
6. Kaljavin, V. P., A. V. Mozgalevskij, and V. L. Galka. *Nadezhnost' i tekhnicheskaja diagnostika sudovogo jelektrooborudovaniya i avtomatiki*. SPb.: Jelmor, 1996.
7. Vojteckij, V. V. "Upravlenie sudovymi jenergeticheskimi ustanovkami." *Jenciklopedija mashinostroenija. Obshhaja metodologija i teorija korablestroenija*. Tom IV-20, Kniga 1. SPb.: Politehnika, 2003: 502–510.
8. Mjasnikov, Ju. N., A. A. Ivanchenko, and A. M. Nikitin. *Informacionnye tehnologii v propulsivnom komplekse morskogo sudna*. SPb.: GUMRF im. admiral S.O. Makarova, 2013.
9. Kovtun, L. I., N. A. Sharkov, and N. L. Kovtun. Monitoring, uprezhdajushhee modelirovanie i situacionnyj analiz avarijnyh processov i mer protivodejstviya dlja sistem avtomatizirovannogo upravlenija slozhnymi kompleksami mashinostroenija morskoy tekhniki: software program. № 2010613335; 20 May 2010.
10. Sharkov, N. A. "Analiz i sintez ierarhicheski-integrirovannyh cheloveko-mashinnyh kompleksov upravlenija morskoy tekhniki v avarijnyh uslovijah na baze intellektualnyh tehnologij." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 54 (2010): 49–76.
11. Kovtun, L. I. "Supervizornaja sistema avtomatizirovannogo upravlenija ierarhicheski struk-turirovannymi organizacionno-tekhnicheskimi kompleksami morskoy tekhniki s ispol'zovaniem imita-cionno-vychislitel'nyh simuljatorov." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 54 (2010): 5–48.
12. Sharkov, N. A., and N. L. Kovtun. "Lifetime management simulation for shipbuilding production using the method of neuro-fuzzy systems." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 78(362) (2013): 171–180.
13. Zhilenkov, A. A., A. A. Zheleznyak, and S. G. Chorniy. "Prospective ways to improve the efficiency of diagnosis reliability parameters of operation of offshore drilling equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 1(29) (2015): 90–97.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ковтун Николай Львович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Кунаев Михаил Андреевич — кандидат  
технических наук, старший научный сотрудник.  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
kovtun5@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kovtun Nikolay L'vovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Kunaev Mikhail Andreevich —  
PhD, senior staff scientist  
Krylov State Research Centre  
kovtun5@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2016 г.