

Медведев В.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**



УДК 621.43  
ББК 31.365  
М42

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Ю.Н.Мясников*; доктор технических наук, профессор *А.М.Никитин*; доктор технических наук, профессор *А.Л.Кузнецов*.

**Медведев В.В.**

М42 Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.

ISBN 978-5-906150-04-2

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с применением имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок на разных этапах их проектирования. Особое внимание уделено разработке методик и алгоритмов, используемых при подготовке и реализации имитационного моделирования функционирования компонентов «машина» и «рабочая среда» системы «человек-машина-среда».

Предназначена для специалистов, занимающихся разработкой, модернизацией и эксплуатацией судовых энергетических установок, а также для студентов и аспирантов, обучающихся по специальностям «Судовые энергетические установки», «Судовое оборудование» и «Двигатели внутреннего сгорания».

Ил. 122. Табл. 18. Библиогр.: 338 назв.

УДК 621.43  
ББК 31.365

© В.В.Медведев, 2013  
© ООО «Страта», 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА .....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ВЫБОР ПУТЕЙ ЕЕ РЕШЕНИЯ .....	19
1.1. Анализ данных по отказам, обзор литературных источников, выбор методов исследования обеспечения надежности и безопасности СЭУ .....	19
1.2. Обоснование возможности использования имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности СЭУ...34	
1.3. Разработка методики и рекомендаций по организации процедуры имитационного моделирования применительно к СЭУ .....	39
2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПО РЕСУРСНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ .....	56
2.1. Основные принципы и предпосылки применения имитационного моделирования для прогноза и оценки надежности и безопасности главного судового дизеля .....	56
2.2. Выбор основных соотношений для прогноза ресурсных показателей двигателя.....	64
2.2.1. Прогнозирование остаточного ресурса деталей по критерию износа.....	64
2.2.2. Прогнозирование наработки до отказа деталей по критерию усталостной прочности .....	70
2.2.2.1. Определение наработки деталей судовых ДВС до образования видимых трещин .....	71
2.2.2.2. Оценка ресурса коленчатых валов судовых дизелей.....	81
2.2.2.3. Оценка остаточной наработки до отказа детали с трещиной .....	88

2.3. Основные подходы к расчету характеристик надежности дизеля как сложной системы .....	99
2.3.1. Аварийное предельное снижение мощности и частоты вращения главного судового дизеля .....	101
2.3.1.1. Определение параметров аварийного дизеля, приводящих к его остановке из-за малости оборотов .....	103
2.3.1.2. Определение параметров аварийного дизеля приводящих к потере возможности управлять судном .....	106
2.3.1.3. Аварийная работа дизеля при отключении цилиндров .....	108
2.3.1.4. Аварийное состояние турбокомпрессоров .....	110
2.3.2. Другие подходы .....	112
2.4. Выводы по главе .....	119
<b>3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЭУ ПО УРОВНЯМ ВИБРАЦИИ И ШУМА.....</b>	<b>121</b>
3.1. Основные принципы и предпосылки применения имитационного моделирования для прогноза и оценки уровней вибрации и шума ..	121
3.2. Метод прогноза и оценки риска превышения предельно допустимых уровней шума в машинном помещении с дизельной энергетической установкой .....	127
3.3. Метод прогноза и оценки риска превышения предельно допустимых уровней шума и вибрации в помещениях судна с дизельной энергетической установкой.....	134
3.3.1. Обзор существующих методов расчета .....	135
3.3.2. Новый метод расчета динамически связанных конструкций с высоким демпфированием .....	142
3.3.3. Результаты сопоставления расчетов по новому методу расчета динамически связанных конструкций с высоким демпфированием с данными экспериментов .....	151
3.3.3.1. Результаты исследования высокодемпфированного крупномасштабного стенд-макета.....	151
3.3.3.2. Результаты обработки данных по демпфированию натурной модели корпуса стального судна покрытием из мастики АДЕМ.....	164
3.3.3.3. Расчетная оценка полученного эффекта демпфирования подмоторной рамы дизель-генератора ДГ5АL25/30 покрытием из мастики АДЕМ .....	171
3.3.4. Пример выполнения прогноза риска превышения нормативных значений уровней вибрации и шума в судовых помещениях .....	176

3.3.5. Возможное направление развития предлагаемого метода расчета звуковых вибраций высокодемпфированных сложных динамических структур за счет учета энергии звукоизлучения...	180
3.3.6. Возможное направление использования предлагаемого метода расчета для повышения надежности и безопасности судовых дизелей .....	184
3.4 Выводы по главе .....	188
<b>4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПО ТЕПЛОВОМУ СОСТОЯНИЮ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ.....</b>	<b>190</b>
4.1. Основные принципы и предпосылки применения имитационного моделирования для прогноза и оценки теплового состояния деталей.....	190
4.2. Результаты экспериментального и теоретического исследования гидродинамики и теплообмена пристенных струй, вытекающих в ограниченное пространство.....	201
4.2.1. Визуализация течения .....	202
4.2.2. Экспериментальное исследование поля скоростей в камерах с пристенными струями.....	215
4.2.3. Математическая модель струйного течения в ограниченном пространстве.....	222
4.2.3.1. Расчет границы плоской струи, вытекающей в ограниченное пространство .....	223
4.2.3.2. Экспериментальное исследование распределения статического давления в камере .....	234
4.2.3.3. Поле скоростей и теплоотдача пристенной струи в камере.....	239
4.2.4. Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлики на моделях лопатки соплового аппарата первой ступени .....	252
4.2.4.1. Гидравлические испытания моделей, имитирующих фрагменты внутренней полости сопловой лопатки со вставными перегородками.....	253
4.2.4.2. Расчет коэффициента расхода модели натурной лопатки.....	264
4.2.4.3. Результаты гидравлических испытаний модели натурной лопатки со вставными перегородками .....	267
4.2.4.3. Тепловые испытания на модели, имитирующей фрагмент внутренней полости пера сопловой лопатки .....	269
4.2.4.4. Тепловые испытания модели натурной сопловой лопатки.....	279
4.3. Расчет и сравнение теплового состояния лопатки с продольными перегородками со штатной дефлекторной лопаткой .....	285

4.3.1. Температурное поле модельного варианта лопатки со вставными перегородками .....	287
4.3.2. Тепловое состояние штатной дефлекторной лопатки .....	289
4.3.3. Тепловое состояние лопатки с перегородками во внутренней полости .....	293
4.4. Пример применения прогноза и оценки риска превышения допустимых уровней температур в деталях главных судовых двигателей вследствие влияния технологических отклонений .....	298
4.5. Выводы по главе .....	303
<b>5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЭУ .....</b>	<b>306</b>
5.1 Выводы по главе .....	325
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>327</b>
Список литературы .....	331

# 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ВЫБОР ПУТЕЙ ЕЕ РЕШЕНИЯ

## 1.1. Анализ данных по отказам, обзор литературных источников, выбор методов исследования обеспечения надежности и безопасности СЭУ

В настоящее время проявляется постоянный интерес к изучению человеко-машинных систем, в которых человек становится, как бы, элементом конструкции системы. В этом случае вероятность безотказной работы системы является произведением вероятностей безотказной работы человека на вероятность безотказной работы машины. Важность такого подхода привела к появлению специальной науки – инженерной психологии и эргономики.

Современное судно представляет собой сложную систему «человек–машина–среда» (ЧМС). Она является объектом оценивания степени приемлемости техногенного риска. Наиболее общая модель функционирования такого объекта представлена на рис.1.1, которая включает в себя техническое оборудование судна (М – «машину»), эксплуатирующий его персонал (Ч – «человека»), рабочую среду (С – «среду»), взаимодействующих между собой по заданной технологии и при установленной организации (порядке подготовки и проведения) работ (Т – «технология»). Кроме перечисленных основных компонентов модель системы включает также связи между ними и с окружающей систему средой. Эти связи изображены стрелками и соприкосновением перечисленных частей системы, а границы, отделяющие ее от внешней среды – окружностью.

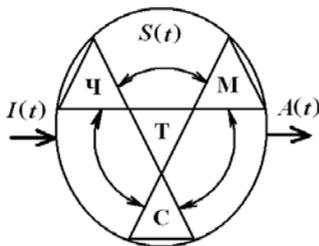


Рис.1.1. Модель ЧМС системы как объекта оценивания техногенного риска

В модели функционирования судна задействованы также входные воздействия на ЧМС систему –  $I(t)$  (выделенные ресурсы, требуемые условия эксплуатации, заданные функции, установленные интервалы времени), ее состояния –  $S(t)$  («условно безопасное», «опасное», «предаварийное», «аварийное», «поставарийное»), выходные воздействия системы на окружающую среду –  $E(t)$  (полезные и вредные результаты функционирования).

Внешней (для ЧМС системы) средой является все то, что непосредственно не входит в нее, но может влиять на процесс функционирования или изменяться под его воздействием: органы и коммуникации снабжения, управления и получения продукции, другие взаимодействующие силы и средства, а также метеорологические и иные внешние факторы в месте эксплуатации судна. Отделение рабочей среды от внешней обусловлено необходимостью учета неодинаковости их влияния на функционирование различных частей ЧМС системы.

Важным элементом судна является энергетическая установка (входящая в компонент М), техническое состояние которой самым непосредственным образом влияет на его безопасную эксплуатацию. В общем случае СЭУ состоит из главных двигателей (ГД), дизель- и валогенераторов, утилизационных и вспомогательных котлов, многочисленных вспомогательных механизмов и устройств. Отказы случаются во всех технических устройствах, но их влияние на функционирование судна в целом различно. Обыкновенно, отказ какого-либо вспомогательного механизма или устройства не влечет за собой серьезных последствий, т.к. чаще всего такие механизмы дублированы и предусмотрено автоматическое включение резерва. Отказ главного двигателя (основного элемента ГЭУ), чаще всего, оказывает существенное влияние на функционирование судна. Поскольку наиболее распространенными являются суда с одним ГД, то его отказ прямо влечет за собой остановку судна в море. По данным работы [55] относительная частота потери хода и управляемости достигает значения 0,51. При этом в 56,9% случаев

это связано с отказом ГД с эластичной муфтой. При наличии на судне двух (или более) главных двигателей последствия отказа могут быть не так велики, но остаются серьезными, т.к. судно не может полноценно функционировать по своему назначению. Так, по данным наблюдений японского исследовательского института морского флота [56], относительное количество критических ситуаций с судами из-за отказа ГД составляет ~64%, в то время как из-за отказа систем управления – ~12%, вспомогательного оборудования – ~8%, а для остальных частей судна еще меньше. Работа [27] подтверждает данный факт, кроме того, из приведенных в ней данных можно выявить определенную зависимость отказов от частоты вращения коленчатого вала. Таким образом, ГД – источник повышенной опасности, его отказы, как правило, вызывают аварийные происшествия и ущерб большого масштаба, нередко заканчивающиеся необратимыми последствиями, которые в трактовке ИМО ФОб называются авариями. Возможны и катастрофы с судами по причине отказа ГД.

В настоящее время дизели являются доминирующим видом судовых ГД. Поэтому наиболее представительной для выявления основных причин отказов ГД является выборка по судовым дизелям. В последние годы, особенно в связи с внедрением на судах и морских сооружениях полного электродвижения, широко обсуждается и изучается вопрос о перспективах применения газотурбинных двигателей (ГТД) для судов различного класса и назначения. Для военного кораблестроения ГТД давно являются перспективными ГД. Постоянно присутствует интерес к оценке возможности применения ГТД для отечественных корабельных ЭУ [57]-[59]. В НПО «Сатурн-ВМФ» разрабатываются проекты ГТД для кораблей водоизмещением от 100 до 40 тыс. тонн [60]. Возможно применение таких двигателей на специализированных судах и технологических морских платформах [61]. Обзор современного зарубежного опыта, выполненный в [62], показывает успешность применения ГТД в ЭУ круизных лайнеров с электродвижением и высокоскоростных судов (катамаранах и многокорпусных) и перспективность их использования, например, на судах ледового плавания. Наконец, в рамках технологического направления «Судовое машиностроение и энергетика» ФЦП «Развитие

гражданской морской техники на 2009-2016 годы» принято решение о проведении НИОКР по судовым ГТД [2].

Доминантой для эксплуатационной безопасности главного судового дизеля является его свойство не допускать аварийных ситуаций судна. В рамках ФОБ такое условие определяется неравенствами

$$N_{e\max} > N_e > N_{e\min} \text{ и } n_{\max} > n > n_{\min}, \quad (1.1)$$

где  $N_{e\max}$ ,  $N_e$  и  $N_{e\min}$  – максимальная, эксплуатационная и минимальная мощность дизеля,  $n_{\max}$ ,  $n$  и  $n_{\min}$  – соответствующие упомянутым мощностям частоты вращения коленчатого вала.

Максимальные показатели  $N_{e\max}$  и  $n_{\max}$  определяются заводом изготовителем дизеля при его проектировании и обеспечиваются его системой автоматической защиты. Минимальные значения  $N_{e\min}$  и  $n_{\min}$  связаны не только с возможностью протекания рабочего процесса в самом дизеле, но и с возможностью маневрирования судна, что эквивалентно потере хода судна.

Современный судовый дизель представляет собой сложную систему взаимосвязанных между собой деталей, узлов, агрегатов, механизмов. Отказ каждого из этих элементов может самым непосредственным образом вызывать разнообразные опасные ситуации вплоть до аварийной остановки двигателя.

Считается, что отказы, остановки двигателя и ресурс его деталей взаимосвязанные показатели. При этом учитываются те детали, которые определяют ресурс двигателя до остановки. Если нормируется количество остановок дизеля в период его эксплуатационного периода до назначенного ремонта, то интенсивность отказов будет связана с ресурсами отдельных деталей. В табл.1.1 [63] приведены данные по средним ресурсам различных двигателей.

Неодинаковую надежность отдельных деталей главных судовых двигателей подтверждают данные по отказам. В табл.1.2 и 1.3 представлены данные по надежности указанных деталей на основании материалов Калининградской инспекции ГУ РС [64]. В работе [65] приведены результаты обработки автором

статистических данных по отказам главных двигателей и их элементов собранных в работе [66] по вахтенным журналам и запискам старших механиков 43 судов, эксплуатировавшихся в различных районах плавания и принадлежащих: ГУ «Запрыба»; ГУ «Дальрыба»; ГУ «Югрыхолодфлот»; ГУ «Востокхолодрыба»; Черноморскому морскому пароходству. Особенностью выбранных судов является то, что все они оснащены подобными среднеоборотными ГД фирмы S.E.M.T. Pielstick ЧН40/46, цилиндровой мощностью ~450 кВт. В результате определены статистические вероятности и интенсивности отказов основных элементов, деталей, узлов и групп деталей. Там же приведено сравнение вероятностей отказов основных деталей и узлов СОД и МОД. Для этого были использованы результаты обследования одинаковых судов типа «Камчатские горы» и «Остров Русский» с различными двигателями S.E.M.T. Pielstick ЧН40/46 и ДКРН76/160 MAN B&W. Назначение судов, район и условия плавания одинаковые

*Таблица 1.1*

**Усредненные ресурсы до списания основных деталей и узлов современных судовых дизелей**

№	Наименование узла	Средний ресурс не менее тыс. ч.		
		МОД	СОД	ВОД
1	Фундаментная рама; коленчатый вал; блок цилиндров; шток поршня; шатун; распределительный вал; крышка цилиндра	100-120 и выше	50-80	20-40
2	Втулки цилиндра; поршень	60	40	10-20
3	Поршневые кольца	12	8-10	6-10
4	Рамовый, мотылевой, головной подшипники	60	40	10-20
5	Выпускной клапан	30	20	10
6	Топливный насос	25	15	10
7	Форсунка: игла с направляющей и сопло распылителя	15	15	6-10
8	ГТН	60-80	40-50	15-20
9	Ответственные крепежные элементы (мотылевые болты, анкерные связи, шпильки крепления подшипников, крышки цилиндров и др.)	100-120	30-80	10-40

По представленным в [65] результатам статистической обработки отказов ГД можно сделать следующие основные выводы:

- разброс вероятностей отказов около среднего значения при сравнении одинаковых двигателей эксплуатирующихся в различных бассейнах значителен и составляет сотни процентов;

- различия значительны и для вероятностей отказов основных групп деталей двигателя внутри одного пароходства;

- сравнение статистических вероятностей отказов основных групп деталей СОД и МОД работающих на одинаковых судах, одного пароходства показало большие расхождения (сотни процентов).

Таблица 1.2

**Сведения о наработках деталей двигателей 6ЧН40/46 на судах типа «Пулковский меридиан»**

Название судна	Наработка в часах (ГД1/ГД2)	
	Остов	Коленчатый вал
Маршал Василевский	105600/105600	105600/105600
Маршал Крылов	28214/49400	31000/61786
Александр Ксенофонтов	45000/93681	93027/93681
Капитан Сухондяевский	16463/64000	32982/95440
Петр Шафранов	45974/45974	83545/83545
Порфирий Чанчибадзе	30750/30750	30750/30750
Капитан Едемский	44370/37867	22344/37867
Павел Батов	71154/71154	71154/71154
Старый Арбат	72000/72000	72000/72000
Замоскворечье	78743/78743	78743/78743
Лазурный	63500/63500	63500/63500
Валерий Джапаридзе	77500/77500	77500/77500
Братья Стояновы	63000/63000	45000/63000
Нивенское	54612/54612	54612/54612
Арменак Бабаев	41400/57700	57700/57700

Таблица 1.3

**Сведения о заменах основных деталей главных двигателей 6ЧН40/46 на судах типа БАТМ «Пулковский меридиан»**

Диапазон наработки, ч	Цилиндровая втулка	Головка цилиндра	Поршень	Шатун	Шатунный вкладыш	Рамовый вкладыш

0 -10000	-	-	-	-	6	-
11000-20000	9	-	7	12	103	52
21000-30000	4	10	9	2	44	18
31000-40000	14	7	2	22	48	18
41000-50000	22	9	25	11	66	36
51000-60000	34	2	-	13	28	29
61000-70000	1	-	12	7	18	25
71000-80000	45	8	16	9	-	51
81000-90000	2	-	-	4	-	16

Таким образом, вероятности отказов на основе статистических данных не дают объективной информации и не могут быть использованы для прогнозирования отказов других двигателей и планирования технического обслуживания по состоянию. Но они позволяют выявить основные причины отказов, полных и частичных. К таким причинам относятся:

- усталостные (термоусталостные) изменения материала деталей, определяющих работоспособность дизельной энергетической установки;

- износ сопряженных деталей, узлов, приводящих к резкому снижению работоспособности;

- повышенная вибрация, приводящая к повышенному износу сопряжений, а также к нарушению регулировки, взаимосвязи механизмов, обуславливающих кардинальное изменение протекающих процессов, приводящих объект в нерабочее состояние;

- термические напряжения, возникающие вследствие значительных градиентов температур, из-за конструктивных недостатков, и приводящие к появлению трещин или разрушению (прогару) деталей двигателя.

В настоящее время существует достаточно много работ посвященных проблемам расчета прочности и долговечности сложных технических изделий. Так в отчете о деятельности РАН в 2005 году [67] отмечается, что специалистами ИМАШ РАН, ИВМ СО РАН, ИФТПС РАН, НИКИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт», МГТУ им. Н. Э. Баумана, МЭИ, ННГУ, НПП «СибЭРА», КБОМ, ОАО «Транснефть», ОКБ «Гидропресс», КБ «Химвтоматика», ИБРАЭ РАН разработана многокритериальная система расчетной оценки важнейших показателей

работоспособности (с учетом надежности и прочности) машин и конструкций на всех стадиях их жизненного цикла. В отчете также отмечено, что в системе использован единый унифицированный подход, основанный на единстве характеристик сопротивления деформированию и разрушению независимо от видов предельных состояний, условий нагружения и стадий повреждения несущих элементов. При этом под предельным состоянием понимается состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация или экономически не оправдана, или не безопасна. Результаты разработок предназначены для использования при реализации, в частности, в тепловой энергетике. Можно также отметить работы Д.Н. Решетова [68] и В.В. Болотина [69]. В последней работе предложены общие модели накопления повреждений и распространения трещин в деталях машин и элементах конструкций. Развита методика прогнозирования показателей долговечности на стадии проектирования, а также методы прогнозирования индивидуального остаточного ресурса. Обсуждена проблема нормирования и оптимизации назначенных показателей долговечности. Однако, указанные работы реализуют по существу детерминированные подходы к расчетам прочности, так как по существу используют статистическую информацию при назначении расчетных характеристик конструкционной прочности и эксплуатационной нагруженности. В данной монографии предложено развитие прикладных вероятностных подходов.

Проблеме износостойкости также посвящено много публикаций, среди которых можно отметить работы [70]-[94]. В них частично исследовано и влияние на износостойкость вибрационной активности машин.

Отличительной особенностью монографии является то, что в ней с системных позиций шум и вибрация рассматриваются как взаимосвязанные факторы, оказывающие влияние как на надежность (долговечность, безотказность) судовых механизмов, так и на экипаж судна. Такой подход согласуется с работой [95], где отмечается, что проблема техногенной безопасности сложных технических систем, к которым, безусловно, относится СЭУ, является мультидисциплинарной.

В ходе выполненных автором исследований подтверждена и дополнительно изучена однозначная связь между уровнями шума и вибрации, особенно на частотах 200 Гц и кратных им и состоянием здоровья обслуживающего персонала. Важность этой проблемы подтверждается наличием нормативных документов, регламентирующих уровни вибрации и шума в судовых помещениях [96]-[102] и помещениях плавучих буровых установок [103], а также постоянным интересом к совершенствованию нормативных документов и приведением их к международным стандартам. Так согласно [104] выполнялись работы по гармонизации ГОСТ 12.1.012-90 с ISO 2631, ISO 5349, ISO 13090 и ГОСТ 12.1.003-83 с ЕЭС 86/188. Нормы по вибрации содержатся и в разделе 9 части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов РС [105]. Все это свидетельствует о необходимости борьбы с вибрацией и шумом. Она ведется на всех этапах жизненного цикла машины, начиная от этапа проектирования, доводки, производства и заканчивая эксплуатацией.

Уменьшение вибрации и шума достигается в результате воздействия как на их источники внутри двигателя, так и за счет применения внешних дополнительных конструктивных элементов.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы является применение вибродемпфирующих покрытий (ВДП), как на самом источнике шума и вибрации (непосредственно на дизеле и генераторе [106]), так и на путях распространения вибрации и шума. Покрытия могут наноситься на подmotorную [107] или фундаментную раму, блок дизеля и собственно на конструкции корпуса судна [108]. В данной работе описан разработанный автором универсальный метод расчета динамически связанных конструкций с высоким демпфированием, позволяющий комплексно определять оптимальные технические решения по местам размещения ВПД.

Одним из критических мест в конструкции ГД является место расположения камеры сгорания и детали двигателя, подвергающиеся не только механическим нагрузкам, но и воздействию высоких температур и их градиентов. Увеличение температуры детали ослабляет прочностные свойства материала, из которого она изготовлена, а градиент температур в детали вызывает появление дополнительных термических напряжений. Поэтому к проблеме

определения температурных полей деталей ГД проявляется постоянный интерес. Применительно к поршневым двигателям можно отметить, например, работу [109], для ГТД – работу [110]. В монографии приведен разработанный автором универсальный метод обоснования в процессе проектирования выбора варианта конструкции деталей ГД на основе прогноза и оценки риска превышения предельных значений температур и/или их градиентов. На его базе предложены и исследованы оригинальные технические решения с проведением сопутствующих теоретических и экспериментальных работ.

Все отмеченное выше относится к факторам, влияющим на надежность (долговечность и безотказность) судовых технических средств. В монографии проблема надежности рассматривается в единой связи с обеспечением безопасности.

Проблема безопасности СЭУ значительно шире простого обеспечения надежности и живучести. При оценке безопасности рассматривают как внутренние, так и внешние опасности, которые потенциально могут вызывать опасное состояние большого масштаба. Собственно анализ причин функциональных опасностей и определение тяжести аварийных последствий составляют в монографии предмет теоретической оценки безопасности.

Существует ряд методик расчета безопасности. С их помощью можно провести сравнительный анализ проектных вариантов, наметить пути их улучшения, оценить затраты на снижение риска аварийных ситуаций. Однако, прямое их использование для расчета безопасности СЭУ не возможно в виду очевидной специфики этого объекта. Поэтому в монографии рассматриваются особенности расчета безопасности применительно к СЭУ.

Как правило, принятие решения о приемлемости риска выполняется при выполнении условия

$$R \leq R_{\text{доп}}, \quad (1.2)$$

где  $R_{\text{доп}}$  – допустимая (приемлемая) величина риска нежелательного события.

Анализ формулы (В1) показывает, что при фиксированной величине  $R_{\text{доп}}$  условие (1.2) соблюдается при разных пропорциях

между значениями  $P$  и  $C$ . Очевидно, что уменьшение степени тяжести последствий нежелательного события приводит к увеличению приемлемой вероятности такого события. Поэтому для судов различного назначения (и их СЭУ) требования будут различными. В первую очередь нормирование рисков следует выполнять для таких судов и морских объектов, аварии которых представляют наибольшую опасность по своим последствиям. С этой точки зрения применение ФОб к морским буровым установкам, танкерам, пассажирским судам и судам с аммиачными установками со стороны ИМО и РС логично и обосновано.

Проблеме выбора  $R_{\text{доп}}$  следует уделить особое внимание. В общем случае ущерб от аварии складывается из людских, материальных и природных потерь. В практике анализа риска аварии, обычно, потери разделяют на материальные (непрерывная случайная величина) и людские (дискретная случайная величина). Между тем со стороны международных и государственных органов контроля как отечественных, так и зарубежных, внимание в первую очередь уделяется нормированию человеческих потерь, которые являются наиболее важным интегральным показателем опасности аварии, так как на возможность ее появления влияет комплекс причин.

Следует также отметить, что в настоящее время ИМО рекомендует принимать в методе ФОб интегральные критерии риска для судоходства, предложенные Исполнительным органом по здравоохранению и безопасности Великобритании (UK Health and Safety Executive). Согласно этим критериям максимальный допустимый риск для членов экипажа, пассажиров и для людей на берегу оценивается как одна гибель на 1000, 10000 и 100000 несчастных случаев в год, соответственно. Пренебрежимо малый риск для всех одинаков и оценивается как одна гибель на 1000000 несчастных случаев в год. Между тем,  $F/N$ -кривая это так же кривая «социального риска» по РД 03-418-01 [111].

Можно констатировать, что в качестве временного периода усреднения обычно принимают 1 год. Это связано, видимо, как с редкостью аварийных событий, так и с периодичностью представления отчетов надзорными органами и надзорным органам.

Однако на практике отсутствуют исследования связанные с учетом этих требований на стадии проектирования СЭУ. Причем при оценке потенциальных рисков на стадии проектирования необходимо учитывать не только риски гибели или получения травм экипажем, но и опасность материальных потерь. Она требует рассмотрения одновременно проблемы обеспечения технической, эргономической и экологической безопасностей (и оценки соответствующих составляющих материальных потерь). В настоящее время в литературе и нормативных документах нет единого подхода к учету этих потерь.

Так, оценка риска материальных потерь в случае не выполнения технического обслуживания и ремонтов для грузовладельцев и судовладельцев (судоходные компании – далее Компании) выполнена, например, в [46]. В работе [47] разработана модель, позволяющая оценивать возможность дальнейшей эксплуатации СЭУ, имеющих наработку с определением остаточного ресурса механизмов и возможностью выбора наиболее эффективных и экономичных путей для его повышения в процессе ремонта и модернизации с использованием метода ФОБ.

Снижение риска экологических потерь производится надзорными органами воздействием на разные компоненты ЧМС системы. Оценка величины таких потерь на стадии проектирования проводится, как правило, с помощью процедуры оценки воздействия предполагаемой деятельности на окружающую среду, а на стадии эксплуатации – с помощью действующих нормативно-разрешительных документов. Так можно отметить, что в соответствии с Международным кодексом по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ), принятым 4 ноября 1993 года, каждая компания должна разработать, задействовать и поддерживать систему управления безопасностью (СУБ), которая включает среди прочих функциональных требований следующее: политику в области безопасности и защиты окружающей среды (ст. 2, п. 1). Компания должна сформировать политику в области безопасности и защиты окружающей среды (ст. 2, п. 1). Также Компания должна обеспечить задействование и выполнение этой политики персоналом, как в море, так и на берегу, на всех уровнях организации (ст. 2, п. 2). Это

подразумевает активное воздействие на компоненты Т и Ч модели представленной на рис.1.1. Воздействие на компоненты С и М (см. рис.1.1) заложены в соответствующих разделах Правил РС [105].

Поскольку прямая попытка вмешательства государственных надзорных органов в хозяйственную деятельность Компаний маловероятна, для показа судовладельцу экономической стороны риска человеческих потерь, в настоящее время, по данным [13], предложено оценивать предотвращение одной гибели в 3 млн. североамериканских долларов на одно судно (другие суммы, в диапазоне от ~1 до 3 млн.\$, приведены, например, в [112] и [113]). Поскольку там же указано, что эта сумма не является ценой жизни, то ее можно рассматривать как значение, обозначающее порядок затрат, которые должны быть направлены на обеспечение безопасности одной жизни. Пожалуй, такой подход показывает экономическую целесообразность повышения комплексной безопасности эксплуатации судна и обеспечения ее, в частности, еще на этапе проектирования. Этот подход не касается коммерческой деятельности и позволяет регламентировать только частоту (вероятность) человеческих потерь, которые при такой трактовке достаточно «дороги» и обеспечение приемлемости риска по человеческим потерям автоматически означает приемлемость материальных потерь. В особых случаях хозяйственной деятельности риск особо крупных материальных или природных потерь будет оговариваться отдельно, например как оценка риска коммерческой деятельности при технико-экономическом обосновании. Видимо, такой подход и будет окончательно сформирован в результате международной работы над методом ФОБ и, в первую очередь,  $F/N$ -диаграммы будут основным ориентиром для регламентации  $R_{доп}$  со стороны надзорных органов, хотя в отечественной практике разрабатываются и собственные методические подходы к оценке экономического эквивалента стоимости жизни человека [114]. В любом случае нормирование рисков по человеческим потерям подразумевает, что должны рассматриваться в первую очередь такие отказы, например, СЭУ, которые ведут к аварии со смертельными исходами. При оценке

риска экономических потерь спектр отказов, которые необходимо учитывать, более широк.

При рассмотрении разных вариантов, например, проектов одного судна или его СЭУ, степень тяжести последствий нежелательного события остается величиной постоянной. Это позволяет перейти к нормированию риска по величине  $P_{\text{доп}}$  определяемой из соотношения

$$P_{\text{доп}} = R_{\text{доп}} / C, \quad (1.3)$$

где  $C = \text{const}$ .

Однако в части нормативных документов по анализу риска аварии оперируют не с вероятностями, а со средними интенсивностями (частотами) нежелательных событий за определенное время. Опыт свидетельствует о том, что происходящие аварии соответствуют стационарному пуассоновскому потоку событий, для которого связь между вероятностью события  $P(t)$  и его интенсивностью  $\lambda$  достаточно проста [115]:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

причем при  $\lambda t < 0,01$  получаем  $P(t) = \lambda t$ .

Учитывая последнее выражение, все последующие объяснения в данной работе приводятся в терминах вероятностей и при необходимости могут быть достаточно легко видоизменены. Более подробно о связи величин, используемых при оценке риска аварии, изложено, например, в работе [116]. Таким образом, при анализе риска используются понятия «интенсивность», «частота» и «вероятность» аварии, которые в силу редкости событий-аварий численно совпадают, но имеют различные размерности.

Полученное по формуле (1.3) значение  $P_{\text{доп}}$  должно распределяться в необходимой пропорции между факторами (с учетом их значимости, например, на основании экспертных оценок, что предусмотрено процедурой ФОБ), определяющими безопасность судна как ЧМС системы в целом, как-то: человеческий фактор; воздействие внешних и рабочих условий; правила организации производства и эксплуатации и, наконец, технические устройства судна, включая СЭУ. Таким образом, появляется основание говорить

о величине  $P_{\text{доп}}$  для СЭУ и ее отдельных элементов. Тогда выражение (1.2) приводится к виду

$$P \leq P_{\text{доп}}. \quad (1.4)$$

Для определения, в частности,  $P$  необходимо использование совокупности дополнительных моделей и методов, которые с определенной условностью могут быть разделены на три довольно крупных класса [117].

1. Логико-вероятностные модели, интерпретирующие различные варианты возникновения и развития происшествий в виде диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево» («дерево отказа», «дерево событий»), «граф» (поточковый либо состояний и переходов), «сеть» (стохастической структуры – К.Петри или GERT). После дальнейшей формализации они позволяют получать математические соотношения (структурные функции алгебры событий и расчетные вероятностные многочлены), удобные для проведения системного анализа процесса возникновения техногенного ущерба и прогноза техногенного риска (подробнее см. [118]).

2. Аналитические модели: параметрические формулы; интегральные модели, базирующиеся на законах сохранения массы и энергии, и описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями; модели, построенные на представлении параметров состояния или энергомассообмена в их оригинальном виде и реализуемые системами дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Методы логико-лингвистического, имитационного, статистического и численного моделирования, основанные на использовании случайных (в том числе, нечетко определенных, например, размытых логик) распределений параметров совокупности различных моделей и учете непрерывно меняющихся факторов ЧМС систем и окружающей их среды.

Из перечисленного выше выделим процедуру ИМ, так как она нашла в настоящее время широкое применение в разных отраслях хозяйственной деятельности. Этому способствует как хорошо разработанная теоретическая база, изложенная, например, в работах [119]-[120], так и наличие большого спектра программного

обеспечения имитации в виде мощных продуктов ИМ, таких как Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World и других.

Между тем, СЭУ является специфическим объектом обеспечения надежности и безопасности для которого возможность использования процедуры ИМ требует более подробного обоснования.

## **1.2. Обоснование возможности использования имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности СЭУ**

В настоящее время остается актуальной точка зрения на место и задачи ИМ сформулированная одним из основателей отечественной школы ИМ членом корр. АН СССР Н.П. Бусленко в монографии [119]. Вот выдержки из этой работы. «Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи исключительной сложности: исследуемая система может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию многочисленных случайных факторов сложной природы, описываться весьма громоздкими соотношениями и т.д. ... существует большое число примеров, когда соответствующая сложная система без особого труда исследуется этим методом, в то время как для исследования другими методами она оказывается недоступной. Метод имитационного моделирования не требует создания специальной аппаратуры для каждой новой задачи и позволяет легко изменять значения параметров, исследуемых систем и начальных условий... По данным моделирования может быть оценена эффективность различных принципов управления, вариантов построения управляющих систем, а также работоспособность и надежность... Необходимо отметить, что в практическом отношении методика исследования сложных систем также требует дальнейшей разработки. Для того чтобы метод моделирования был удобен для практического применения нужна унификация моделирующих алгоритмов и их частей (подалгоритмов), описывающих различные элементы сложных систем» (с. 10-12). Подобная точка зрения позволяет системно подходить к использованию ИМ для решения задачи обеспечения надежности и безопасности, в том числе и СЭУ. Согласно [121]

системность подразумевает адекватное генетически глубокое отношение к объекту моделирования, к его исследованию и описанию и соответствующее программное обеспечение имитационных процедур. Организация ИМ для конкретного технического изделия предполагает индивидуальный подход к оценке безопасности каждого объекта. Это приводит к необходимости проведения специальных разработок. Приведем некоторые примеры.

В работе [46] рассматривалось возможность использования ИМ при анализе рисков при техническом обслуживании и ремонте СЭУ. Попытка создания имитационной модели для выбора рационального варианта СЭУ поискового судна приведена в [122]. ИМ динамики элементов и систем судового энергетического оборудования рассматривалось в [123]. В работах [124] и [125] ИМ использовано для обоснования нагрузки судовой электростанции, что дает особенно ощутимый результат при проектировании судов и установок, не имеющих аналогов, с большим числом мощных электропотребителей. В работах [126] и [127] ИМ использовалось для определения нагрузок, действующих на судовой валопровод. При рассмотрении проблемы разработки базы знаний ДВС для проектирования систем газообмена и двигателя в целом в работе [128] представлены требования, в частности, к системе ИМ.

Особо следует отметить работу [47]. В ней ИМ использовано для оценки риска дальнейшей эксплуатации СЭУ, имеющих наработку. Так произведено исследование СЭУ судна проекта 1077U для перевозки генерального груза. Для нее, на основании данных двух дефектаций пропульсивной установки и главных двигателей типа 8Z280-ET (8ЧН28/36) мощностью 1765 кВт, изготовленных в 1990 году Amagasaki Yanmar Diesel Engine Corporation, выполнено  $N_{\text{исп}} = 100000$  статистических испытаний. Установлено, что вероятность возникновения отказа не превысила предварительно заданной предельной вероятности 2,5% для единичного отказа и 0,00001% для наступления одновременного (в промежутке менее 100 часов) отказа пропульсивных установок правого и левого борта. СЭУ была допущена к эксплуатации в течение 4000 часов без проведения

дополнительного ремонта. Отказов элементов СЭУ в течение указанного периода не наступило.

В работе [47] представлены результаты ИМ на основании данных дефектоскопии втулок цилиндров главных и вспомогательных двигателей типа ЧН25/34. В частности определена вероятность превышения допустимого износа втулок двигателей в течение различных сроков последующей эксплуатации. Указано, что полученный результат соответствует статистическим данным об отказах втулок цилиндров судовых двигателей типа ЧН25/34, эксплуатируемых на судах Дальневосточного бассейна (суммарная наработка двигателей 39,9 тыс. часов).

Также в [47] была произведена оценка безопасной работы главного двигателя правого борта типа 6ЧН40/46 исследовательского судна проекта 12883. Двигатель мощностью 2576 кВт был построен в 1989 году, изготовитель – «Русский Дизель», заводской номер 185. Нарботка с предыдущей дефектации составила 5764 часа. По результатам дефектации была проведена на основании ИМ оценка вероятности возникновения отказов на период 5000 и 8000 часов. По результатам расчетов были сделаны выводы о том, что уровень безопасности недостаточен для допуска дизеля к эксплуатации в течение 8000 часов без осуществления ремонта.

Однако в перечисленных выше работах нет единого методического подхода, который бы позволил на разных этапах проектирования СЭУ применять ИМ для оценки обеспечения надежности и безопасности с соответствующей подробностью проработки, в частности, при обосновании перехода к следующему этапу проектирования. В них рассматривается только отдельные аспекты, которые влияют или могут воздействовать на надежность и безопасность СЭУ и не рассматривают эту проблему комплексно, с учетом влияния факторов износа, усталостной прочности, теплового состояния, шума и вибрации. Поэтому преимущество настоящей работы заключается в том, что впервые разработанные методические рекомендации позволили целенаправленно подходить к выбору и анализу существующих методов и алгоритмов, определять их возможное место в процессе ИМ, разрабатывать собственные методы и алгоритмы расчетов и программы экспериментальных

исследований в тех случаях, когда обнаруживалась потребность в новых знаниях.

Следует отдельно отметить следующее преимущество ИМ использованное в данной работе применительно к оценке обеспечения надежности и безопасности СЭУ. Дело в том, что область ординат принимаемых в рассмотрение при анализе надежности и безопасности будет находиться очень близко к началу координат в виду известной малости величин интенсивности  $\lambda$  и вероятности отказов (аварий)  $P_{отк}$ . Следует отметить, что количество случаев реализации процесса ИМ не ограничено, и при малом числе отказов, можно получить достоверные результаты. Такой подход позволяет обойти проблему малости величин  $P_{отк}$ . При этом в настоящей работе учитывалось, что используемые при формализации задач обеспечения надежности и безопасности СЭУ методы и алгоритмы действий должны быть удобны для организации многочисленных статистических испытаний.

В данной работе основное внимание уделено применению ИМ для прогноза и оценки надежности и безопасности СЭУ как по отношению к компонентам М и С, так и в целом ЧМС системы (см. рис.1.1). При этом, в первую очередь, разработаны, в том числе на основании данных оригинальных экспериментальных исследований вибрации моделей судовых конструкций, гидродинамики и теплообмена в проточных частях энергетических машин с пристенным струйным охлаждением, новые методы и алгоритмы определения значения величины  $P$ , что на основании ее сравнения с  $P_{доп}$  позволит лицам принимающим окончательное решение, обосновано предпринимать дальнейшие действия.

Следует также отметить длительный интерес (с конца 60-х – начала 70-х годов XX века) к проблеме исследований, с одной стороны, ЧМС с человеком-оператором в роли субъекта управления и, с другой, человека в роли объекта управления. Появились научные направления названные «инженерная психология» и «эргономика». В рамках этих направлений сформировался подход к человеку как к особому звену, включенному в систему технических средств, что позволяет решать вопросы повышения безопасности

функционирования системы с учетом того, что критерием тяжести операторского труда становится объем перерабатываемой информации, а, следовательно, не только физическая тяжесть труда, но и его нервно-психическая напряженность. При этом определяющими в деятельности человека-оператора являются моторная и сенсорная способности.

Согласно мнению Н.А. Абрамовой и Д.А. Новикова, высказанному в предисловии к [129], «одна из основных идей этого направления состоит в том, что недостаточный учет свойств человека (человеческих факторов) при построении тех или иных систем, включающих человека, в основном, в роли оператора, может привести к неудовлетворительному решению поставленных задач: снижению надежности, уровня безопасности, достоверности и т.п. Еще одна важная для практики идея заключается в том, что задача выявления значимых человеческих факторов должна охватывать не только сами системы, но и процесс их проектирования». Учет влияния человеческого фактора на вероятность возникновения происшествий при выполнении судовым механиком технологических операций достаточно подробно рассмотрен в работе [45]. Однако в ней не рассматривалось воздействие шума и вибрации, как на моторную, так и на сенсорную способности человека. Причем в большей степени на сенсорную, которая заключается в обмене зрительной информации с центральной нервной системой (т.е. знаниями – памятью). В настоящей работе автор исследовал проблему снижения шума и вибрации с помощью обоснования при проектировании рационального использования ВДП. Учитывалось, что шум и вибрация являются факторами, оказывающими существенное воздействие не только на судовые механизмы (известно влияние виброактивности на показатели долговечности и безотказности), но и на экипаж судна (существует однозначная связь между уровнями шума и вибрации и состоянием здоровья обслуживающего персонала и производительностью его труда).

Следует отметить и еще одно обстоятельство, учитывавшееся автором. Сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны есть мощные программные средства для осуществления ИМ, но они облегчают только сам процесс испытаний и не касаются самой

трудоемкой задачи сбора исходной информации, ее интерпретации, формализации и адекватного соотношения с конкретным объектом. При этом освоение таких программных сред требует значительных усилий (о чем косвенно можно судить по обилию учебной литературы, обучающих семинаров и т.п.), а использоваться они будут весьма ограничено. С другой стороны, существуют программные продукты типа CARA и RCM-Tool, разработанные MARINTEK, которые представляют собой систему автоматизированного построения дерева отказов применительно к судну и его СЭУ. Но они не используют ИМ, что существенно ограничивает возможность их использования, особенно при большой неопределенности исходных данных, возникающей при проектировании судна или его СЭУ нового типа, не имеющего аналогов. Остаются также вопросы, связанные с доступностью этих программных продуктов и возможностью их освоения достаточно широким кругом специалистов.

В этих условиях автору потребовалось создать на основе оригинальных моделей и алгоритмов с использованием известного математического аппарата достаточно универсальные программные продукты на основе языков программирования типа Borland Delphi. Пригодные для реализации процедуры ИМ и использования в прогнозе и оценке надежности и безопасности на любом этапе проектирования СЭУ и ее элементов.

Однако исходной позицией для решения указанных задач было разработка автором методических рекомендаций по организации ИМ применительно к СЭУ. Опираясь на них, удалось с единых позиций подойти к разработке методик, алгоритмов, вычислительных программ и программ экспериментальных исследований для обеспечения повышения при проектировании надежности и безопасности СЭУ.

### **1.3. Разработка методики и рекомендаций по организации процедуры имитационного моделирования применительно к СЭУ**

Следует различать два принципиально разных случая проектирования любого сложного технического объекта (СТО). Первый основан на использовании типовых технических решений –

известных прототипов СТО. Для этих прототипов накоплена более или менее достаточная статистика о результатах их эксплуатации, выявлены их достоинства и недостатки. Цель такого проектирования – создание модернизированного варианта, например, судна. Второй случай касается проектирования судна, для которого нет прототипа, т.е. когда создается новый, не имеющий аналогов объект техники. В соответствии с изложенным, при создании целевых стандартов постройки новых судов также обозначились два подхода. Один с использованием ФОБ, другой – «детерминистский», учитывающий, главным образом, опыт эксплуатации [14]. Оба подхода оправданы и имеют для своего применения объективные предпосылки. Причем, новый уникальный объект, созданный в условиях недостатка информации с использованием процедуры ФОБ, по мере его эксплуатации и накопления статистики становится типовым и вполне может быть модернизирован на основе «детерминистского» подхода. И наоборот, если в типовое решение вносятся существенные изменения, придающие объекту новые свойства, не присущие прототипу, то естественен переход к использованию ФОБ. В данной работе основное внимание уделено проблематике обеспечения надежности и безопасности при проектировании новых, не имеющих аналогов, технических решений для СЭУ и вновь создаваемых элементов.

Проектирование любого СТО происходит путем выполнения нескольких этапов (например, предэскизное, эскизное, предварительное, рабочее). Они отличаются между собой в первую очередь глубиной проработки конструктивного исполнения объекта. Оценка альтернативных конструктивных решений на стадии проектирования предусмотрена ГОСТом Р 51901-2002. На каждом этапе проектирования решается задача выбора наилучшего решения на основе сопоставления различных вариантов проекта перспективного судна и его СЭУ по различным показателям, например: энергетическим (мощностным); массогабаритным; энергетической эффективности (экономичности) и т.п. Помимо использования перечисленных традиционных критериев в новейшей мировой практике, нашедшей отражение, например, в нормативных документах ГОСТ Р 51901.4-2005 и ГОСТ Р ИСО 10006-2005, предлагается выполнять анализ и количественную оценку риска.

Однако, в этих и других известных документах нет конкретных рекомендаций, как это делать применительно к СЭУ. В данной работе предлагается прогноз ресурса и оценку риска (как мер надежности и безопасности) выполнять на соответствующем этапе проектирования, а результат сравнения оценок – использовать как один из аргументов для выбора лицами, принимающими окончательное решение, варианта выполнения, например, СЭУ при переходе от одного этапа к другому. Предлагаемый автором метод осуществления выбора варианта на основе прогноза и оценки рисков представлен на рис.1.2. В общем случае он предусматривает отдельный учет на каждом этапе проектирования трех видов потерь: человеческих, материальных и экологических. Для каждого вида потерь определяется допустимая величина риска  $R_{\text{доп}}$ . Далее, на основе результатов формализации задачи (построения дерева событий) выполняется распределение  $R_{\text{доп}}$  по элементам ЧМС системы. Этот процесс является важным, так как позволяет при необходимости в последующем подробно и обоснованно рассматривать варианты выполнения каждого элемента отдельно от остальных. Выполнение прогноза риска для элементов ЧМС системы позволяет определить риск для всей системы и путем сравнения его с допустимым значением принимать окончательное решение по выбору варианта выполнения при переходе от одного этапа к другому. Рассмотрим этот метод более подробно.

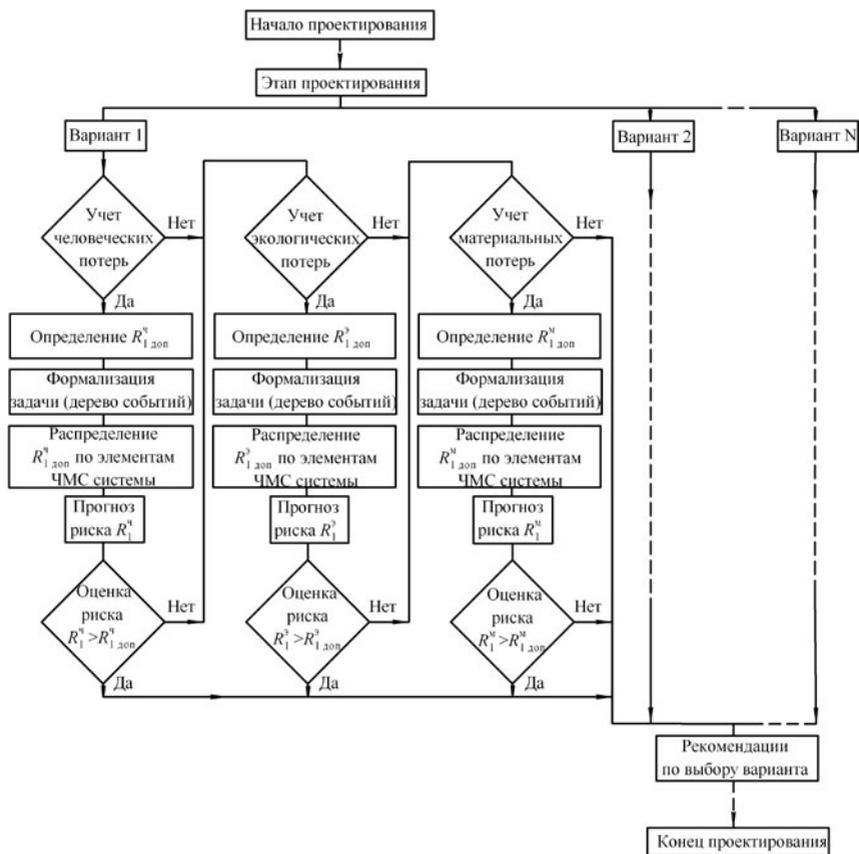


Рис.1.2. Выбор варианта на основе прогноза и оценки рисков

В настоящее время можно выделить два направления в прогнозе и оценке риска. Первое связано с необходимостью учета при проектировании судна глобальных рисков, что вынуждает рассматривать риски трех видов: человеческих потерь, экологических и материальных (касающихся третьих лиц, как-то: других судов; общественно значимых береговых объектов, например, мостов, каналов, шлюзов и т.п.). Для этих рисков через надзорные и другие органы управления, устанавливаются предельные величины. Риски нормируются, соответственно, через частоту человеческих потерь, допустимые величины загрязнения окружающей среды (разливы нефти, выбросы в воздух, шумовое

воздействии). Такое нормирование осуществляется для судна в целом и позволяет на основании, например, упомянутых во введении диаграмм  $F/N$  или  $F/G$  получить соответствующие значения  $R_{\text{доп}}$  или, как было показано выше,  $P_{\text{доп}}$ . Раздельное нормирование видов рисков необходимо для исключения возможности перераспределения величины допустимого значения одного вида риска за счет другого.

Второе направление связано с вопросами хозяйственной деятельности конкретной Компании и определяет ее коммерческий риск. Он учитывает не только указанные выше виды рисков, но и дополнительные, связанные, например, с не плановым, аварийным техническим обслуживанием и ремонтом судна в процессе эксплуатации и т.п. Приемлемые значения такого риска Компания назначает сама.

Установленную величину каждого вида риска для судна в целом нужно распределить между теми компонентами ЧМС системы, которые значимы на данном этапе проектирования. Появляется потребность формализации задачи. Эта формализация подразумевает необходимость составления «дерева отказов» или «дерева событий» (рис.1.3). Формализация для каждого вида риска производится отдельно. Здесь должен широко использоваться метод экспертной оценки, который выполняет команда экспертов во главе с координатором проекта, имеющим опыт и навыки по анализу рисков.



Рис.1.3. Пример «дерева событий» для ЧМС системы

На разных этапах проектирования состав команды может меняться, соотносясь с трудоемкостью и детализацией проекта. Для оценки степени согласия экспертов на каждом этапе проекта можно использовать предложенный РС специальный коэффициент конкордации [130].

Далее необходимо использовать операцию ранжирования отказов с целью определения приоритетов по их опасности для СЭУ

и судна в целом. Для оценки риска человеческих потерь следует принимать во внимание такие элементы «дерева событий», отказ которых может повлечь жертвы. Для оценки рисков экологических потерь – такие элементы «дерева событий», отказ которых может повлечь экологический ущерб и. т.д. При рассмотрении различных эксплуатационных состояний ЧМС системы имеет смысл проводить ранжирование отказов ее элементов в соответствии с частотой отказов и степенью тяжести их последствий, как это предусмотрено в ГОСТ Р 27.310-95. На основании, например, экспертных оценок, предлагаются индексы частоты отказов  $F_1$  и степени тяжести отказа  $S_1$ . Приведенные признаки ранжирования облегчают выяснение номенклатуры элементов, отказ которых дает наибольший риск. Индекс риска представляет собой сумму

$$R_1 = F_1 + S_1,$$

где  $R_1$  – индекс риска отказа детали.

Индекс риска служит количественной мерой опасности отказа, поэтому его можно использовать в качестве критерия ранжирования элементов ЧМС системы, отказ которых представляет наибольшую опасность. При подсчете  $R_1$  возникают известные трудности с делением частоты отказов на категории: частые, весьма вероятные, маловероятные и крайне маловероятные. Здесь можно опираться на данные страховых обществ, приведенные, например, в [131]-[133]. В [65] приведены примеры выполненного ранжирования. Представляют также интерес предложения М.Д. Емельянова по определению критичных элементов морских судов [134], Г.В. Егорова по идентификации опасностей для судов внутреннего плавания [135] и Д.С. Семионичева по матричной оценке тяжести последствий отказа элементов СЭУ [47].

Чтобы получить значение  $R_{\text{доп}}$  для СЭУ и ее элементов по каждому виду рисков следует распределять его между частями ЧМС системы пока не будет достигнут желаемый результат. СЭУ входит в компонент М ЧМС системы. Однако допустимый риск для судна может быть распределен и среди других компонентов. Рассмотрим их более подробно.

Компонент Ч ЧМС системы может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис.1.4. В данной работе «человеческий фактор» рассматривается только с точки зрения влияния на его здоровье, нервно-психическую напряженность условий труда и производительность труда через компонент С ЧМС системы. Однако, необходимо отметить, что в определенных случаях его влияние на безопасность может существенно перекрывать другие составляющие, что делает целесообразным рассмотрение его отдельно (параллельно) от остальных.



Рис.1.4. Пример «дерева событий» для компонента «Ч» ЧМС системы

Компонент М ЧМС системы может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис.1.5. Именно через этот участок «дерева событий» удастся получить необходимые для дальнейшего проектирования СЭУ и ее элементов допустимые значения рисков. Более подробно эта процедура будет описана ниже. Практика создания «дерева событий» для СЭУ современного судна отражена в работе [136]. Исследованные варианты состава СЭУ представлены на рис.1.6. Эти варианты охватывают, по данным [137], более 99,5% от общего количества СЭУ самоходных судов. Здесь представлены СЭУ морских судов с главными малооборотными двигателями (МОД) с прямой передачей на винт регулируемого (ВРШ) (рис.1.6,а) и фиксированного (ВФШ) (рис.1.6,б) шага. Для речных судов характерны СЭУ с среднеоборотными (СОД) и высокооборотными (ВОД) дизелями работающими через с редукторную передачу (РП) на ВРШ (рис.1.6,в) или через реверс-редукторную передачу (РРП) на ВФШ (рис.1.6,г). В настоящее время при проектировании СЭУ большое распространение получает применение винто–рулевых колонок (ВРК) различных конструктивных исполнений (рис.1.6,д).

Компонент С ЧМС системы может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис.1.7. В этом дереве

отсутствует элемент «дизайн жилых помещений», поскольку его рассмотрение не входит в задачи настоящей работы.



Рис.1.5. Пример «дерева событий» для компонента «М» ЧМС системы

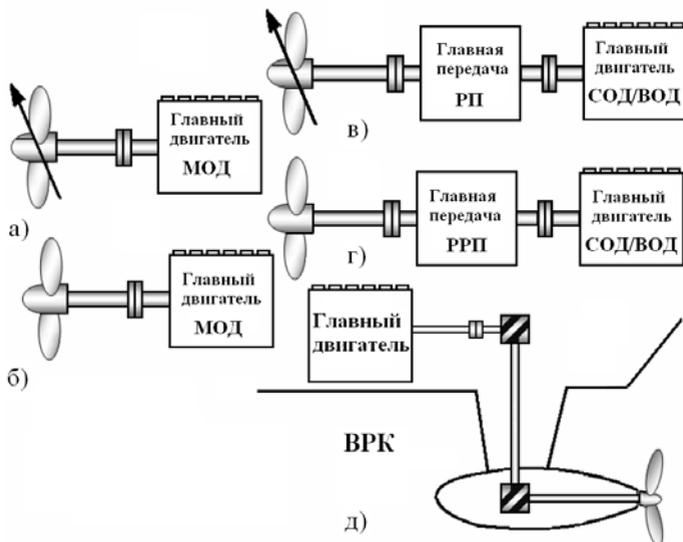


Рис.1.6. Исследованные варианты состава СЭУ [136]: а, б – МОД с прямой передачей на винт регулируемого и фиксированного шага,

соответственно; в – СОД/ВОД с редукторной передачей на винт регулируемого шага; г – СОД/ВОД с реверс-редукторной передачей на винт фиксированного шага; д – ГД работающий на винто-рулевую колонку

Следует отметить, что в представленном на рис.1.7 «дереве» все элементы регламентируются специальными правилами и нормами. Однако, если не соблюдение норм освещения, отопления и кондиционирования (внутренний климат) можно устранить достаточно легко, например, за счет запасов в производительности соответствующего оборудования, то для приведения параметров по шуму и вибрации к нормативным значениям могут потребоваться серьезные конструктивные и/или организационные мероприятия, реализация которых часто приводит к дополнительным крупным материальным затратам. Появление риска прямых человеческих потерь от этих факторов маловероятно. Величину степени потери трудоспособности можно определить используя «шкалу Россера» [138].



Рис.1.7. Пример «дерева событий» для компонента «С» ЧМС системы

Компонент Т ЧМС системы может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис.1.8. Все элементы в приведенном примере постоянно совершенствуются. Здесь можно отметить, упомянутую выше, деятельность ИМО по созданию целевых программ постройки судов и принятие МКУБ. Среди последних федеральных программ можно отметить разработку, например, требований к программе обеспечения качества ядерных энергетических установок судов [139] и принятие 15 октября 2008 г. Государственной Думой ФС РФ в первом чтении проектов «Устава о дисциплине работников морского транспорта» и «Устава о дисциплине работников внутреннего водного транспорта». Необходимость принятия последних мотивируется тем, что дисциплина работников при выполнении трудовых обязанностей служит гарантией безопасного функционирования морского и

внутреннего водного транспорта и предотвращения ситуаций, угрожающих жизни и здоровью людей, защиты и сохранения окружающей среды. Деятельность РС по совершенствованию Правил была описана выше.



Рис.1.8. Пример «дерева событий» для компонента «Т» ЧМС системы

Компонент «Внешняя среда» ЧМС системы может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис.1.9. Здесь особое внимание следует обратить на ее взаимосвязь с мореходностью судна. Этой проблематике посвящено достаточно много работ, из последних отметим, например, [140]. В данном случае статическая остойчивость рассмотрена отдельно, как, например это сделано в работе [141]. Этот и остальные элементы «дерева» достаточно подробно рассматриваются в соответствующих разделах Правил РС.



Рис.1.9. Пример «дерева событий» для компонента «Внешняя среда» ЧМС системы

Таким образом, на основе рассмотрения «деревьев событий» составленных из элементов представленных на рис.1.3 - 1.5 и на рис.1.7 - 1.9 группа экспертов устанавливает как вид «дерева» для определения соответствующего риска, так и характер связей между элементами этих «деревьев». Связи между элементами разных уровней устанавливаются зависимостями на основании логики соподчиненности. В частности, могут быть использованы три типа связей. В данной работе предлагается рассматривать их в вероятностной трактовке. Первый тип связи описывает ситуацию, когда отказ системы обусловлен отказом всех входящих в нее

элементов. В этом случае вероятность отказа за период наработки  $t$  равна

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_k(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t),$$

где  $P_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента;  $k$  – количество элементов.

Второй тип связей применяется тогда, когда отказ любого элемента вызывает отказ всей системы. Для такой связи

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - P_i(t)]. \quad (1.5)$$

Если система содержит  $z$  одинаковых элементов и ее отказ наступает при отказе более  $m$  элементов, то используется связь третьего типа. Она имеет вид

$$P(t) = C_z^m p(t)^m [1 - p(t)]^{z-m},$$

где  $C_z^m$  – сочетание  $m$  элементов из множества  $z$ ;  $p(t)$  – вероятность отказа одного элемента.

Используя указанные связи или их сочетания «прогоняется» полученное «дерево событий» сверху вниз, т.е. от допустимого значения риска для всего судна, до допустимых значений всех нижестоящих элементов, включая СЭУ целиком и ее отдельные элементы, как главные, так и вспомогательные. В [65] приведены примеры выполненных автором распределений допустимых значений риска по деталям и узлам судовых двигателей разных типов.

Для прогноза риска необходимо разработать рекомендации по проведению такого исследования. Для оценки риска – иметь результаты первого и допустимые значения, получение которых было рассмотрено выше.

В качестве рекомендации для выполнения прогноза риска предлагается использовать ИМ (использование имитационных методов получения частот происходящих событий предусмотрено ГОСТом Р 51901-2002). Оно позволяет экспериментировать с аналитически-вероятностной моделью, проигрывая различные ситуации и упрощая принятия решения. Это в полной мере соответствует философии ФОБ, согласно которой необходимо

управлять риском путем сопоставления различных вариантов. Для каждого из них производится оценка затрат и выгод и, таким образом, принимается оптимальное решение для снижения риска возникновения опасных ситуаций. Как было отмечено выше, общие подходы в ИМ встречаются редко, поэтому применительно к рассматриваемой задаче, касающейся вопросов проектирования СЭУ и ее элементов, автором предлагается следующая последовательность действий (рис.1.10).

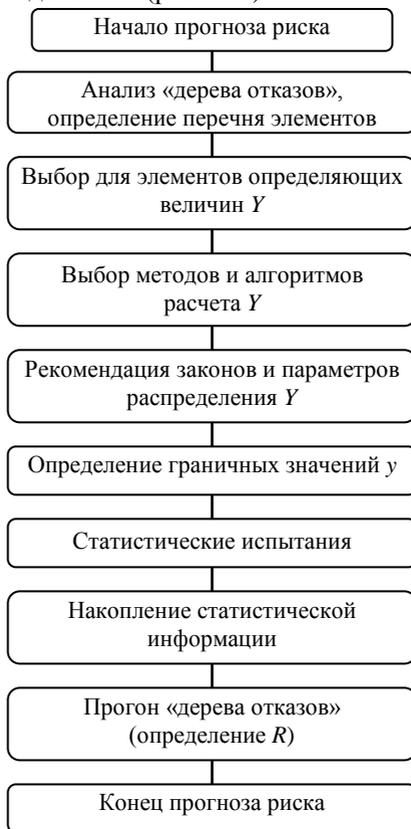


Рис.1.10. Последовательность выполнения прогноза риска

1. На основе анализа «дерева отказов», полученного при распределении допустимых значений рисков среди элементов ЧМС

системы, определяются все элементы (перечень) «деревя», отказ которых не зависит от отказа других элементов.

2. На основании, например, экспертных оценок необходимо выбрать определяющую величину  $Y$ , наиболее полно и информативно характеризующую состояние каждого элемента из определенного в п. 1 перечня. В качестве такой величины может быть рассмотрена долговечность (ресурс) элемента, уровень шума или вибрации, тепловой состояние (уровень температур или их градиентов) и т.п.

Обыкновенно эта величина имеет рассеивание и носит случайный характер. В результате величина  $Y$  представляет собой статистический ряд. Характеристиками этого ряда являются: характеристики положения (среднее арифметическое  $M$ ); характеристики рассеивания (дисперсия  $D$ , среднее квадратичное отклонение  $S$ ); характеристики распределения (законы распределения). Часто в качестве характеристики рассеивания пользуются относительным показателем  $V$  – коэффициентом вариации, который представляет собой отношение среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому.

3. Выбирается метод или алгоритм расчета  $Y$  и рекомендуются закон и параметры распределения  $Y$ . Тщательность и обоснованность этих действий определяет точность получения выходной информации.

4. Определяются граничные значения  $y$  для определяющей величины  $Y$ . В качестве такой величины могут выступать назначаемые, на основании тех или иных доводов экспертов, численные значения (например, назначенный ресурс для долговечности, граничный уровень температур и/или их градиентов для теплового состояния). Могут использоваться и нормативные значения (например, определенные на основании санитарных норм по допустимым уровням вибрации и шума).

Перспективным является получение рекомендаций по  $Y$ ,  $y$ , законам распределения и их параметрам от проектантов и/или производителей оборудования СЭУ. Они обладают необходимым опытом и в процессе проектирования этого оборудования наиболее

четко представляют, как оно функционирует, и какие возможности в него заложены. Если такое оборудование, например ГД, само по себе является сложным изделием, то можно ожидать получения от разработчика и детализацию его внутреннего содержания в виде соответствующего «дерева отказов». Оно может включаться в «дерево» для СЭУ его разработчиком, а этот продукт – в «дерево» для судна его проектантом.

Следует отметить, что при создании новых, не имеющих аналогов, образцов техники важнейшую роль играет проведение НИР и ОКР. На основании этих работ логично получать и информацию относительно прогноза риска использования этих образцов, т.е. искомые рекомендации по определяющим величинам  $Y$  (или  $Y$  в функции от времени  $t$ ), их граничным значениям  $y$ , методам (или алгоритмам) расчета  $Y$ , и законам и параметры распределения  $Y$ . В этом смысле новые научные исследования становятся гарантией успешного проведения прогноза и последующей оценки риска. В частности в настоящей работе автором использованы данные оригинальных экспериментальных исследований вибрации моделей судовых конструкций, гидродинамики и теплообмена в проточных частях энергетических машин с пристенным струйным охлаждением.

5. Следующим этапом прогноза риска при проведении ИМ являются статистические испытания. В их ходе разыгрывается, например, методом Монте-Карло (этот метод рекомендован для использования при анализе рисков ГОСТом Р 51901-2002) значение случайной величины  $Y$  и производится ее сравнение с граничным (например, нормативным) значением  $y$ . Генерация случайных чисел с заданными законами осуществляется с помощью генератора случайных чисел. Генератор построен так, что сначала выдает равномерно распределенные числа в интервале от 0 до 1, которые затем с помощью специальных подпрограмм преобразовываются так, чтобы их плотность распределения соответствовала заданному закону. Для генерации случайных чисел в интервале 0-1 существуют стандартные подпрограммы, например, Random для алгоритмического языка Borland Delphi. Если  $Y \geq y$  или  $Y < y$  (в зависимости от особенностей рассматриваемой задачи), то считается,

что произошел отказ или, что испытание прошло успешно. Потом испытания повторяются. Выполнение заданного числа испытаний позволяет получить необходимую статистику для всех элементов из перечня, определенного в п. 1. На ее основе определяется вероятность

$$P_{\text{отк}} = \frac{N_{\text{н.и}}}{N_{\text{исп}}}, \quad (1.6)$$

где  $N_{\text{н.и}}$  – число нарушений нормативного уровня;  $N_{\text{исп}}$  – общее число испытаний.

Если известны значения  $Y$  в функции от времени  $t$ , то можно получать значения  $P_{\text{отк}} = f(t)$ , то есть давать прогноз на заданное время эксплуатации.

Следует отметить, что, управляя количеством случаев реализации  $N_{\text{исп}}$ , можно получить достоверные результаты и при малом числе отказов. Оценить погрешность  $\varepsilon$  определения вероятности отказа можно согласно зависимости

$$\varepsilon = \frac{3 \sigma}{\sqrt{N_{\text{исп}}}},$$

где  $\sigma$  – среднееквадратическое отклонение (стандартное отклонение).

Это позволяет в любом случае обойти проблему малости величин  $P_{\text{доп}}$ . Используемые при формализации задач прогноза и оценки надежности и безопасности методы и алгоритмы действий должны быть удобны для организации многочисленных статистических испытаний. То есть они не должны быть чрезмерно громоздки и требовать больших вычислительных усилий, чтобы сделать процесс испытаний приемлемым, например, по временным показателям. Учет этого фактора стал определяющим в настоящей работе при рассмотрении примеров использования ИМ для обеспечения надежности и безопасности важных элементов СЭУ.

6. Последний этап ИМ связан со статистической обработкой совокупности случайных параметров для всех остальных элементов дерева отказов – выходных данных реализации «дерева отказов». Эта совокупность может быть получена двумя способами. Первый, в

результате многократных прогонов всего «дерева отказов» при наиболее вероятных исходных данных прогонов непосредственно в ходе статистических испытаний. Второй, в результате однократного прогона «дерева отказов» для определения вероятности отказов всех остальных элементов «дерева», на основании логики сподчиненности после статистических испытаний для элементов, отказ которых не зависит от надежности других.

Первый способ позволяет, по сути, подойти к определению риска ошибки при выполнении самой процедуры прогноза и оценки надежности и безопасности, так как при каждом прогоне можно сравнивать риск (вероятность отказа при одинаковой степени тяжести последствий) отказа, например, СЭУ в целом (или ее отдельных элементов) с допустимым значением (см. формулы (1.2) и (1.4)) и накапливать статистику по превышениям этого значения. В этом случае получается величина риска ошибки для лиц, выполняющих процедуру ФОб. Он не регламентируется контролирующими органами, а является их личным риском. Такую оценку целесообразно проводить при большой неопределенности в исходных данных или при неуверенности в достаточной квалификации лиц, выполняющих прогноз риска.

Второй способ, позволяет существенно сократить время реализации вычислительных процедур за счет однократного прогона всего «дерева отказов». Он дает только одно значение риска, которое и сравнивается с допустимым значением. По мнению автора, этот способ является наиболее целесообразным.

Далее следует перейти к оценке риска отказа, например, СЭУ в целом путем сравнения с допустимым значением (см. формулу (1.2)), полученным выше на основании распределения допустимого значения между элементами ЧМС системы. Если величина риска больше допустимого значения, то этот вариант проекта отклоняется и производится прогноз риска для следующего варианта. Если риск меньше допустимого значения, то вычисляются риски для других вариантов и на основании сравнения их между собой дается рекомендация о выборе варианта для разработки на следующем этапе проектирования (см. рис.1.2).

Можно констатировать, что составление «деревьев», проведение прогнозов и оценок рисков требуют достаточно больших трудозатрат

в процессе проектирования. Однако, полученные результаты и программные комплексы являются продуктом, который может быть использован не только для обоснования выбора того или иного технического решения, но и для продажи Компании. Прямая выгода Компании от покупки таких разработок будет заключаться в том, что их можно использовать следующим образом:

- для прогноза риска своей хозяйственной деятельности;
- предоставлять грузовладельцу для показа выгоды от использования услуг Компании или страховым компаниям для обоснования величины страховых ставок;
- для прогноза риска человеческих или экологических потерь, который можно предоставлять надзорным органам при очередном освидетельствовании судна или решении задач реновации.

Наибольший эффект от выполнения работ по прогнозу и оценке надежности и безопасности может быть достигнут при их задействовании в процессе создания диагностических моделей и включения в программное обеспечение электронных систем управления, как СЭУ, так и судна в целом. Более подробно это рассмотрено в следующей главе.

Для решения задачи обоснования рекомендаций по выбору функциональных зависимостей, алгоритмов и методов расчета для определения безотказной работы отдельных деталей и узлов ГД с учетом влияния случайных факторов и пригодности применения в ИМ и реализации в «дереве отказов» необходимо подробно рассмотреть вопросы, связанные с обеспечением надежности и безопасности главного судового дизеля по ресурсным показателям.



РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

# РС – ВЫСОКИЙ КЛАСС БЕЗОПАСНОСТИ



Главное управление РС: 191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д. 8  
Тел.: 8 800 333 9999, факс +7 (812) 314 10 87, [robox@rs-class.org](mailto:robox@rs-class.org)  
[www.rs-class.org](http://www.rs-class.org)

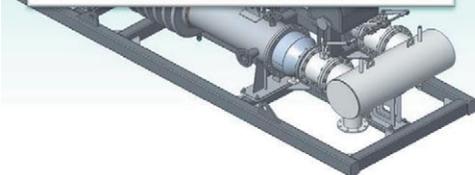


## Нева-Теплотехника



Разработка и поставка теплообменного оборудования

<http://www.neva-teplo>



## **2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПО РЕСУРСНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ**

### **2.1. Основные принципы и предпосылки применения имитационного моделирования для прогноза и оценки надежности и безопасности главного судового дизеля**

Выполненный анализ отказов основных типов главных судовых дизелей позволил в первую очередь выявить наименее надежные элементы. Так было установлено, что чаще всего отказы связаны с поршневыми кольцами и форсунками. Однако отказ этих деталей оказывает различное влияние на работоспособность дизеля. Например, выход из строя распылителя и даже поломка поршневого кольца не всегда требует вынужденной остановки дизеля. По этой причине предусмотрена операция ранжирования отказов с целью определения приоритетов по их опасности для остановки двигателя и судна в целом, рекомендации по выполнению такого ранжирования приведены в главе 1, пример выполненного автором ранжирования приведен в работе [65].

Индексы риска позволяют ранжировать детали по степени их опасности, как для самого двигателя, так и для судна в целом. К таким деталям относятся: остов – фундаментная рама; блок цилиндров; станина; крышки цилиндров; анкерные связи; шпильки крепления цилиндрических крышек; цилиндрические втулки; коленчатый вал и рамовые подшипники; шатунные подшипники; шпильки (болты) крепления крышек подшипников; газораспределительный механизм – детали клапанного привода, впускные и выпускные клапаны; поршень; кресткопфные подшипники; реверсно-пусковая система; дистанционно-автоматическое управление.

Детали остова, как правило, нельзя заменить силами машинной команды. Повреждения и отказы деталей остова, за исключением крышек цилиндров (головок) и цилиндрических втулок, составляют незначительный процент повреждений и отказов судового дизеля, однако, их последствия могут быть крайне тяжелыми, вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Не случайно о повреждениях деталей и элементов остова упоминается во многих литературных источниках [29], [38], [64], [142]-[145] и др.

Ситуация осложняется также тем, что при работе двигателей затруднено, а в ряде случаев и практически невозможно своевременное обнаружение повреждений несущих деталей остова.

Из несущих деталей остова более часто подвержены повреждениям фундаментные рамы (а также картеры при подвесных коленчатых валах) и блоки цилиндров. Их ресурс, по существу, определяет ресурс дизеля. Для этих деталей изменение технического состояния происходит по причине усталости материала, старения, остаточных деформаций и коррозии. Среди перечисленных причин усталостные поломки встречаются достаточно часто. Усталостным разрушениям подвергаются также коленчатые валы и шатуны. Не случайно блок цилиндров (опорные бурты), коленчатый вал, шатун (тело, район зубчатых разъемов) входят в перечень сборочных единиц и деталей в разделе 6.8.1 «Дизели» части 6 «Техническое наблюдение за ремонтом элементов механических установок и систем (дизелей, редукторов, компрессоров, насосов, рулевых приводов, сепараторов, вентиляторов» Руководства по техническому наблюдению за ремонтом морских судов, являющегося нормативным документом РС, подлежащих при ремонте обязательному контролю на отсутствие трещин.

Для определения последствий отказа отдельных элементов ДВС следует разбивать судовой дизель на составные части. Можно использовать опыт разбивки двигателя при анализе его надежности, когда отдельно выделяют блок цилиндров, кривошипно-шатунный механизм, головку цилиндра, клапанный механизм, систему охлаждения, систему смазки, топливную систему, систему регулирования и управления, систему пуска. В результате такого расчленения главный судовой дизель может быть представлен в виде разработанного автором иерархического графа «дерева отказов»

(рис.2.1). В нем все элементы распределены на семь уровней, восьмой (высший) уровень – это сам дизель. На каждом уровне располагаются элементы, обладающие известной структурной важностью в сценарии нарушения условий работоспособности (1.1). На низшем уровне находятся элементы, отказ которых не зависит от надежности других (на рис.2.1 такие элементы выделены пунктирной рамкой). В разработке вариантов выполнения «дерева отказов» принимал участие С.Р.Семионичев. Другие примеры построения «дерева отказов» для судового дизеля можно найти в работах [47] и [146].

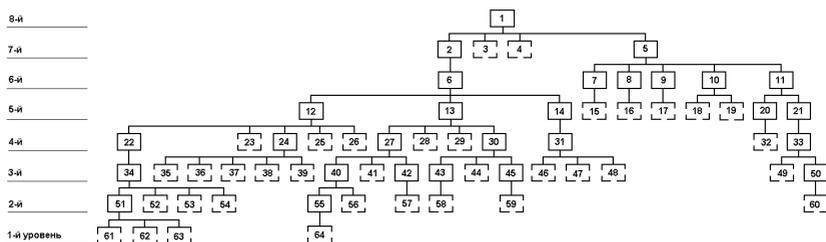


Рис.2.1. Структура «дерева отказов»: 1 – главный судовый дизель; 2,..., 64 – узлы и элементы (детали) дизеля

Связи между элементами разных уровней устанавливаются вероятностными зависимостями на основании логики соподчиненности. В частности, три типа связей описаны в главе 1.

Другой отличительной особенностью формализации двигателя является то, что при построении «дерева отказов» использованы принципы: блочно-модульный, иерархии, адаптации и развития, информационного единства. Блочно-модульный принцип построения основан на том, что «дерево отказов» составлено из отдельных модулей (элементов). Каждый модуль – это деталь или узел, которые выполняют определенные функции, имеют свою входную и выходную информацию. Принцип иерархии отражает соотношение старшинства модулей дерева и их соподчиненность. По принципу адаптации и развития «дерево отказов» предусматривает возможность включения новых модулей, причем потоки информации, как для новых, так и существующих модулей должны быть совместимыми. Использование указанных принципов

позволяет развивать и совершенствовать представленное «дерево отказов» применительно к решению задач прогноза и оценки разных видов риска и сравнивать варианты различных конструктивных выполнений дизеля.

Допустимая величина конкретного вида риска  $R_{\text{доп}}$  (или  $P_{\text{доп}}$ ) для проектируемого дизеля определяется на основании методических рекомендаций изложенных в главе 1. Полученное значение может быть распределено между узлами и элементами проектируемого дизеля для использования при оценке вариантов их конструктивного выполнения, пример расчета приведен в работе [65]. Для выполнения самого прогноза риска необходимо для элементов отмеченных на рис.2.1 пунктирной линией выработать рекомендации по определяющим величинам  $Y$  (или  $Y$  в функции от времени  $t$ ), их граничным значениям  $y$ , методам (или алгоритмам) расчета  $Y$ , и законам и параметры распределения  $Y$ . При этом, для элементов дерева отказов обозначенных на рис.2.1. пунктиром значения  $V$  задаются, для остальных элементов, находящихся на более высоких уровнях, коэффициент вариации  $V_k$  вычисляется через коэффициенты вариации  $V_j$  входящих в него элементов нижестоящего уровня по формуле

$$V_k = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_j^2}.$$

При изучении потери работоспособности обычно рассматривают такие процессы изменения свойств и состояния материала, как усталостное разрушение, пластическое деформирование, механический износ, коррозия, адгезия, фреттинг-коррозия, выкрашивание (питтинг) и т.д. Типовые закономерности протекания процессов старения во времени (скорости старения) в общем случае можно описать одним обобщенным уравнением

$$\chi = \frac{dJ}{dt},$$

где  $J$  – степень поврежденности.

Зная временную характеристику  $\chi(t)$  можно определить степень поврежденности

$$J(t) = \int_0^t \chi(t) dt.$$

На основании величины  $J(t)$  задают, так называемый, назначенный ресурс двигателя. Этот показатель долговечности устанавливается и нормируется согласно разделу 2.6.1 главы 2.6. части VII «Правил классификации и постройки морских судов» РС при проектировании согласованием между заказчиком (судовладельцем) и проектантом с учетом особенностей использования, последствий отказов, принятой системы технического обслуживания и ремонта.

Процессы старения имеют свои закономерности подчиняющиеся случайным процессам. Например, характеристика сопротивления материала до усталости является случайной величиной, ей свойственно большое рассеивание, связанное с металлургическими, технологическими и производственными факторами. Поскольку зарождение и развитие усталостных трещин начинается от дефектов, имеющих различную природу возникновения, то и предел выносливости материала представляет собой статистический ряд. Характеристики этого ряда определяются в результате статистической обработки. Порядок вычисления указанных характеристик подробно рассмотрен автором в работе [147].

Из литературы можно получить данные по характеристикам усталости конкретных материалов. Для примера в табл.2.1 приведены данные для стали 36Х2Н2МФА [148].

Таблица 2.1

**Предел выносливости стали 36Х2Н2МФА в МПа**

Концентратор напряжений	Поверхностное упрочнение								
	Отсутствует			Обкатка роликами			Азотирование		
	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>V</i>
Отсутствует	507	11,7	0,023	546	31,7	0,058	651	28,0	0,043
Острый надрез	238	20,0	0,084	251	17,3	0,063	456	39,0	0,086
Напрессованная втулка	230	9,5	0,041	483	29,0	0,060	581	37,5	0,065

В случае отсутствия точных данных по характеристикам прочности допускается принимать коэффициент вариации из диапазона  $V = 0,04-0,15$ . Значение  $V$  больше 0,2 свидетельствует о недостаточно хорошем уровне изготовления детали.

Статистическая информация о характеристиках распределения отказов позволяет получить их законы распределения. В частности законы распределения определяются по времени наработки до отказа. В этом случае данными для определения закона распределения является наработка до отказа тех деталей, отказ которых представляет наибольшую опасность для эксплуатации двигателя. В частности индексы риска таких деталей, как остов и коленчатый вал оказываются разными у малооборотных и среднеоборотных двигателей. Объясняется это разными значениями коэффициента запаса прочности и жесткости. В то же время отказ указанных деталей представляет наибольшую опасность для эксплуатации двигателя и судна в целом.

Наличие подобных данных позволяет определить законы распределения заданной наработки до отказа деталей двигателя. Для этого на основе данных о наработке до отказа строится гистограмма, показывающая число возникших отказов в данном временном интервале. Порядок построения гистограмм и критерии выбора законов распределения подробно рассмотрены автором в работе [147]. В частности, для деталей, рассмотренных в табл.1.2, гистограммы наработки до отказа до отказа приведены на рис.2.2 и 2.3. Для этих гистограмм с помощью графического способа подобраны законы распределения – наработка до отказа подчиняется логарифмически нормальному распределению. Часто, особенно для деталей испытывающих действие переменных напряжений, наработку до отказа оценивают распределением Вейбулла [27].

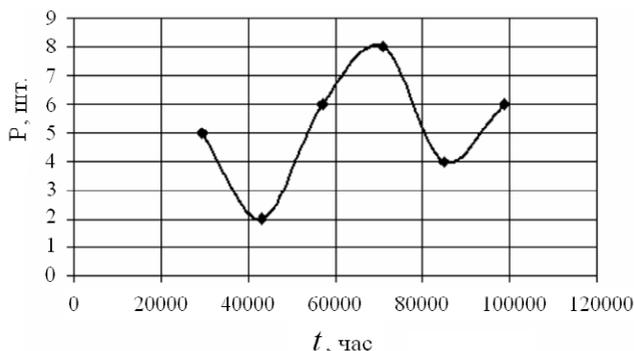


Рис.2.2. Гистограмма долговечности остова

Таким образом, при формировании входной информации для ИМ следует в первую очередь определять характеристики и законы распределения наработки до отказа. Они могут быть получены непосредственно из статистических данных, а в случае их неполноты или отсутствия из анализа физических процессов потери работоспособности. Специфика выявления законов распределения применительно к судовым дизелям достаточно полно отражена, например, в работах Л.Г. Соболева [149]-[151].

Проведенный в [152] анализ известной технической литературы позволил сформулировать рекомендации по выбору статистических законов, приведенные в табл.2.2.

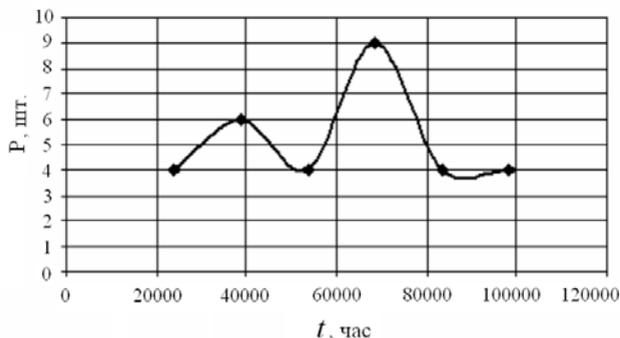


Рис.2.3. Гистограмма долговечности коленчатого вала

Особой проблемой при составлении прогноза для ресурсных

показателей дизелей остается аналитическое описание потери работоспособности их деталей и узлов с увеличением наработки. Существует множество факторов, оказывающих разрушающее воздействие, однако большинство деталей ДВС выходят из строя по причине накопления многоциклового усталости и износа. Эти физические процессы старения деталей в известной мере поддаются расчету. Применительно к решаемой задаче расчетами на усталость должны определять уменьшение прочности при увеличении наработки, а расчетами на износ – увеличение зазоров. Несмотря на то, что указанные процессы старения имеют свои физические закономерности, их объединяет одно общее свойство, а именно уменьшение прочности и увеличение зазоров – случайные процессы. Для учета их стохастической природы также оправдано использовать ИМ. Между тем остается проблема выбора соотношений, с достаточной достоверностью описывающих указанные процессы и удобные для реализации в масштабных статистических испытаниях.

Таблица 2.2

**Статистические законы, используемые при определении сроков службы основных деталей и узлов судовых дизелей**

№	Деталь или узел	Вид повреждения	Статистический закон
1	Цилиндровая втулка	Износ	Нормальный, Вейбулла
		Кавитационные повреждения поверхности охлаждения	Вейбулла
		Трещины опорного бурта	Вейбулла
2	Поршень	Прогар днища	Вейбулла
		Отрыв болта крепления головки	Вейбулла
3	Шатун	Усталостный обрыв шатуна	Вейбулла
4	Палец – поршень (бобышка)	Износ подшипника	Нормальный
5	Палец – головная втулка	Износ подшипника	Нормальный
7	Поршневая канавка – кольцо	Увеличение зазора	Нормальный
8	Поршневое кольцо	Поломка	Экспоненциальный
		Закоксовывание	Экспоненциальный
9	Шатунная шейка коленчатого вала	Износ	Нормальный
		Задир	Экспоненциальный
		Усталостная трещина	Вейбулла
10	Рамовая шейка коленчатого	Износ	Нормальный

	вала	Задир	Экспоненциальный
		Усталостная трещина	Вейбулла
11	Подшипник коленчатого вала	Выплавление	Экспоненциальный
14	Шейка распределительного вала	Износ	Нормальный
		Задир	Экспоненциальный
15	Распределительный вал	Износ кулачков	Нормальный
		Усталостные трещины	Вейбулла
16	Галтели шатунных и рамовых шеек коленчатого вала	Усталостные трещины	Вейбулла
17	Края масляных отверстий коленчатого вала	Усталостные трещины	Вейбулла

## 2.2. Выбор основных соотношений для прогноза ресурсных показателей двигателя

### 2.2.1. Прогнозирование остаточного ресурса деталей по критерию износа

В общем случае зависимость износа детали как случайной функции наработки может быть представлена в виде [70]

$$И(t) = a t^{\beta} + b, \quad (2.1)$$

где  $a$  – случайная величина, зависит от свойств поверхностей деталей сопряжения, условий нагружения, вида смазки и типа трения;  $\beta$  – коэффициент, численно равный: для подшипников скольжения 0,5-0,7, для пары поршень-втулка цилиндра 0,9-1,1;  $b$  – износ по окончании приработки.

В частном случае, например, для износа шеек коленчатого вала судового главного дизеля 8ЧН36/48 уравнение (2.1) принимает вид [27]

$$И(t) = 0,0033t + 0,035.$$

Все параметры уравнения (2.1) связаны вероятностными характеристиками с определяющими их факторами. Учесть все эти факторы удается только с помощью процедуры Монте-Карло,

составляющей основу ИМ. Именно, применительно к ИМ поясним смысл параметров (2.1). Коэффициент вариации для  $a$  находится в пределах  $V_a = 0,1-1,3$ , причем, если  $V_a < 0,4$ , то считают что величина  $a$  подчиняется нормальному закону распределения, при  $V_a \geq 0,4$  – распределению Вейбулла.

В большинстве случаев величина износа деталей за период приработки не превышает величины допуска на их изготовление, при расчётах величиной износа детали в период приработки можно пренебречь. Тогда зависимость износа деталей от времени можно представить в следующем виде

$$И(t) = a t^\beta. \quad (2.2)$$

В соответствии с приведённой формулой для износа зависимость для определения ресурса пары трения запишется в виде

$$t = \left( I_{з.пр} / a \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (2.3)$$

где  $I_{з.пр}$  – предельный зазор сопряжения.

С учётом зависимости (2.3) остаточный ресурс пары трения составит

$$T = t - t_0, \quad (2.4)$$

где  $t_0$  – наработка на момент начала выполнения процедуры прогноза и оценки надёжности и безопасности.

Собственно здесь и происходит переход к вычислению вероятности отказа за некоторый период времени  $t_n$  будущей эксплуатации на основе  $N_{исп}$  статистических испытаний. Согласно изложенному выше в главе 1, если  $t_n < T$ , то считается, что произошел отказ и происходит суммирование неудачных испытаний  $N_{н.и}$ . Потом испытания повторяются и по формуле (1.6) находится  $P_{отк}$  для данной детали. Данный алгоритм реализован в разработанной автором программе определения остаточного ресурса главного судового двигателя (рис.2.4), она подробно описана в работе [65].