

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КЕРЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

кафедра судовых энергетических установок

Богатырева Е.В., Клименко Н.П., Конюков В.Л.

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ
(часть 1)**

Практикум

для курсантов специальности

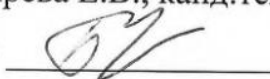
26.05.06 Эксплуатация судовых энергетических установок

очной и заочной форм обучения

Керчь, 2021 г.

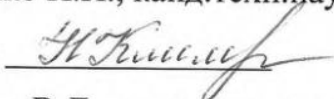
Составители: Богатырева Е.В., канд.техн.наук, доцент кафедры СЭУ

ФГБОУ ВО «КГМТУ»



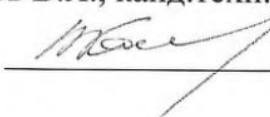
Клименко Н.П., канд.техн.наук, доцент кафедры СЭУ

ФГБОУ ВО «КГМТУ»



Конюков В.Л., канд.техн.наук, доцент кафедры СЭУ

ФГБОУ ВО «КГМТУ»



Рецензент: Горбенко А.Н., канд. техн. наук, доцент кафедры СЭУ

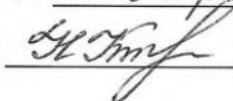
ФГБОУ ВО «КГМТУ»



Практикум рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Судовые энергетические установки» ФГБОУ ВО «КГМТУ»,

протокол № 7 от 17 марта 2021г.

Зав. кафедрой



Клименко Н.П.

Практикум утвержден и рекомендован к публикации на заседании методической комиссии МФ ФГБОУ ВО «КГМТУ»,

протокол № 9 от 21.04. 2021г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Работа № 1 Анализ усталостных разрушений деталей СТС.	9
Работа № 2 Анализ причин отказов и оценка надежности котла	16
Работа № 3 Анализ отказов со степенной и линейной характеристиками процессов старения	24
Работа № 4 Определение нормативных показателей надежности судовой техники	30
Работа № 5 Анализ внезапных отказов.	37
Работа № 6 Анализ надежности машин и механизмов в судовых условиях	45
Список литературы	56
Приложения	57

Введение

Методические указания разработаны в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок», утвержденного приказом Минобрнауки от 24.12.2010 года № 2060 (ред. от 31.05.2011 года), рабочей программой учебной дисциплины «Анализ причин повреждения судовых технических средств».

Целью преподавания дисциплины «Анализ причин повреждения судовых технических средств» является подготовка специалистов судомехаников в соответствии с компетентностными требованиями специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок».

Целью является научить специалиста идентифицировать виды повреждений компонент судовых технических средств. При этом решаются задачи обучения методике установления основной причины отказа на основе собранных фактов.

Задачи:

- изучить физические, математические и статистические основы теории надёжности сложных систем;
- научиться своевременно выявлять повреждения, возникающих в СТС с использованием неразрушающих средств контроля технического состояния;
- устанавливать связи между различными процессами, протекающими в судовых технических средствах;
- выполнять контроль режимов работы судовых технических средств и обслуживающих систем.

Все разделы дисциплины связаны между собой общим системным подходом, обеспечивающим последовательность их изучения. Программа предусматривает освещение Правил морского Регистра судоходства РФ, международных конвенций по охране окружающей среды, положений техники безопасности.

Дисциплина «Анализ причин повреждения судовых технических средств» относится к дисциплинам вариативной части профессионального цикла учебного плана.

Учебное исследование выполняется курсантом в процессе самостоятельной подготовки по индивидуальному заданию. Эта работа предусматривает сбор студентом информации об отказах узлов СТС в эксплуатации, изучение и анализа причин возникновения отказов деталей СТС. Максимальное количество баллов, которое может набрать студент при учебном исследовании, составляет 2,0.

Таким образом, в процессе текущего контроля при изучении дисциплины «Анализ причин повреждения судовых технических средств» курсант может набрать максимальное количество баллов, которое составляет 5,0. Оценка промежуточного контроля выставляется с учетом результатов текущего контроля, которые добавляются к оценке, полученной на экзамене с коэффициентом 0,5, но не более 5,0.

$$O = OЭ + 0,5 OT,$$

где O – итоговая оценка промежуточного контроля, $OЭ$ – оценка, полученная при сдаче экзамена, OT – количество баллов, полученное в процессе текущего контроля.

Зачет принимается в соответствии с компетенциями ВПО и Кодекса ПДМНВ при условии выполнения графика учебного процесса:

- защита всех тем на практических занятиях по анализу причин повреждения судовых технических средств (пропущенные темы защищаются отдельно);
- решение задач на всех практических занятиях (пропущенные задачи защищаются отдельно).

Зачет проводится в виде собеседования в письменной или устной форме, при условии выполнения требований рабочей программы дисциплины. Оценка «зачтено» выставляется в случае, если курсант отвечает правильно более 60% поставленных вопросов. Оценка «отлично» выставляется при условии, если курсант отвечает правильно на 91% и более поставленных вопросов.

Оценка «хорошо» выставляется, если курсант отвечает правильно от 76 % до 90% поставленных вопросов.

Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если курсант отвечает правильно от 60% до 75% поставленных вопросов.

Если преподаватель считает ситуацию сомнительной для выставления удовлетворительной оценки, он вправе задать дополнительные вопросы.

Изучение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций, предусмотренных ФГОС ВО и ПДНВ-78:

Таблица 1 – Формируемые компетенции (ПК):

Код и наименование компетенции*	Индикаторы достижения компетенции	Основание (ПС, анализ опыта)	Планируемые результаты освоения дисциплины	Указание раздела (-ов) дисциплины, где предусмотрено освоение компетенции
1. ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования	ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов	Таблица А-III/2 Кодекса ПДНВ сфера компетентности: Обнаружение и выявление причин неисправной работы механизмов и устранение неисправностей	Знать: - основные виды износов и виды разрушений (З-1.1); - правила технической эксплуатации судовых технических средств (З-1.2); - методы контроля технического состояния различных судовых технических средств (З-1.3); - причины, обуславливающие развитие соответствующих видов разрушений и износов (З-1.4). Уметь: - собирать, классифицировать и обрабатывать данные об изменении технического состояния судовых технических средств (У-1.1); - устанавливать связи между различными процессами, протекающими в судовых технических средствах (У-1.2). Владеть: - идентификацией видов повреждений (В-1.1); - навыками работы со справочной литературой и технической документацией (В-1.2); - умением определять механические и технологические свойства материалов (В-1.3).	Разделы 1-5
	ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования			
2. ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и	ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение	Таблица А-III/2 Кодекса ПДНВ сфера компетентности: Обнаружение и выявление причин	Знать: - основные виды износов и виды разрушений (З-2.1); - правила технической эксплуатации судовых технических средств (З-2.2); - методы контроля	Разделы 1-5

осуществлять мероприятия по их предотвращению	причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем	неисправной работы механизмов и устранение неисправностей	технического состояния различных судовых технических средств (З-2.3); - причины, обуславливающие развитие соответствующих видов разрушений и износов (З-2.4). Уметь: - собирать, классифицировать и обрабатывать данные об изменении технического состояния судовых технических средств (У-2.1); - устанавливать связи между различными процессами, протекающими в судовых технических средствах (У-2.2); - устанавливать причинно-следственные связи между действиями обслуживающего персонала и проявлениями в рабочих процессах технических средств (У-2.3). Владеть: - идентификацией видов повреждений (В-2.1); - навыками работы со справочной литературой и технической документацией (В-2.2); - умением определять механические и технологические свойства материалов (В-2.3); - умением анализировать контроль режимов работы судовых технических средств и обслуживающих систем (В-2.4)	
---	---	---	---	--

Темы практических занятий

№	Наименование темы	Количество часов по формам обучения		Формируемые компетенции
		очная	заочная	
Раздел 1. Виды разрушений и разрушающих воздействий деталей СТС				
1	Анализ усталостных разрушений деталей СТС.	2	-	ПК-62 (3-1.1, У-1.1, В-1.1) ПК-63 (3-2.1, 3-2.2, У-2.1, В-2.1, В-2.2)
Раздел 2. Анализ причин отказов котлов и турбин				
2	Анализ причин отказов и оценка надежности котла.	2	1	ПК-62 (3-1.1, 3-1.2, У-1.1, У-1.2, В-1.1,) ПК-63 (3-2.1, 3-2.2, 3-2.3, 3-2.4, У-2.1, У-2.2, У-2.3; В-2.1, В-2.4)
3	Анализ отказов со степенной и линейной характеристиками процессов старения.	2		
Раздел 3. Анализ отказов элементов двигателей внутреннего сгорания				
4	Определение нормативных показателей надежности судовой техники.	2	1	ПК-62 (3-1.1, 3-1.3, 3-1.4, У-1.1, У-1.2, В-1.1, В-1.2) ПК-63 (3-2.1, 3-2.2, 3-2.3, 3-2.4, У-2.1, У-2.2, У-2.3; В-2.1, В-2.2)
5	Анализ внезапных отказов.	2		
Раздел 4. Анализ отказов и повреждений рулевых машин				
6	Анализ надежности машин и механизмов в судовых условиях.	2	1	ПК-62 (3-1.1, 3-1.2, У-1.1, В-1.1, В-1.2) ПК-63 (3-2.2, 3-2.3, У-2.1, У-2.2, У-2.3; В-2.1, В-2.2)
Раздел 5. Повреждения деталей судовых систем				
7	Определение показателей надежности судовых технических средств.	2	1	ПК-62 (3-1.1, 3-1.2, 3-1.4, У-1.1, У-1.2, В-1.1, В-1.2) ПК-63 (3-2.1, 3-2.2, У-2.1, У-2.2, В-2.1, В-2.2, В-2.4)
8	Определение оптимальной схемы расположения трубопроводов	2		
	Итого по дисциплине	16	4	

Практическое занятие № 1 (2 часа)

Тема: Анализ усталостных разрушений деталей СТС

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: выполнить анализ процесса накопления усталостных повреждений в элементах СТС за время эксплуатации.

Методические материалы:

1. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2017. – 68с.

2. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

Процесс накопления усталостных повреждений в детали за время ее работы t характеризуется величиной меры повреждения

$$D = D_{(1)} \cdot t, \quad (1.1)$$

где $D_{(1)}$ - мера повреждения в единицу времени.

Усталостный отказ наступает при $D=1$.

На рис.1.1 показаны реализации процессов накопления повреждений при работе детали в эксплуатационном режиме испытаний (1) и в режимах ускоренных испытаний (2).

Наработки до отказов составляют соответственно $T_э$ и T_y , что отвечает значениям мер повреждения $D_э=1$ и $D_y=1$.

Будем полагать, что ускоренные испытания проводятся до наступления отказа в течение времени T_y . Из рис.1.1 следует:

- для эксплуатационного режима

$$1 = D_{(1)э} \cdot T_э; \quad (1.2)$$

- для ускоренных испытаний

$$1 = D_{(1)y} \cdot T_y. \quad (1.3)$$

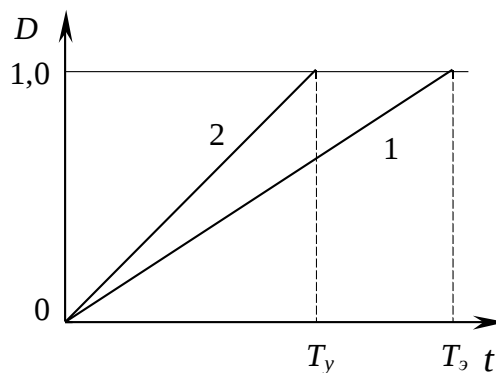


Рисунок 1.1 - К определению коэффициента ускорения при испытании на усталость:
1-эксплуатационные испытания; 2-ускоренные испытания

Взяв отношения соответственно левых и правых частей выражений (2) и (3) и решив полученное уравнение относительно $\frac{T_э}{T_y}$, получим:

$$\frac{T_э}{T_y} = \frac{D_{(1)y}}{D_{(1)э}}.$$

Отношение $\frac{T_э}{T_y}$ определяет коэффициент ускорения K_{y1} , который является также коэффициентом перехода K_{nQ} :

$$\frac{T_э}{T_y} = K_{y1} = K_{nQ}. \quad (1.4)$$

При испытаниях с нагружением спектром, состоящим из k различных амплитуд напряжений, с учетом понятия эквивалентной по числу циклов нагружения до разрушения объекта амплитуды, представим $D_{(1)\varepsilon}$ и $D_{(1)y}$ в следующем виде:

$$D_{(1)\varepsilon} = \frac{\sigma_{a\varepsilon 1}^m \cdot \left[\alpha_{\varepsilon 1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{a\varepsilon i}}{\sigma_{a\varepsilon 1}} \right)^m \cdot \alpha_{\varepsilon i} \right] \cdot \Delta n_{\text{сум}}}{\sigma_{-1}^m \cdot N_0 \cdot T_3} ; \quad (1.5)$$

$$D_{(1)y} = \frac{\sigma_{ay 1}^m \cdot \left[\alpha_{y 1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{ay i}}{\sigma_{ay 1}} \right)^m \cdot \alpha_{y i} \right] \cdot \Delta n_{\text{сум}}}{\sigma_{-1}^m \cdot N_0 \cdot T_3} \quad (1.6)$$

В приведенных выражениях (5) и (6) $\sigma_{a\varepsilon i}$ и $\sigma_{ay i}$ - эквивалентные напряжения соответственно при нагружении детали в эксплуатации и в условиях ускоренных испытаний;

$\alpha_{\varepsilon i}$ и $\alpha_{y i}$ - доли циклов нагружения с амплитудами $\sigma_{a\varepsilon i}$ и $\sigma_{ay i}$ в общем процессе нагружения соответственно в эксплуатации и при ускоренных испытаниях, причем $\sum_{i=1}^k \alpha_{\varepsilon i} = 1$; $\sum_{i=1}^k \alpha_{y i} = 1$;

$\sigma_{a\varepsilon 1}$ и $\sigma_{ay 1}$ - максимальная амплитуда спектра нагружения соответственно в эксплуатации и при ускоренных испытаниях;

$\Delta n_{\text{сум}}$ - суммарное число циклов нагружения за определенное время T_3 ;

σ_{-1} и N_0 - соответственно предел выносливости материала и база испытаний - характеристики усталостных свойств материала;

m - параметр кривой усталости;

T_3 - время записи осциллограммы напряжений.

Теперь, с учетом (5) и (6) коэффициент перехода K_{nQ} (4) может быть представлен в таком виде:

$$K_{nQ} = \left(\frac{\sigma_{ay 1}}{\sigma_{a\varepsilon 1}} \right)^m \cdot \frac{\alpha_{y 1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{ay i}}{\sigma_{ay 1}} \right)^m \cdot \alpha_{y i}}{\alpha_{\varepsilon 1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{a\varepsilon i}}{\sigma_{a\varepsilon 1}} \right)^m \cdot \alpha_{\varepsilon i}} . \quad (1.7)$$

При использовании зависимости (7) следует учитывать действующие амплитуды эксплуатационных напряжений $\sigma_{a\varepsilon i} > 0,6 \cdot \sigma_{-1}$.

Рассмотрим порядок определения коэффициента перехода K_{nQ} в зависимости от режимов испытаний.

Испытания в эквивалентном режиме нагружения. В этом случае

$$\frac{D_{(1)y}}{D_{(1)э}} = 1; \quad K_{nQ} = 1.$$

Одноуровневые испытания с постоянной амплитудой. Такой режим испытаний характеризуется нагружением испытуемого объекта напряжениями, изменяющимися по симметричному циклу с постоянной амплитудой $\sigma_{ay1} = const$.

В этом случае $\alpha_{y1}=1$; $\alpha_{yi}=0$; $i=2;3;4...$

$$K_{nQ} = \left(\frac{\sigma_{ay1}}{\sigma_{aэ1}} \right)^m \cdot \frac{1}{\alpha_{э1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{aэi}}{\sigma_{aэ1}} \right)^m \cdot \alpha_{эi}}. \quad (1.8)$$

При реализации таких режимов ускоренных испытаний возможны два основных случая:

1. Граничные испытания, когда ускорение достигается за счет реализации максимальной амплитуды цикла $\sigma_{aэ1}$

$$\sigma_{ay1} = \sigma_{aэ1}.$$

Тогда коэффициент ускорения K_{nQ} (8) равен:

$$K_{nQ} = \frac{1}{\alpha_{э1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{aэi}}{\sigma_{aэ1}} \right)^m \cdot \alpha_{эi}}.$$

При этом следует ожидать, что усталостное разрушение будет возникать при $\sigma_{ay1} = \sigma_{aэ1} \geq 0,6\sigma_{-1}$. Если же в силу каких-либо причин испытания были приостановлены при наработке t_y , но отказ не возник, то при известном значении коэффициента перехода K_{nQ} , можно получить нижнюю границу эксплуатационного ресурса $T_{эmin}$:

$$T_{эmin} = K_{nQ} \cdot t_y.$$

2. Ужесточенные испытания, когда ускорение достигается за счет увеличения амплитуды напряжений σ_{ay1} :

$$\sigma_{ay1} > \sigma_{aэ1}.$$

Кроме того, амплитуда σ_{ay1} должна быть больше предела выносливости материала σ_{-1} :

$$\sigma_{ay1} = K_\phi \cdot \sigma_{-1},$$

где K_ϕ - число, большее единицы; его называют коэффициентом форсирования (ужесточения) по пределу выносливости σ_{-1} ; при испытаниях назначают обычно

$$1 \leq K_{\phi} \leq 1,6.$$

Коэффициент перехода K_{nQ} в этом случае имеет вид:

$$K_{nQ} = \frac{K_{\phi}^m \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{a\phi 1}} \right)^m}{\alpha_{\phi 1} + \sum_{i=2}^k \left(\frac{\sigma_{a\phi i}}{\sigma_{a\phi 1}} \right)^m \cdot \alpha_{\phi i}}. \quad (1.9)$$

Пример.

Подобрать режимы ускоренных испытаний и рассчитать величину коэффициента ускорения K_y при проведении испытаний на контактную выносливость крестовины кардана.

Сравнить полученное значение K_y с заданным $[K_y]$; при отличии его более, чем на 5%, подобрать режимы испытаний, в первую очередь изменяя режим силового воздействия соответствующим подбором коэффициента K_{nQ} .

Исходные данные: $[K_y]=20$; $K_{\phi}=1,39$; $m=3,33$; $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{a\phi 1}}=1,2$;

$\alpha_{\phi 1}=0,6$; $\alpha_{\phi 2}=0,4$; $\frac{\sigma_{a\phi 2}}{\sigma_{a\phi 1}}=0,8$; $t_{\phi 2}=8$ ч; $t_{y2}=16$ ч; $K_{y3}=1$; $K_{nV}=1$; $K_{y1n}=1$.

Решение.

Значение коэффициента ускорения K_y подсчитывается по зависимости из общих сведений, а входящий в нее коэффициент перехода K_{nQ} - по (9).

Коэффициент перехода K_{nQ} (9) получен за счет реализации силового режима испытаний

$$K_{nQ} = \frac{1,39^{3,33} \cdot 1,2^{3,33}}{0,6 + 0,8^{3,33} \cdot 0,4} = 7,0.$$

Коэффициент ускорения K_{y2} по формуле из общих сведений равен:

$$K_{y2} = \frac{t_{y2}}{t_{\phi 2}} = \frac{16}{8} = 2.$$

С учетом заданных значений коэффициентов $K_{y3}=1$; $K_{nV}=1$ и $K_{y1n}=1$ общий коэффициент ускорения равен:

$$K_y = 7 \cdot 2 \cdot 1 = 14,0.$$

Полученное значение $K_y=14,0$ не соответствует требуемому $[K_y]=20$ и отличается от него на величину $\Delta K = \left| \frac{14-20}{20} \right| \cdot 100\% = 30\%$.

Изменением силового воздействия, приняв $K_{\phi}=1,55$, определим новые значения коэффициентов K'_{nQ} и K'_y :

$$K'_{nQ} = \frac{1,55^{3,33} \cdot 1,2^{3,33}}{0,6 + 0,8^{3,33} \cdot 0,4} = 10,0;$$

$$K'_y = 10 \cdot 2 \cdot 1 = 20.$$

Последнее значение в точности соответствует заданному $[K_y]$:

$$K'_y = [K].$$

Таким образом, требуемое значение коэффициента ускорения $[K_y]=20$ будет обеспечено при следующих значениях исходных данных:

$$K_\phi=1,55; \quad m=3,33; \quad \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{a31}}=1,2; \quad \alpha_{31}=0,6; \quad \alpha_{32}=0,4; \quad \frac{\sigma_{a32}}{\sigma_{a31}}=0,8;$$

$$K_{y2}=2; K_{y3}=1; K_{nV}=1; K_{y1n}=1.$$

Для определения эксплуатационного ресурса время, выраженное в часах, следует умножить на коэффициент перехода $K'_{nQ} = 10,0$.

При самостоятельной работе подобрать режимы круглосуточных ускоренных испытаний, обеспечив (если это необходимо), заданное значение коэффициента $[K_y]$ варьированием данных колонок 5, 10 и 11 табл.1 при $K_{nV}=1; K_{y1n}=1; t_{32}=8$ час.

Таблица 1.1- Исходные данные к задаче на усталость

№ строки	$[K_y]$	m	K_ϕ	α_{31}	α_{32}	$\frac{\sigma_{a32}}{\sigma_{a31}}$	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{a31}}$	t_{y2}	K_{y3}
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	10	3,05	1,10	0,50	0,50	0,90	1,04	24,0	1,0
2	20	3,10	1,15	0,55	0,45	0,85	1,08	22,0	1,1
3	30	3,15	1,20	0,60	0,40	0,80	1,12	20,0	1,2
4	40	3,20	1,25	0,65	0,35	0,75	1,16	18,0	1,3
5	50	3,25	1,30	0,70	0,30	0,70	1,20	16,0	1,4
6	60	3,30	1,35	0,75	0,25	0,75	1,24	16,0	1,5
7	70	3,35	1,40	0,80	0,20	0,80	1,28	14,0	1,6
8	80	3,40	1,45	0,85	0,15	0,85	1,32	12,0	1,7
9	85	3,45	1,50	0,90	0,10	0,90	1,36	10,0	1,8
0	90	3,50	1,55	0,95	0,05	0,95	1,40	8,0	1,9
	$\bar{b}$	$\bar{v}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{b}$	$\bar{v}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{v}$

Исходные данные выбрать построчно из табл.1.1.

Имея в наличии собственные реальные данные о режимах работы конкретной детали, следует воспользоваться приведенной методикой для расчета коэффициента ускорения.

Инструкции по выполнению практического занятия

1. Получить задание для практической работы.
2. Проанализировать полученное задание.
3. Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Перечислите возможные способы обеспечения требуемого уровня надежности элементов в эксплуатации.
2. Какими факторами ограничено значение коэффициента запаса прочности?
3. Какими способами можно повысить усталостную прочность элементов?
4. От чего зависит интенсивность отказов элементов?
5. Что является концентраторами напряжений в деталях СТС?
6. Какие виды протекания коррозионного процесса Вы знаете? Опишите их сущность.
7. Установите характер и дайте пояснение фазам изнашивания деталей в узлах трения СТС.
8. Какие виды эрозии встречаются у деталей СТС?
9. Укажите и дайте пояснения причинам нагарообразования?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Возницкий И.В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. Учебное пособие. 2-е изд., испр. / И.В. Возницкий СПб. : Издательство «Лань», 2006. – 139с.
3. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1997, 14 с.
4. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Практическое занятие № 2 (2 часа)

Тема: Анализ причин отказов и оценка надежности котла

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: выполнить анализ характера повреждений и оценку надежности котла за период эксплуатации.

Методические материалы:

1. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2017. – 68с.

2. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

Сокращение продолжительности эксплуатационных испытаний может быть осуществлено за счет использования методов прогнозирования параметров технического состояния, связанных с износом сопряжений. Простейшая

математическая модель для прогнозирования величины износа детали или сопряжения в установившейся стадии изнашивания имеет вид

$$U = U_0 + a(t - t_0)^\nu; \quad \text{при } t > t_0 \text{ и } U > U_0, \quad (2.1)$$

где U_0 - износ на момент окончания приработки;

t_0 - длительность периода приработки в единицах наработки;

t - наработка детали;

a - случайный параметр, зависящий от интенсивности изнашивания конкретной детали;

ν - показатель степени, зависящий от типа детали или сопряжения.

Анализ многочисленных статистических данных об изнашивании показал, что в большинстве случаев для деталей или сопряжений одного типа можно принимать $\nu \cong \text{const}$, $t_0 \cong \text{const}$ и $U_0 \cong \text{const}$, а рассеивание величины износа у различных образцов при одинаковой наработке определяется, в основном, изменчивостью параметра a .

Если при наработке t_1 проведены измерения износа у n_1 деталей и получена выборка величин износа $U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1n_1}$, а при наработке t_2 измерен износ n_2 деталей и также получена выборка износов $U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2n_2}$, то показатель степени ν с использованием метода наименьших квадратов может быть приближенно определен из выражения

$$\nu = \frac{n \left(\tau_1 \sum_{i=1}^{n_1} y_{1i} + \tau_2 \sum_{i=1}^{n_2} y_{2i} \right) - (\tau_1 n_1 + \tau_2 n_2) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_1} y_{1i} + \sum_{i=1}^{n_2} y_{2i} \right)}{n (\tau_1^2 n_1 + \tau_2^2 n_2) - (\tau_1 n_1 + \tau_2 n_2)^2}, \quad (2.2)$$

где $n = n_1 + n_2$; $\tau_1 = \ln(t_1 - t_0)$; $\tau_2 = \ln(t_2 - t_0)$;

$y_{1i} = \ln(U_{1i} - U_0)$; $y_{2i} = \ln(U_{2i} - U_0)$.

Прирабочные характеристики t_0 и U_0 должны быть при этом известны из предварительной (априорной) информации. Если измерения износов U_{1i} и U_{2i} проводились не строго при наработках t_1 и t_2 , а с некоторым (незначительным) рассеиванием, то в качестве t_1 и t_2 принимают средние значения соответствующих наработок.

Наличие показателя степени ν позволяет производить индивидуальный прогноз ресурса деталей на основе модели (1). Для деталей, износ которых измерен при наработке t_1 , прогнозируемый ресурс определяется по формуле:

$$T_{1i} = t_0 + (t_1 - t_0) \cdot \left(\frac{U_{np} - U_0}{U_{1i} - U_0} \right)^{1/\nu}, \quad i=1, 2, \dots, n_1, \quad (2.3)$$

где U_{np} - предельный износ детали.

Аналогично прогнозируется ресурс деталей, измеренных при наработке t_2 :

$$T_{2i} = t_0 + (t_2 - t_0) \cdot \left(\frac{U_{np} - U_0}{U_{2i} - U_0} \right)^{1/\nu}, \quad i=1,2,\dots,n_2. \quad (2.4)$$

Последовательный контроль гамма-процентного ресурса по результатам сокращенных эксплуатационных испытаний с использованием прогнозирования ресурса осуществляется следующим образом.

При значениях t_1 и t_2 производится первая серия измерений износа у n деталей и по формуле (2) определяется показатель степени ν прогнозирующей модели. С помощью выражений (3) и (4) производится прогноз значений ресурсов T_{1i} и T_{2i} и рассматривается общая выборка измеренных деталей. Затем определяется число k непревышений величиной прогнозируемого ресурса заданного нормативного гамма-процентного ресурса T_γ . Полученное число k сравнивают с уровнями соответствия k_1 и несоответствия k_2 нормативу, которые определяются по формулам [8]:

$$k_1 = A \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + Bn; \quad k_2 = A \ln \frac{1-\beta}{\alpha} + Bn, \quad (2.5)$$

где параметры A и B определяют по формулам. При этом если расчет по формуле (5) дает $k_1 < 1$, то следует принимать $k_1 = 0$. Если $k < k_1$, то контролируемый гамма-процентный ресурс соответствует нормативу. Если $k > k_2$, то по результатам контроля делается вывод о несоответствии нормативу.

В случае, когда $k_1 < k < k_2$, необходимо продолжить контроль, т.е. произвести следующую серию измерений и, увеличив объем данных n , уточнить показатель степени ν . Затем производится прогнозирование значений ресурсов T_{1i} и T_{2i} , оценка соответствующего числа k и сравнение его с уровнями k_1 и k_2 .

По окончании описанной выше процедуры контроля определяют средний прогнозируемый ресурс детали

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (2.6)$$

и среднюю продолжительность сокращенных испытаний

$$T_c = \frac{n_1}{n} \cdot t_1 + \frac{n_2}{n} \cdot t_2. \quad (2.7)$$

Обычно, если износы в выборке составляют в среднем 40÷50% от предельного, то при использовании прогнозирования ресурса по измерению износа

удается сократить продолжительность испытаний в большей степени, чем при цензурировании по наработке.

Пример.

По результатам эксплуатационных испытаний с измерением износа места посадок уплотнений на вал насоса требуется проконтролировать соответствие 80%-го ресурса нормативному значению $T_{80}=5500$ ч.

Заданы величины периода приработки $t_0=200$ ч, соответствующего износа $U_0=0,1$ мм, и предельный износ $U_{np}=0,4$ мм. Величины рисков ошибочных решений $\alpha=\beta=0,1$ и допустимый нижний уровень вероятности отказа $q_0=0,05$.

Измерения износа производились при значениях наработки $t_1=1500$ ч и $t_2=4500$ ч. Результаты первой серии измерений износа U_{1i} и U_{2i} ($n_1=6$ и $n_2=3$) приведены в табл.1. Там же приводятся и результаты расчета вспомогательных величин y_{1i} и y_{2i} (см. формулу (2)).

Решение.

Рассчитываются величины

$$\tau_1 = \ln(1500 - 200) = 7,17; \tau_2 = \ln(4500 - 200) = 8,366.$$

С помощью формулы (2) по данным табл.1 по первой серии испытаний оценивается показатель степени ν :

$$\nu_1 = \frac{9[7,17(-20,177) + 8,366(-6,129)] - (7,17 \cdot 6 + 8,366 \cdot 3) \cdot (-26,306)}{9(7,17^2 \cdot 6 + 8,366^2 \cdot 3) - (7,17 \cdot 6 + 8,366 \cdot 3)^2} = 1,1.$$

По формулам (3) и (4) рассчитываются значения прогнозируемого ресурса:

$$T_{11} = 200 + (1500 - 200) \cdot \left(\frac{0,4 - 0,1}{0,12 - 0,1} \right)^{1/1,1} = 15441 \text{ч},$$

$$T_{21} = 200 + (4500 - 200) \cdot \left(\frac{0,4 - 0,1}{0,21 - 0,1} \right)^{1/1,1} = 10904 \text{ч, и т.д.}$$

Результаты прогноза ресурса приведены в табл.1.

Составляем вариационный ряд значений прогнозируемого ресурса по первой серии испытаний: 4084, 4523, 5900, 8317, 10742, 10904, 13046, 15441, 28818; из которого следует, что при $n=9$ число непревышений нормативного 80%-го ресурса $T_{80}=5500$ ч составляет $k=2$.

По формулам при $\gamma=80\%$ рассчитываем параметры

$$A = \frac{1}{\ln \frac{1-0,8}{0,05} + \ln \frac{1-0,05}{0,8}} = 0,642;$$

$$B = \frac{\ln \frac{1-0,05}{0,8}}{\ln \frac{1-0,8}{0,05} + \ln \frac{1-0,05}{0,8}} = 0,11;$$

и составляем уравнения (5) для уровней соответствия k_1 и несоответствия k_2 нормативу:

$$k_1 = 0,642 \ln \frac{0,1}{1-0,1} + 0,11n = -1,41 + 0,11n;$$

$$k_2 = 0,642 \ln \frac{1-0,1}{0,1} + 0,11n = 1,41 + 0,11n.$$

Таблица 2.1 - Результаты расчетов к примеру

К-во серий	n_1	U_{1i} , мм	y_{1i}	T_{1i} , Ч	n_2	U_{2i} , мм	y_{2i}	T_{2i} , Ч
1	6	0,12	-3,912	15441	3	0,21	-2,207	10904
		0,11	-4,605	28818		0,32	-1,514	5900
		0,14	-3,219	8317		0,19	-2,408	13046
		0,18	-2,526	4523				
		0,13	-3,507	10742				
		0,19	-2,408	4084				
		$\Sigma = -20,177$				$\Sigma = -6,129$		
2	10	0,12	-3,219	19700	5	0,21	-2,207	11927
		0,11	-4,605	39200		0,32	-1,514	6064
		0,14	-3,219	9950		0,19	-2,408	14533
		0,18	-2,526	5075		0,30	-1,609	6650
		0,13	-3,507	13200		0,25	-1,897	8800
		0,19	-2,408	4533				
		0,15	-2,996	8000				
		0,21	-2,207	3745				
		0,19	-2,408	4533				
		0,14	-3,219	9950				
		$\Sigma = -31,007$				$\Sigma = -9,635$		

При $n=9$ имеем $k_1 = 0$ и $k_2 = 2,4$.

Следовательно, $0 < k < 2,4$ и необходимо продолжить контроль, проведя следующую серию измерений. Данные о результатах измерений и расчетов после двух серий при $n=15$ приведены в табл.1.

Рассчитываем показатель степени ν после двух серий:

$$\nu_2 = \frac{15[7,17(-31,007) + 8,366(-9,635)] - (7,17 \cdot 10 + 8,366 \cdot 5) \cdot (-40,642)}{15(7,17^2 \cdot 10 + 8,366^2 \cdot 5) - (7,17 \cdot 10 + 8,366 \cdot 5)^2} = 1.$$

Результаты прогноза ресурса T_{1i} и T_{2i} после двух серий измерений приведены в табл.1. Из этих данных следует, что при $n=15$ число непревышений нормативного уровня $k=4$.

При $n=15$ уровни $k_1=0$ и $k_2=3,06$.

Так как $k > k_2$, то следует сделать вывод о несоответствии 80%-го ресурса вала нормативному значению $T_{80}=5500$ ч. По данным табл.2.1 рассчитываем по формуле (6) средний прогнозируемый ресурс

$$T = \frac{1}{15} \cdot 165855 = 11057 \text{ч}.$$

Как видно из полученных результатов, при среднем ресурсе более 11тыс. часов, ввиду значительного рассеивания ресурса, 80% - ый ресурс вала не соответствует нормативной величине 5,5 тыс. часов.

По формуле (7) рассчитываем среднюю продолжительность испытаний

$$T_c = \frac{10}{15} \cdot 1500 + \frac{5}{15} \cdot 4500 = 2500 \text{ч}.$$

Коэффициент сокращения испытаний составляет

$$K_c = \frac{2500}{11057} = 0,226,$$

т.е. по сравнению с полными продолжительность испытаний сокращена более, чем в 4 раза.

При выполнении самостоятельной работы следует по результатам износа проконтролировать соответствие гамма-процентного ресурса нормативному значению. Исходные данные следует выбрать из таблиц 2 и 3. В таблице 3 значения износа над чертой соответствуют наработке t_1 , а под чертой - наработке t_2 . Износы в первой серии испытаний выбрать из строки, а износы во второй серии выбрать из столбца табл.3. Для изнашиваемых деталей машин, величину ресурса T_γ (столбец 3 табл.2) следует брать на два порядка меньше.

Таблица 2.2 - Исходные данные к решению задачи

№ строки	$\gamma, \%$	$T, \text{ч}$	$U_o, \text{мм}$	$t_o, \text{ч}$	$t_1, \text{ч}$	$t_2, \text{ч}$	q_o	$U_{np}, \text{мм}$
1	80	5000	0,05	200	1000	3500	0,05	0,6
2	90	5500	0,08	250	1500	4000	0,02	0,5
3	80	6000	0,1	300	2000	4500	0,10	0,4
4	90	5000	0,05	200	1000	3500	0,02	0,6
5	80	5500	0,08	250	1500	4000	0,05	0,5
6	90	6000	0,1	300	2000	4500	0,03	0,4
7	80	5000	0,05	200	1000	3500	0,10	0,6
8	90	5500	0,08	250	1500	4000	0,03	0,5
9	80	6000	0,1	300	2000	4500	0,05	0,4
0	90	5000	0,08	200	1000	3500	0,02	0,6
	<i>в</i>	<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>а</i>

Таблица 2.3 Исходные данные к задаче по контролю показателей при прогнозировании параметра отказа

№ стлб / № стр		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>a</i>	1	<u>0,20</u> 0,27	<u>0,11</u> 0,30	<u>0,14</u> 0,29	<u>0,17</u> 0,18	<u>0,15</u> 0,33	<u>0,16</u> 0,28	<u>0,19</u> 0,31	<u>0,13</u> 0,19	<u>0,15</u> 0,30	<u>0,12</u> 0,39
	2	<u>0,18</u> 0,25	<u>0,16</u> 0,21	<u>0,22</u> 0,24	<u>0,14</u> 0,38	<u>0,20</u> 0,24	<u>0,15</u> 0,31	<u>0,11</u> 0,18	<u>0,14</u> 0,33	<u>0,13</u> 0,29	<u>0,21</u> 0,25
	3	<u>0,11</u> 0,20	<u>0,14</u> 0,18	<u>0,24</u> 0,33	<u>0,12</u> 0,34	<u>0,16</u> 0,31	<u>0,13</u> 0,19	<u>0,17</u> 0,29	<u>0,21</u> 0,28	<u>0,29</u> 0,22	<u>0,11</u> 0,36
	4	<u>0,24</u> 0,39	<u>0,25</u> 0,19	<u>0,13</u> 0,25	<u>0,11</u> 0,30	<u>0,14</u> 0,28	<u>0,12</u> 0,38	<u>0,21</u> 0,22	<u>0,24</u> 0,32	<u>0,22</u> 0,31	<u>0,13</u> 0,27
	5	<u>0,12</u> 0,19	<u>0,11</u> 0,34	<u>0,21</u> 0,26	<u>0,13</u> 0,39	<u>0,25</u> 0,18	<u>0,18</u> 0,27	<u>0,19</u> 0,35	<u>0,15</u> 0,18	<u>0,14</u> 0,20	<u>0,22</u> 0,19
	6	<u>0,13</u> 0,31	<u>0,19</u> 0,32	<u>0,17</u> 0,28	<u>0,21</u> 0,25	<u>0,13</u> 0,26	<u>0,22</u> 0,25	<u>0,20</u> 0,34	<u>0,18</u> 0,23	<u>0,16</u> 0,39	<u>0,17</u> 0,30
	7	<u>0,11</u> 0,33	<u>0,13</u> 0,19	<u>0,15</u> 0,28	<u>0,23</u> 0,30	<u>0,16</u> 0,29	<u>0,20</u> 0,29	<u>0,24</u> 0,27	<u>0,11</u> 0,38	<u>0,15</u> 0,35	<u>0,16</u> 0,18
	8	<u>0,19</u> 0,37	<u>0,22</u> 0,18	<u>0,12</u> 0,36	<u>0,15</u> 0,39	<u>0,22</u> 0,33	<u>0,23</u> 0,25	<u>0,18</u> 0,28	<u>0,16</u> 0,20	<u>0,13</u> 0,24	<u>0,14</u> 0,26
	9	<u>0,15</u> 0,32	<u>0,24</u> 0,27	<u>0,19</u> 0,35	<u>0,22</u> 0,34	<u>0,11</u> 0,20	<u>0,17</u> 0,22	<u>0,13</u> 0,31	<u>0,12</u> 0,33	<u>0,11</u> 0,28	<u>0,18</u> 0,36
	0	<u>0,18</u> 0,29	<u>0,21</u> 0,27	<u>0,16</u> 0,25	<u>0,11</u> 0,30	<u>0,14</u> 0,31	<u>0,19</u> 0,27	<u>0,12</u> 0,37	<u>0,13</u> 0,29	<u>0,17</u> 0,37	<u>0,15</u> 0,20
<i>б</i>											

Инструкции по выполнению практического занятия

- 1 Получить задание для практической работы.
- 2 Проанализировать полученное задание.
- 3 Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля:

1. По каким основным причинам пусковые температурные процессы могут приводить к аварийным состояниям турбины?
2. Укажите основные виды повреждений корпуса паровой турбины?
3. Что относится к типичным повреждениям валов паровой турбины?
4. Какие повреждения газовых турбин возникают в эксплуатации?
5. Основные причины обрыва лопаток компрессора?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Возницкий И.В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. Учебное пособие. 2-е изд., испр. / И.В. Возницкий СПб. : Издательство «Лань», 2006. – 139с.
3. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1997, 14 с.
4. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Практическое занятие № 3 (2 часа)

Тема: Анализ отказов со степенной и линейной характеристиками процессов старения

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: изучить математические модели долговечности элементов, которые описывают зависимость надежности элемента от конструктивных, технологических и ресурсных параметров.

Методические материалы:

1. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – Керчь, 2017. – 68с.

2. Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

При некачественном изготовлении элементов машин обеспечением их надежности в дальнейшем занимается эксплуатирующая организация: требуется более продолжительная и непроизводительная обкатка на облегченных режимах,

необходимо более частое проведение регламентных работ и других работ по техническому обслуживанию. Все это приводит к неэффективному расходованию средств, увеличивает затраты на поддержание техники в работоспособном состоянии. Зачастую такого положения можно избежать, если ввести жесткий контроль надежности на производстве.

Исследование долговечности деталей взаимосвязано с оценками их предельного состояния, поскольку долговечность – это свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния.

Достижение установленного (8,0-10,0 тыс.ч.) доремонтного ресурса агрегатов возможно на основе нормирования ресурсов деталей (10,0-15,0 тыс.ч.). Применительно к изнашиваемым деталям это приводит к необходимости нормирования их износостойкости, которое позволит:

1 - уточнить требования к материалам, термообработке и различным методам упрочнения поверхностей;

2 – при накоплении опыта, информации, использовать нормативы в качестве одного из критериев при выборе удельных нагрузок на изнашиваемые поверхности;

3 – в ряде случаев оценить износостойкость деталей на сравнительно ранних стадиях ресурсных испытаний опытных образцов новых изделий.

Большая часть математических моделей по определению и прогнозированию надёжности основывается на зависимости ресурса от изменения конструктивных размеров (износа поверхностей деталей, изменения зазоров в соединениях), где главным параметром для оценки надежности выступает интенсивность изнашивания I , и описывается зависимостью

$$I = k \frac{p^m}{H^l} \quad (3.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности; p – давление в контакте;

m – показатель степени, зависящий от условий работы;

H – твердость изнашиваемого материала;

l – показатель степени, зависящий от свойств материала.

Интенсивность изнашивания есть функция материалов, смазки, давления, скорости и других факторов. Формула предполагает сохранения вида трения и отсутствие существенного влияния температуры на интенсивность изнашивания. Данная зависимость не позволяет выполнить прогноз долговечности на стадии проектирования, и не учитывает многие конструктивные особенности деталей.

Способы оценки и контроля надежности, как правило, предусматривают проведение ресурсных испытаний. Испытания агрегатов машин и даже отдельных деталей – дорогостоящий и трудоемкий процесс. Рациональным подходом к вопросам управления и контроля надежности машин является переход от контроля методом испытаний к контролю параметров изделия, который обычно существенно менее трудоемок, не повреждает контролируемый объект и может проводиться в значительно более широких масштабах, чем испытания. Этот переход можно осуществить при наличии математической

модели долговечности, в которую входят технологические факторы, что позволяет методом статистического моделирования оценивать эффективность мероприятий по контролю и управлению надежностью.

В карданную передачу входят карданный вал переднего моста и карданы заднего моста. Кардан заднего моста состоит из двух двойных вилок и промежуточной опоры. В конструкции карданной передачи предусмотрено шлицевое телескопическое соединение, обеспечивающее необходимые изменения рабочей длины вала. Для защиты шлицевых соединений от попадания грязи применен резиновый чехол.

Шарниры всех карданных валов имеют одинаковую конструкцию. Имея большую универсальность и компактность, карданная передача вместе с тем является узлом, долговечность которого в выполненных конструкциях еще недостаточна. Основные дефекты карданных передач: недостаточная долговечность игольчатых подшипников (износ и искажение формы игл и шипа крестовины - бринеллирование), шлицевых соединений телескопического соединения.

Карданные передачи требуют тщательного ухода, который состоит в периодической проверке износа игольчатых подшипников (он легко различается по стукам высокого тона в момент трогания трактора с места), в регулярной смазке шарниров специальным составом через каждые 480 м-часов, проверке осевого люфта в конических подшипниках (он должен быть 0,2-0,35 мм), в проверке состояния крепления соединительных фланцев, крышек шарниров.

При изготовлении карданные валы должны подвергаться динамической балансировке. Допустимый дисбаланс не должен превышать 10 Н-мм. Для балансировки к валу привариваются балансировочные пластины. Биение карданного вала в сборе не должно превышать 0,5 - 0,8 мм.

Основные направления в развитии конструкции карданных передач обусловлены стремлением удовлетворить возросшие требования к их долговечности при одновременном уменьшении времени обслуживания.

Большое внимание уделяется разработке конструкций с одноразовой смазкой, с сальниками повышенной работоспособности, созданию новых видов смазок (например, с дисульфитом молибдена). Ведутся работы по созданию демпфирующих элементов, предназначенных для уменьшения крутильных колебаний, вызывающих клинические нагрузки, в ряде случаев превышающие полезную нагрузку. Совершенствуются конструкции карданных шарниров в направлении создания передач равных угловых скоростей и в направлении уменьшения углов между валами (до нуля). Перспективным является также создание конструкций шарниров с передачей крутящего через шарики, расположенные в канавках ведущей и ведомой вилок.

В карданной передаче рассчитываются карданный вал (на кручение, растяжение-сжатие, угол закручивания), вилка и крестовина (на прочность и износ), подшипники карданного шарнира (на долговечность, тепловой режим), критическую частоту вращения вала.

Для игольчатых подшипников сила P (Н), действующая на шип, должна удовлетворять условию

$$P \leq [P_d] = 780 \frac{i_p \cdot d_p \cdot l_p}{\sqrt[3]{n_k \cdot \operatorname{tg} \gamma}}, \quad (3.2)$$

где $[P_d]$ —допустимая сила на шип; i_p — число игловок; d_p и l_p —диаметр и рабочая длина иглы, мм; n_k — частота вращения карданного вала, мин⁻¹.

Максимальные статические напряжения кручения карданного вала не должны превышать 200 Н/мм².

Ниже изложена методика и результаты исследований по параметрическому управлению и контролю надежности карданных шарниров.

Для определения степени влияния шероховатости и твердости рабочих поверхностей крестовин на долговечность карданного шарнира были проведены стендовые испытания кардана. Угол излома 16°, частота вращения 1500 об/мин, при испытаниях были постоянны.

Результаты проведенных испытаний позволили на основании принципов построения математических моделей долговечности объектов получить следующую расчетную формулу

$$T = \psi \frac{H^{3,22}}{R_a^{0,34} \cdot \Delta^{0,5} \cdot M^{3,165}}, \quad (3.3)$$

где T — долговечность шарнира (час);
 M — крутящий момент (Н·м.);
 H — твердость шипа крестовины (ед. HRC);
 Δ — зазор в подшипниковом узле (мкм);
 R_a — шероховатость рабочей поверхности шипа (мкм);
 ψ - эквивалентный параметр режима эксплуатации.

Пользуясь приведенной моделью долговечности карданного шарнира возможна оценка влияния на распределение ресурса не только изменения номинальных величин технологических параметров, но и их статистических характеристик. С этой целью была составлена программа, которая позволяет определять параметры закона Вейбулла-Гнеденко для распределения ресурса карданного шарнира при известных параметрах законов распределений твердости, шероховатости, зазора и крутящего момента.

Результаты вычислений показывают, что значительного повышения ресурса карданных шарниров можно добиться при обеспечении жесткости контроля качества изготовления изделий. Так, например, при тех же условиях производства ($T = 62,5$; $\sigma_T = 1,1$; $R_a = 0,3$; $\sigma_R = 0,09$; $\Delta = 75$, $\sigma_\Delta = 18$), применяя браковку крестовин с твердостью менее 60 ед. HRC, шероховатостью рабочих поверхностей более 32 мкм и зазорами в подшипниках более 90 мкм можно повысить модальное значение ресурса шарнира в 1,8 раза (рис. 3.1).

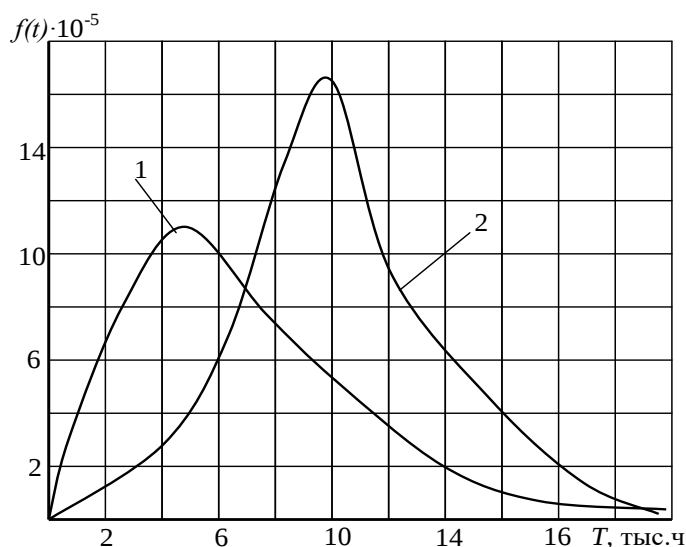


Рисунок 3.1 - Плотность вероятности безотказной работы карданного шарнира

1 – при обычных условиях контроля, 2 – при ужесточенном контроле.

Такой эффект достигается при сплошном контроле параметров. Поскольку сплошной контроль требует больших затрат средств и времени, целесообразно разработать более экономичную методику выборочного контроля долговечности карданных шарниров в производстве по параметрам качества изготовления с привлечением математической модели.

Влияние ресурсных параметров на средний ресурс хорошо описывается зависимостью:

$$T = \lambda \cdot G^{\alpha} \cdot M^{\kappa} \cdot H^{\varphi} \cdot n^{\mu}, \quad (3.4)$$

где λ – масштабирующий коэффициент; G – масса детали, кг; M – крутящий момент, нагружающий деталь, Нм; H – твердость рабочих поверхностей по HRC; n – частота вращения детали, об/мин; $\alpha, \kappa, \varphi, \mu$, – показатели степени, характеризующие влияние каждого фактора на величину среднего ресурса.

Приведенная математическая модель надежности построена на обобщенном опыте других исследователей и собственных результатах, результатах массовой эксплуатации аналогичных конструкций и содержит связь показателей надежности с конструктивными, производственными и эксплуатационными факторами. Варьируя значения факторов и накладывая на них определенные ограничения, можно значительно проще, быстрее и более обоснованно найти оптимальное решение по достижению необходимой долговечности.

Регрессионная модель для среднего ресурса лимитирующих деталей первой группы ($HRC\ 56 < H \leq 63$):

$$T = 1,64 \cdot 10^3 \cdot G_I^{-0,8} \cdot M_I^{-1,38} \cdot H_I^{3,65} \cdot n_I^{-0,96}. \quad (3.5)$$

Регрессионная модель для среднего ресурса лимитирующих деталей второй группы ($HRC\ 18 \leq H \leq 40$):

$$T = 2,34 \cdot 10^6 \cdot G_{II}^{0,8} \cdot M_{II}^{-1,38} \cdot H_{II}^{2,48} \cdot n_{II}^{-0,96} \quad (3.6)$$

Регрессионную модель долговечности зубчатых колес:

$$T = 17,8 \cdot 10^3 \cdot G_{III}^{0,3} \cdot M_{III}^{-1,2} \cdot H_{III}^{3,25} \cdot n_{III}^{-1}. \quad (3.7)$$

Инструкции по выполнению практического занятия

- 1 Получить задание для практической работы.
- 2 Проанализировать полученное задание.
- 3 Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие основные факторы влияют на долговечность элементов?
2. В чем недостаток повышения ресурса изделия за счет увеличения его массы?
3. От каких факторов зависит износостойкость элемента?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Возницкий И.В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. Учебное пособие. 2-е изд., испр. / И.В. Возницкий СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 139с.
3. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1997, 14 с.
4. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Практическое занятие № 4 (2 часа)

Тема: Определение нормативных показателей надежности судовой техники

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: на основании статистической информации об отказах элементов СТС определить показатели надежности узлов и агрегатов.

Методические материалы:

1.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. И заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – Керчь, 2017. – 68с.

2.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

Объект, для которого проведение ремонтов не предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации, называется неремонтируемым. Показатель надежности - количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния

объекта.

Для неремонтируемых объектов находят применение следующие показатели надежности:

- * средняя наработка до отказа T ;
- * вероятность безотказной работы $R(t)$;
- * гамма-процентный ресурс t_γ .

Для определения показателей надежности необходим статистический материал об отказах в эксплуатации рассматриваемого класса объектов.

Известно, что закон распределения ресурса t (наработки неремонтируемых объектов до отказа) хорошо описывается универсальным двухпараметрическим законом Вейбулла-Гнеденко, для которого плотность распределения определяется выражением

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (4.1)$$

а функция распределения имеет вид

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (4.2)$$

где a и b - параметры закона.

Неизвестные параметры a и b могут быть определены аналитически или графически при помощи вероятностной бумаги.

Параметры a и b связаны со средней наработкой до отказа T , средним квадратическим отклонением σ и коэффициентом вариации v зависимостями:

$$T = a \cdot \Gamma(1 + 1/b); \quad (4.3)$$

$$\sigma = a \cdot \sqrt{\Gamma(1 + 2/b) - \Gamma^2(1 + 1/b)}; \quad (4.4)$$

$$v = \frac{\sigma}{T}. \quad (4.5)$$

В формулах (4.3) и (4.4) $\Gamma(x)$ - гамма-функция, определяемая по таблицам (прил.1). В таблицах $\Gamma(x)$ дана для значений аргумента $1 \leq x \leq 2$; если $x > 2$, $\Gamma(x) = (x-1) \cdot \Gamma(x-1)$; для $x < 1$ $\Gamma(x) = \frac{\Gamma(x+1)}{x}$.

Вероятность безотказной работы $R(t)$ в интервале от 0 до t

$$R(t) = 1 - F(t), \quad (4.6)$$

где $F(t)$ - функция распределения ресурса, определяемая в случае закона Вейбулла-Гнеденко соотношением (4.2).

Гамма-процентный ресурс t_γ находят графическим решением трансцендентного уравнения

$$R(t_\gamma) = 0,01\gamma, \quad (4.7)$$

где γ - заданная вероятность (в %).

Доверительные границы для средней наработки до отказа T и вероятности безотказной работы $R(t)$ вычисляют из соотношений:

$$T_{\max}^{\min} = T \pm t_{\beta} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad (4.8)$$

$$R_{\max}^{\min}(t) = R(t) \pm t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{R(t) \cdot [1 - R(t)]}{N}}, \quad (4.9)$$

где t_{β} - квантиль нормального распределения, отвечающая вероятности $\alpha = \frac{1+\beta}{2}$, т.е.

$$t_{\beta} = U_{\alpha} = U_{\frac{1+\beta}{2}},$$

β - доверительная вероятность;

N - объем выборки;

U_{α} - квантиль, значение которой определяют по таблице (прил.3).

Доверительные границы для гамма-процентного ресурса определяют графически после построения графика $R(t)$ с доверительными границами.

Последовательность решения задачи. При полных испытаниях все объекты доводятся до отказа, и результатом испытаний является выборка наработок до отказа - t_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Для нахождения аппроксимирующего закона распределения наработки до отказа необходимо знание эмпирической функции распределения F^* . С этой целью весь диапазон значений случайной величины t_i разбивают на K интервалов одинаковой длины h . Число интервалов выбирают в зависимости от объема выборки N . Рекомендуемое число интервалов $K \cong 5 \lg N$, округленное до целого значения.

Далее определяют размах выборки R и длину интервала h :

$$R = t_{\max} - t_{\min}; \quad (4.10)$$

$$h = \frac{R}{K}.$$

Полученное значение h округляют до большего целого, а затем вычисляют левые t_i' и правые t_i'' границы каждого из K интервалов по формулам:

$$\begin{aligned} t_1' &= t_{\min}; & t_1'' &= t_1' + h; \\ t_2' &= t_1''; & t_2'' &= t_2' + h; \\ t_3' &= t_2''; & t_3'' &= t_3' + h, \end{aligned} \quad (4.11)$$

и т.д., и подсчитывают количество отказов n_i , наработки до которых попали в каждый интервал.

Проверкой правильности определения границ интервалов является попадание внутрь последнего интервала максимальной наработки $t_{\max}$. Суммарное количество попаданий должно равняться объему выборки:

$$\sum_{i=1}^k n_i = N. \quad (4.12)$$

Далее определяют значение относительной частоты (частости) W_i попадания наработок в i -й интервал:

$$W_i = \frac{n_i}{N}, \quad (4.13)$$

а затем эмпирическую функцию распределения F_i^* :

$$F_i^* = W_1 + W_2 + \dots + W_i, \quad (4.14)$$

при этом в конце последнего k -го интервала $F_k^* = 1$.

При графическом вписывании теоретического закона Вейбулла-Гнеденко и определении его параметров a и b на специальной вероятностной бумаге по оси абсцисс откладывают значения правых границ интервала t_i'' , а по оси ординат - соответствующие данному интервалу значения эмпирической функции распределения F_i^* , в результате получают K точек, через которые проводят прямую таким образом, чтобы она проходила по возможности ближе ко всем точкам. Построенная прямая является графиком теоретического распределения $F(t)$. Соответствие теоретического закона распределения эмпирическому распределению проверяют по критерию А.Н. Колмогорова. Для этого в каждом интервале подсчитывают модуль разности между значениями эмпирической и теоретической функций распределения, выбирают из них максимальный

$$D_{\max} = \max |F_i - F_i^*| \quad (4.15)$$

и определяют величину критерия

$$\lambda = D_{\max} \cdot \sqrt{N}. \quad (4.16)$$

Если $\lambda < 1,0$, то принятый теоретический закон Вейбулла-Гнеденко не противоречит эмпирическому. Искомые параметры a и b теоретического закона определяют (рис. 4.1) следующим образом: a - непосредственно из графика;

$$b = 1,3 \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ - угол наклона прямой к оси абсцисс.

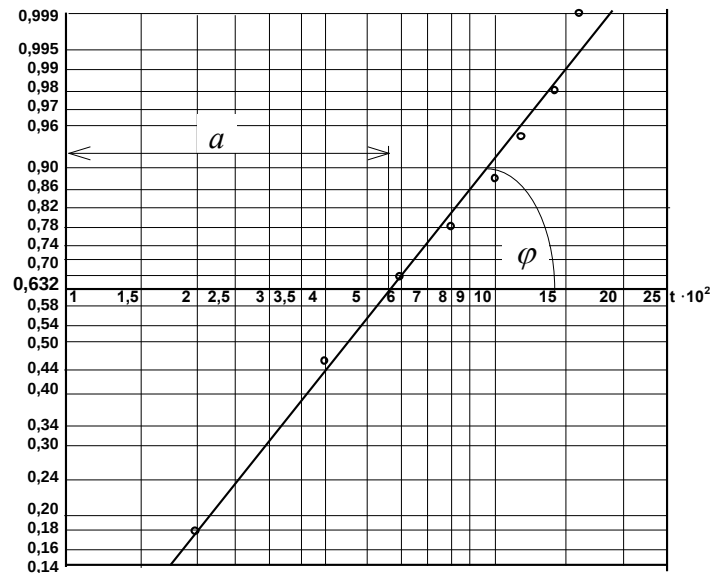


Рисунок 4.1. - Вероятностная бумага для закона распределения Вейбулла-Гнеденко и графическое определение параметров a и b .

После определения средней наработки до отказа T и значений вероятности $R(t)$ по формулам (4.3) и (4.6) соответственно, производят расчет этих же величин с

доверительными границами, используя зависимости (4.8) и (4.9), и строят график $R(t)$. Гамма-процентный ресурс t_γ находят графически.

Пример.

По результатам полных испытаний до отказа 50 деталей построить график вероятности безотказной работы $R(t)$, найти средний T и 80%-й ресурсы с доверительными границами ($\beta=90\%$ и $t_\beta=1,645$) при исходных данных, соответствующих наработкам до отказов: 350; 570; 490; 1080; 250; 1540; 340; 550; 930; 370; 350; 110; 510; 180; 1190; 290; 610; 380; 530; 120; 1150; 830; 930; 370; 510; 150; 660; 190; 420; 1350; 310; 880; 10; 270; 640; 790; 1360; 150; 540; 500; 190; 320; 300; 260; 540; 180; 980; 580; 740; 260.

Из приведенного ряда значений находим минимальное $t_{\min}=10$ ч и максимальное $t_{\max}=1540$ ч. Размах выборки

$$R = t_{\max} - t_{\min} = 1540 - 10 = 1530.$$

Принимаем число интервалов $K=8$. Длина интервала $h = \frac{R}{K} = \frac{1530}{8} = 192,5$ ч., принимаем $h=200$ ч. Результаты дальнейших вычислений приведены в табл.1.2, по материалам которой построен график (рис.1.1) и рассчитаны:

параметры закона распределения Вейбулла-Гнеденко

$$a=580 \text{ ч; } b=1,3 \cdot \quad \text{tg } \varphi = 1,3 \cdot 1,27 = 1,65;$$

$$\text{средний ресурс } T = 580 \cdot \Gamma(1+1/1,65) = 519 \text{ ч;}$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = 580 \cdot \sqrt{\Gamma(1+2/1,65) - \Gamma^2(1+1/1,65)} = 322 \text{ ч;}$$

$$\text{коэффициент вариации } \nu = \frac{\sigma}{T} = \frac{322}{519} = 0,62;$$

средний ресурс с доверительными границами при $\beta=0,9$; $t_\beta=1,645$;

$$T_{\max} = 519 \pm \frac{1,645 \cdot 322}{\sqrt{50}} = 519 \pm 75 \text{ ч; } T_{\max}=594 \text{ ч; } T_{\min}=444 \text{ ч;}$$

80%-ый ресурс с доверительными границами (по графику)

$$t_{80}=240 \text{ ч; } t_{80\max}=310 \text{ ч; } t_{80\min}=170 \text{ ч.}$$

Проверка по критерию А.Н. Колмогорова производится по максимальной величине отклонения $|F_i^* - F_i|_{\max} = 0,04$ (табл.4.1):

$$\lambda = 0,04 \cdot \sqrt{50} = 0,283 < 1.$$

Следовательно, эмпирическое распределение хорошо согласуется с теоретическим распределением Вейбулла-Гнеденко. По полученным данным построен (рис.1.2) график вероятности безотказной работы деталей, на котором показаны доверительные границы $R_{\max}$, $R_{\min}$, 80%-й ресурс t_{80} и его доверительные границы $t_{80 \min}$ и $t_{80 \max}$.

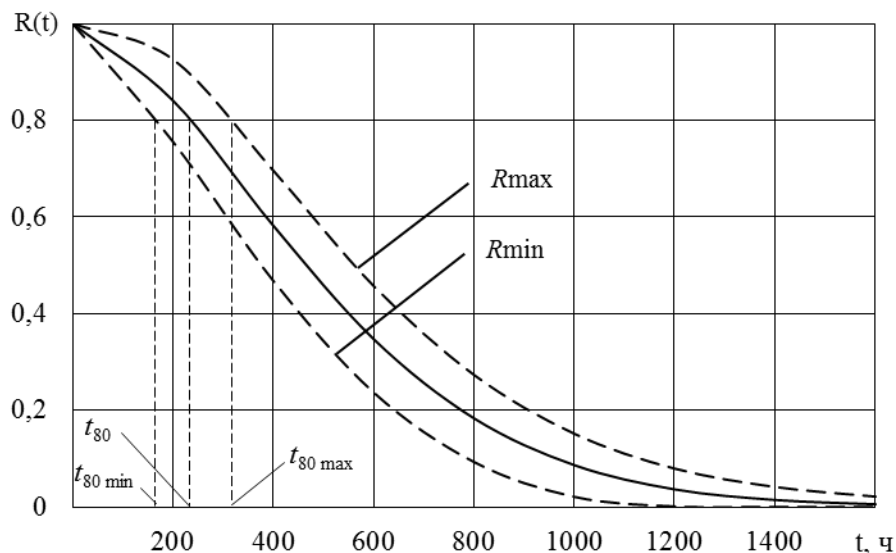


Рисунок 4.2. - График вероятности безотказной работы $R(t)$ с доверительными границами.

Таблица 4.1 Результаты расчетов к примеру

№	Границы интервалов $t_i' \div t_i''$	Серед. интерв. t_i	Число величин в интерв. n_i	Частость W_i	Эмпирич. функция F_i^*	Теоретич. функция F_i	Отклонение $ F_i^* - F_i $	Вероятн. безотказн. работы $R(t)=1-F(t)$	Доверит. интервал
1	0÷200	100	9	0,18	0,18	0,16	0,02	0,84	0,76÷0,93
2	200÷400	300	14	0,28	0,46	0,42	0,04	0,58	0,47÷0,70
3	400÷600	500	11	0,22	0,68	0,65	0,03	0,35	0,24÷0,46
4	600÷800	700	5	0,10	0,78	0,82	0,04	0,18	0,09÷0,27
5	800÷1000	900	5	0,10	0,88	0,91	0,03	0,09	0,02÷0,15
6	1000÷1200	1100	3	0,06	0,94	0,964	0,024	0,036	0÷0,08
7	1200÷1400	1300	2	0,04	0,98	0,986	0,006	0,014	0÷0,04
8	1400÷1600	1500	1	0,02	1,00	0,995	0,005	0,005	0÷0,02
Σ			50	1,00					

При выполнении самостоятельной работы исходные данные для расчетов брать из табл. 4.2.

Таблица 4.2 Исходные данные для самостоятельной работы

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	310	880	10	270	640	790	1360	150	540	500
2	190	320	300	260	540	180	980	580	740	260
3	1150	830	930	370	510	150	660	190	420	1350
4	350	570	490	1080	250	1540	340	550	930	370
5	626	624	622	493	816	619	496	600	1059	997
6	831	310	620	688	436	530	137	940	564	151
7	285	416	349	1014	663	652	639	788	461	708
8	165	480	275	345	552	538	570	673	130	566
9	202	324	634	244	776	379	289	496	632	136
0	350	110	510	180	1190	290	610	380	530	120

Инструкции по выполнению практического занятия

4. Получить задание для практической работы.
5. Проанализировать полученное задание.
6. Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля.

1. Дайте определение надежности. Перечислите основные свойства надежности.
2. Что такое показатель надежности? Перечислите показатели долговечности.
3. Дайте определение гамма-процентному ресурсу, приведите графический пример?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1997, 14 с.
3. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Практическое занятие № 5 (2 часа)

Тема: Анализ внезапных отказов

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: на основании статистической информации об отказах элементов СТС определить факторы, влияющие на скорость износа и интенсивность отказов.

Методические материалы:

1.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. И заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – Керчь, 2017. – 68с.

2.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

Обычно принимается, что износ U описывается степенной функцией вида

$$U = a \cdot t^\nu, \quad (5.1)$$

где a и ν - параметры, характеризующие работоспособность объекта.

Параметр a может меняться в довольно широких пределах; это - случайная величина, которая зависит от сочетания конструктивных, производственных, силовых, абразивных, климатических и других факторов. Параметр ν для одного наименования изделия обычно меняется незначительно, и его величина, определенная по результатам ранее проведенных экспериментов, при расчетах принимается постоянной (табл.1).

Таблица 1 - Значения параметра ν

1	Износ плунжерных пар топливного насоса	1,1
2	Зазор между клапаном и коромыслом механизма газораспределения	1,1
3	Зазоры в кривошипно-шатунном механизме	1,2÷1,6
4	Износ кулачков распределительного вала по высоте	1,1
5	Радиальный зазор в подшипниках качения и скольжения	1,5
6	Износ посадочных гнезд корпусных деталей	1,0
7	Износ зубьев шестерен по толщине	1,5
8	Износ валиков, пальцев и осей	1,4
9	Износ накладок тормозов и дисков муфт сцепления	1,0
10	Износ втулочно-роликовой цепи (удлинение шага)	1,0

В случае, когда величина износа достигает предельного значения $U=U_{np}$, (рис.1) наступает отказ при наработках T_y и T_y соответственно в эксплуатации и в условиях ускоренных испытаний.

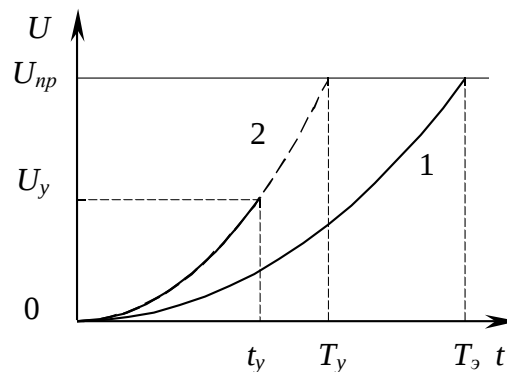


Рисунок 5.1 - К определению коэффициентов ускорения при износе:

1 – данные эксплуатации; 2 – данные ускоренных испытаний

Для эксплуатационного режима работы изнашиваемого объекта

$$U_{np} = a_y \cdot T_y^\nu, \quad (5.2)$$

при ускоренных стендовых испытаниях соответственно:

$$U_y = a_y \cdot t_y^\nu, \quad (5.3)$$

где U_y - величина износа объекта при наработке t_y к моменту прекращения испытаний.

Прекращать испытания следует тогда, когда результаты контроля величины износа позволят установить закономерность изменения его во времени и, на этом основании, прогнозировать наступление отказа.

Возьмем отношения соответственно левых и правых частей зависимостей (2) и (3):

$$\frac{U_{np}}{U_y} = \frac{a_z}{a_y} \left(\frac{T_z}{t_y} \right)^v. \quad (5.4)$$

Здесь $\frac{T_z}{t_y} = K_{y1}$, а отношения $\frac{U_{np}}{U_y}$ и $\frac{a_z}{a_y}$ следует понимать как характеристики режимов ускоренных испытаний.

Решим полученное уравнение относительно K_{y1} :

$$K_{y1} = \left(\frac{U_{np}}{U_y} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{a_y}{a_z} \right)^{\frac{1}{v}}.$$

Будем считать, что параметры a_z и a_y являются функциями усилия нагружения Q и относительной скорости V перемещения изнашиваемых деталей в эксплуатации и при ускоренных испытаниях (соответственно с индексами "з" и "у")

$$a_z = Q_z^\beta \cdot V_z^\alpha; \quad (5.5)$$

$$a_y = Q_y^\beta \cdot V_y^\alpha,$$

где β и α - опытные коэффициенты.

Тогда

$$K_{y1} = \left(\frac{U_{np}}{U_y} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{Q_y}{Q_z} \right)^{\frac{\beta}{v}} \left(\frac{V_y}{V_z} \right)^{\frac{\alpha}{v}}. \quad (5.6)$$

В приведенном выражении можно считать, что отношение $\frac{U_{np}}{U_y}$ является характеристикой режима ускоренных испытаний, определяющей величину коэффициента ускорения за счет прогнозирования результатов испытаний

$$K_{y1n} = \left(\frac{U_{np}}{U_y} \right)^{\frac{1}{v}}; \quad (5.7)$$

соответственно отношения $\frac{Q_y}{Q_z}$ и $\frac{V_y}{V_z}$ - характеристиками режима ужесточения испытаний, первое - за счет увеличения силового, а второе - скоростного режимов нагружения.

Они определяют величины коэффициентов перехода K_{nQ} и K_{nV} :

$$K_{nQ} = \left(\frac{Q_y}{Q_0} \right)^{\frac{\beta}{\nu}} \text{ и } K_{nV} = \left(\frac{V_y}{V_0} \right)^{\frac{\alpha}{\nu}}. \quad (5.8)$$

Практика показывает, что ускоренные испытания дают приемлемые результаты при следующих соотношениях, входящих в (6) факторов:

$$1,0 \leq \frac{Q_y}{Q_0} \leq 1,54; \quad 1,0 \leq \frac{V_y}{V_0} \leq 1,33; \quad 1 \leq \frac{U_{np}}{U_y} \leq 2.$$

При дальнейших расчетах, как показывает опыт, можно принять значения $\beta=1,382$ и $\alpha=0,96$. В таблице 2 приведены диапазоны возможных значений коэффициентов K_{nQ} , K_{nV} , K_{y1n} и K_{y1} (при $\beta = 1,382$; $\alpha = 0,96$).

Таблица 5.2 - Диапазон возможных значений коэффициентов K_{nQ} , K_{nV} , K_{y1n} и K_{y1}

Коэффици- ент v	Для ужесточенного режима испытаний				Прогнозирование		K _{y1}
	силового		скоростного				
	$\frac{Q_y}{Q_0}$	K _{nQ}	$\frac{V_y}{V_0}$	K _{nV}	$\frac{U_{np}}{U_y}$	K _{y1n}	
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,54	1,816	1,33	1,315	2	2,0	4,78
2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2,0	1,54	1,35	1,33	1,15	2	1,414	2,2

Коэффициенты ускорения K_{y2} и K_{y3} определяются по приведенным выше в общих сведениях зависимостям.

Пример.

Подобрать режимы ускоренных стендовых испытаний на износ цепи на стенде так, чтобы коэффициент ускорения испытаний составлял $[K_y]=24,5$.

Исходные данные: $\nu = 1,1$; $t_{02}=8\text{ч}$; $t_{y2}=24\text{ч}$; $\frac{U_{np}}{U_y} = 2$.

Вначале подсчитать коэффициент ускорения K_y при работе стенда в уплотненном по времени режиме испытаний.

Если полученное значение K_y окажется меньше требуемого значения $[K_y]=24,5$, то дальнейшее ускорение испытаний обеспечить за счет ужесточения скоростного режима. При этом ужесточение скоростного режима не должно превышать 10% от номинального, т.е. $\left[\frac{V_y}{V_0} \right] = 1,1$.

Дальнейшее ускорение испытаний до значения $K_y=[K_y]$ реализовать за счет ужесточения силового режима нагружения.

Решение.

Ускорение испытаний обеспечиваем, в первую очередь, режимом уплотненных испытаний, и, во-вторых, ужесточением скоростного и силового режимов испытаний.

Режим уплотненных испытаний достигается за счет:

- прогнозирования результатов испытаний, характеризуемого коэффициентом ускорения K_{y1n} , равным (формула 7)

$$K_{y1n} = \left(\frac{U_{np}}{U_y} \right)^{\frac{1}{\nu}} = 2^{\frac{1}{1,1}} = 1,88;$$

- увеличения длительности работы стенда в течение суток, что характеризуется коэффициентом K_{y2}

$$K_{y2} = \frac{t_{y2}}{t_{\text{с2}}} = \frac{24}{8} = 3;$$

- максимального "уплотнения" циклов нагружения цепи, характеризуемого коэффициентом ускорения $K_{y3\max}$:

$$K_{y3\max} = \frac{1}{n_3} \cdot \frac{t_3}{t_{\text{ц3}}}. \quad (5.9)$$

Для определения величины коэффициента $K_{y3\max}$ рассмотрим схему работы цепи (рис.2).

Будем считать, что за один оборот цепи в течение времени t_3 , что соответствует ее длине $L_{\text{ц}}$:

$$L_{\text{ц}} = 2l + \pi D, \quad (5.10)$$

где l - расстояние между осями ведущей звездочки и колеса;

D - диаметр звездочки (колеса),

происходит два перегиба шарнира - по одному соответственно на звездочке и на колесе. Следовательно, $n_{\text{ц3}}=2$.

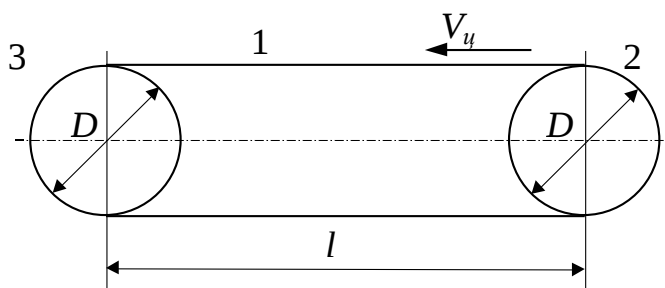


Рисунок 5.2. - Схема цепи палубных механизмов:

1 - цепь; 2 - звездочка ведущая; 3 - колесо

Длина пути $l_{\text{ш}}$, пройденного звеном цепи каждый раз на звездочке или колесе, равна

$$l_{\text{ш}} = \frac{\pi D}{2}; \quad (5.11)$$

и этот путь соответствует длительности одного цикла нагружения $t_{\text{ц3}}$.

Выразим длину цепи L_u и путь шарнира $l_{ш}$ через скорость движения цепи V_u и соответствующее время t_3 :

$$L_u = V_u \cdot t_3; \quad l_{ш} = V_u \cdot t_{u3}.$$

Исключив из последних выражений V_u , найдем с учетом (10) и (11) отношение

$$\frac{t_3}{t_{u3}} = \frac{L_u}{l_{ш}} = \frac{2(2l + \pi D)}{\pi D},$$

и с учетом этого, определим $K_{y3\max}$ из (9.9):

$$K_{y3\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2(2l + \pi D)}{\pi D} = \frac{2l}{\pi D} + 1.$$

Принимаем $l=2604$ мм; $D=604$ мм. Тогда

$$K_{y3\max} = \frac{2 \cdot 2604}{3,14 \cdot 604} + 1 = 3,75.$$

Максимально возможное расчетное значение общего коэффициента ускорения при выбранных режимах ускоренных испытаний составляет:

$$K_y = K_{y1n} \cdot K_{y2} \cdot K_{y3} = 1,88 \cdot 3 \cdot 3,75 = 21,15,$$

что меньше требуемого $[K_y]=24,5$.

Дальнейшее увеличение коэффициента ускорения K_y возможно за счет ужесточения скоростного и силового режимов нагружения.

Недостающее значение коэффициента ускорения

$$K'_y = \frac{24,5}{21,15} = 1,16$$

вначале следует обеспечить ужесточением скоростного режима.

Тогда на основании (8) имеем:

$$K_{nV} = \left(\frac{V_y}{V_9} \right)^{\frac{0,96}{1,1}} = 1,16, \quad \text{откуда} \quad \frac{V_y}{V_9} = 1,16^{\frac{1,1}{0,96}} = 1,19.$$

Как видно, при таком режиме $\frac{V_y}{V_9}$ больше допустимого $\left[\frac{V_y}{V_9} \right] = 1,1$. Допустимое значение коэффициента K_{nV} , отвечающее допустимому значению $\left[\frac{V_y}{V_9} \right] = 1,1$, составляет:

$$[K_{nV}] = \left[\frac{V_y}{V_9} \right]^{\frac{0,96}{1,1}} = 1,1^{\frac{0,96}{1,1}} = 1,09.$$

Теперь $K_y = 1,88 \cdot 3 \cdot 3,75 \cdot 1,09 = 23,05$.

Такое значение K_y все еще меньше требуемого $[K_y]=24,5$.

Недостающую величину коэффициента ускорения K''_y следует обеспечить за счет ужесточения силового режима нагружения:

$$K''_y = \frac{24,5}{23,05} = 1,06.$$

В этом случае, с учетом (8), коэффициент перехода K_{nQ} должен быть равен

$$K_{nQ} = \left(\frac{Q_y}{Q_9} \right)^{\frac{1,382}{1,1}} = 1,06, \quad \text{откуда} \quad \frac{Q_y}{Q_9} = 1,06^{\frac{1,1}{1,382}} = 1,05.$$

Таким образом, чтобы результаты испытаний были получены с коэффициентом ускорения $[K_y]=24,5$, режимы испытаний должны быть такими:

- испытания проводить круглосуточно ($K_{y2}=3$);
- с уплотненным режимом циклов нагружения ($K_{y3}=3,75$);
- ужесточение испытаний обеспечить за счет увеличения скоростного режима

в $\frac{V_y}{V_3}=1,1$ раза, что обеспечивает значение $K_{nv}=1,09$, и силового - в $\frac{Q_y}{Q_3}=1,05$ раза, что

дает значение $K_{nQ}=1,06$.

При таких режимах испытаний коэффициент ускорения K_y равен:

$$K_y = K_{y1n} \cdot [K_{nv}] \cdot K_{nQ} \cdot K_{y2} \cdot K_{y3} = 1,88 \cdot 1,09 \cdot 1,06 \cdot 3 \cdot 3,75 = 24,44,$$

что достаточно близко к требуемому $[K_y]=24,5$.

Если звено цепи имеет эксплуатационный ресурс $T_3=4000$ мото-ч, то при 8-часовой суточной работе машины ($t_{32}=8$ ч) он достигнет предельного состояния за $\frac{T_3}{t_{32}} = \frac{4000}{8} = 500$ календарных суток; при ускоренных испытаниях тот же результат

будет достигнут в $K_y=24,5$ раз быстрее, то есть за $\frac{500}{24,5} = 20,5$ суток.

Чтобы получить эксплуатационный ресурс T_y , необходимо время испытаний, выраженное в часах, умножить на коэффициент ускорения при $K_{y2}=1$, т.е. на величину

$$\frac{K_y}{K_{y2}} = \frac{24,44}{3} = 8,15,$$

что дает значение $T_y=24 \cdot 20,5 \cdot 8,15=4010$ час.

При самостоятельной работе подобрать режимы круглосуточных ускоренных испытаний, обеспечив (если это необходимо), заданное значение коэффициента $[K_y]$ варьированием данных колонок 4, 6, 7 и 8 табл.3.

Исходные данные выбрать построчно из табл.5.3.

Таблица 5.3 - Исходные данные к задаче расчета на износ

№ строки	$[K_y]$	K_{y3}	ν	$\frac{Q_y}{Q_3}$	$\frac{V_y}{V_3}$	$\frac{U_{np}}{U_y}$	t_{32}
1	3	4	5	6	7	8	9
1	15	2,60	1,1	1,10	1,03	2,0	8,0
2	20	2,70	1,2	1,15	1,07	1,9	10,0
3	25	2,80	1,3	1,20	1,10	1,8	12,0
4	30	2,90	1,4	1,25	1,14	1,7	14,0
5	35	3,00	1,5	1,30	1,17	1,6	16,0
6	35	3,10	1,6	1,35	1,20	1,5	16,0
7	30	3,20	1,7	1,40	1,23	1,4	14,0
8	25	3,30	1,8	1,45	1,26	1,3	12,0
9	20	3,40	1,9	1,50	1,30	1,2	10,0
0	15	3,50	2,0	1,54	1,33	1,1	8,0
	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>а</i>	<i>б</i>	<i>а</i>

Имея в наличии собственные реальные данные о режимах работы конкретной детали, следует воспользоваться приведенной методикой для расчета коэффициента ускорения.

Инструкции по выполнению практического занятия

7. Получить задание для практической работы.
8. Проанализировать полученное задание.
9. Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Способы предотвращения отказов деталей ЦПГ.
2. Основное требование, предъявляемое к фундаментной раме двигателя?
3. Какова главная причина заклинивания плунжеров ТНВД?
4. Основные причины и проявления неисправностей подшипников качения?
5. Основные причины и проявления неисправностей подшипников скольжения?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Возницкий И.В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. Учебное пособие. 2-е изд., испр. / И.В. Возницкий СПб. : Издательство «Лань», 2006. – 139с.
3. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1997, 14 с.
4. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Практическое занятие № 6 (2 часа.

Тема: Анализ надежности машин и механизмов в судовых условиях

Занятие направлено на формирование компетенции:

ПК-62. Способен выполнять диагностирование судового механического и электрического оборудования.

ПК-63. Способен устанавливать причины отказов судового оборудования, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению

В результате занятия курсант осваивает следующие компетенции:

ПК-62.1. Знает методы, технологии диагностирования, применяемые приборы, оценку и оформление результатов

ПК-62.2. Умеет применять по назначению судовые приборы для оценки технического состояния судового оборудования

ПК-63.1. Знает методы, последовательности сбора фактов, определение их логической связи, определение причин отказов и объема аварийных ремонтных работ, формирование мероприятий для их предупреждения в будущем

Цель: на основании статистического материала, научиться находить значения показателей надежности ремонтируемых объектов, в зависимости от структуры системы СТС.

Методические материалы:

1.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: конспект лекций для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. И заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – Керчь, 2017. – 68с.

2.Клименко Н.П. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств: методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для курсантов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» оч. и заоч. форм обучения / сост.: Клименко Н.П. ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». - Керчь, 2018. – 14с.

Учебное оборудование: аудитория, укомплектованная учебной мебелью, доской и видеопроекционным оборудованием для презентаций, экраном.

Последовательность проведения практического занятия

Объект, для которого проведение ремонтов предусмотрено в нормативно-технической или конструкторской документации, называется ремонтируемым.

Для ремонтируемых объектов находят применение следующие показатели надежности:

- * средняя наработка на отказ T_o ;
- * среднее время восстановления работоспособного состояния T_{ϵ} ;
- * коэффициент готовности K_r

Первый показатель надежности характеризует безотказность объекта и может быть определен как отношение полной продолжительности работы объекта $\sum_{i=1}^{n_o} t_{oi}$ к полному числу зарегистрированных отказов n_o :

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} t_{oi}}{n_o}; \quad (6.1)$$

Второй показатель характеризует ремонтпригодность объекта; его определяют как отношение суммарного времени, затраченного на восстановление $\sum_{i=1}^{n_o} t_{\epsilon i}$, к общему числу восстановлений, численно равных количеству возникших отказов n_o :

$$T_{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} t_{\epsilon i}}{n_o}; \quad (6.2)$$

Коэффициент готовности K_r - комплексный показатель надежности. Он количественно характеризует свойства как безотказности объекта, так и ремонтпригодности, и определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени:

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_{\epsilon}}. \quad (6.3)$$

Можно полагать, что K_r численно равен доле работоспособных объектов в любой момент времени.

Для определения перечисленных показателей надежности ремонтируемых объектов требуется статистический материал, который обычно собирается в условиях рядовой эксплуатации, либо в условиях специальных подконтрольных испытаний.

Надежность объекта как системы, состоящей из ряда элементов, можно определить также по данным о надежности каждой ее составной части или элемента. Как правило, определить показатели надежности детали или узла проще, чем всей системы в целом. В настоящее время есть необходимые методы и технические средства для испытания на надежность различных рабочих органов, деталей, узлов.

Надежность машины, как системы, зависит от ее структуры. Большинство судовых технических средств - это системы с последовательной структурой, при которой отказ системы наступает в случае отказа любого ее элемента. Вид такой структуры из трех элементов представлен на рис.2.1. Это может быть, например, центробежный насос, в котором элемент 1 - вал, элемент 2 - подшипник и элемент 3

- крыльчатка. В этом случае говорят о последовательном соединении элементов в системе, а вероятность безотказной работы системы при независимых отказах элементов определяют по формуле:

$$R_c = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3. \quad (6.4)$$

где R_1 , R_2 , и R_3 - вероятности безотказной работы элементов.

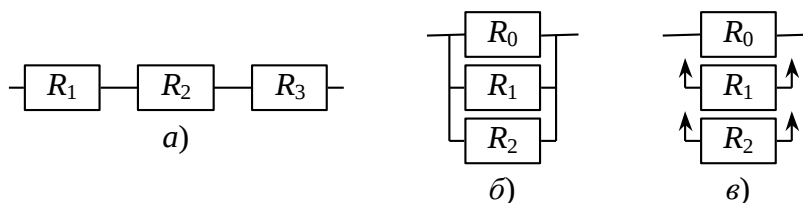


Рисунок 6.1. Структурные схемы из трех элементов:

- а) - последовательное соединение;
- б) - параллельное соединение (постоянное резервирование);
- в) - резервирование замещением.

При недостаточной надежности каких-либо элементов надежность системы можно повысить введением избыточности, т.е. путем резервирования. Резервирование бывает постоянным (нагруженным), структура которого приведена на рис.6.1б, или может осуществляться путем замещения (рис.6.1в). В последнем случае имеем ненагруженный резерв, так как резервные элементы включаются в работу только при отказе основного. Постоянное резервирование называют параллельным соединением элементов. В случае независимости отказов вероятность безотказной работы системы с параллельным соединением трех элементов (рис.6.1б) определяется по формуле:

$$R_c = 1 - (1 - R_0) \cdot (1 - R_1) \cdot (1 - R_2), \quad (6.5)$$

где R_0 , R_1 , и R_2 - вероятности безотказной работы основного и резервных элементов.

При резервировании замещением средняя наработка до отказа системы, состоящей из одного основного (работающего) и K таких же резервных элементов, определяется по формуле:

$$T_c = (1 + K) \cdot T_g, \quad (6.6)$$

где T_g - средняя наработка до отказа элемента.

Среднее квадратическое отклонение σ_c наработки до отказа этой системы определяется из выражения

$$\sigma_c = \sigma_g \cdot \sqrt{1 + K}, \quad (6.7)$$

где σ_3 - среднее квадратичное отклонение наработки до отказа элемента.

Из (6.6) и (6.7) следует, что коэффициенты вариации наработки до отказа системы ν_c и элемента ν_3 при резервировании замещением связаны соотношением:

$$\nu_c = \frac{\nu_3}{\sqrt{1+K}}. \quad (6.8)$$

При распределении наработки до отказа системы по закону Вейбулла его параметр формы b_c однозначно определяется величиной коэффициента вариации ν_c . Эта зависимость при $0,1 < \nu_c < 1$ с достаточной для практического использования точностью описывается приближенным выражением:

$$b_c = \frac{1,126}{\nu_c} + \frac{0,011}{\nu_c^2} - 0,137, \quad (6.9)$$

откуда (с учетом 2.8) следует, что

$$b_c = \frac{1,126}{\nu_3} \sqrt{1+K} + \frac{0,011}{\nu_3^2} (1+K) - 0,137. \quad (6.10)$$

Параметр масштаба распределения наработки до отказа системы, исходя из (6.6) определяется по формуле:

$$a_c = \frac{T_c}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b_c}\right)} = \frac{(1+K)T_3}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b_c}\right)}. \quad (6.11)$$

При сделанных предположениях вероятность безотказной работы системы из одного работающего и K резервных (запасных) элементов, последовательно включаемых в работу при наступлении отказов на заданном интервале наработки T , определяется из выражения:

$$R_c(T) = \exp \left\{ - \left[\frac{T \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b_c}\right)}{T_3(1+K)} \right]^{b_c} \right\}, \quad (6.12)$$

в котором параметр b_c определяется по формуле (2.10).

Вероятность безотказной работы элемента $R_3(T)$ на интервале T можно также определять по формуле (2.12). Положив в ней $K=0$, получим выражение:

$$R_{\circ}(T) = \exp \left\{ - \left[\frac{T \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{b_{\circ}} \right)}{T_{\circ}} \right]^{b_{\circ}} \right\}, \quad (6.13)$$

в котором параметр формы $b_{\circ}$ в соответствии с (2.10) определяется по формуле:

$$b_{\circ} = \frac{1,126}{\nu_{\circ}} + \frac{0,011}{\nu_{\circ}^2} - 0,137. \quad (6.14)$$

Величина $R_c(t)$ определяет вероятность того, что за период T не наступит состояние, при котором дальнейшее восстановление работоспособности системы станет уже невозможным из-за отсутствия резервных элементов. Вероятность того, что в любой момент времени система не будет находиться в состоянии восстановления при наличии резервных элементов, определяется величиной коэффициента готовности K_r .

Вероятность того, что еще не израсходованы резервные элементы и система не находится в состоянии восстановления, определяется произведением указанных выше вероятностей и является комплексным показателем надежности резервированных способом замещения систем, который называют коэффициентом оперативной готовности $K_{ор}(T)$:

$$K_{ор}(T) = K_r \cdot R_c(T). \quad (6.15)$$

Величина этого показателя соответствует заданному интервалу времени работы T , с увеличением которого коэффициент оперативной готовности монотонно уменьшается. С его помощью можно определить среднее число работоспособных машин к концу периода T :

$$N_p(T) = N \cdot K_{ор}(T),$$

где N - общее число машин.

Последовательность решения задачи. Исходные статистические данные о наработках между отказами t_i и времени восстановления t_{ei} системы (машины), состоящей из трех условных элементов (агрегатов) с последовательным соединением (рис.6.1а) выбирают из табл. 6.1. Они должны содержать заданное количество наработок системы между отказами t_i и такое же количество значений времени восстановления t_{ei} .

Далее, используя выбранные статистические данные, по формулам (6.1), (6.2) и (6.3) определяют показатели надежности системы: среднюю наработку на отказ T_o , среднее время восстановления T_e и коэффициент готовности K_r . Коэффициент готовности K_r предполагает возможность неограниченного числа восстановлений (или запасных элементов).

**Таблица 6.1 Статистические данные о наработках между отказами и времени
восстановления системы**

№ пп	Наработки между отказами t_{oi} , ч	Время восстановления t_{gi} , ч
0	41, 20, 97, 104, 53	2,1; 2,4; 8,6; 5,6; 4,3
1	88, 76, 302, 176, 12	6,3; 7,0; 2,3; 2,8; 8,1
2	34, 84, 168, 28, 96	5,5; 3,6; 7,0; 5,0; 3,7
3	205, 72, 28, 136, 173	3,4; 5,4; 10,2; 3,3; 4,7
4	44, 80, 35, 192, 306	2,5; 5,6; 6,4; 6,9; 7,7
5	67, 224, 111, 260, 79	1,3; 3,4; 10,2; 2,2; 3,9
6	93, 244, 319, 188, 56	1,9; 4,9; 2,8; 5,8; 12,1
7	133, 216, 107, 32, 39	7,5; 6,4; 9,4; 1,5; 11,0
8	84, 360, 148, 248, 16	3,5; 1,1; 13,4; 3,9; 8,7
9	37, 112, 49, 196, 201	6,6; 1,8; 1,6; 11,6; 5,4

Таблица 6.2 Исходные данные о надежности элементов

№ п/п	Коэффициенты вариации наработки до отказа			Средние наработки до отказа		
	$v_{\beta 1}$	$v_{\beta 2}$	$v_{\beta 3}$	$T_{\beta 1}, \text{ч}$	$T_{\beta 2}, \text{ч}$	$T_{\beta 3}, \text{ч}$
0	0,4	0,5	0,6	200	500	300
1	0,5	0,4	0,7	400	200	300
2	0,6	0,5	0,8	500	400	200
3	0,4	0,7	0,5	200	300	500
4	0,5	0,8	0,4	400	500	200
5	0,6	0,4	0,7	300	200	400
6	0,4	0,6	0,8	500	300	200
7	0,5	0,6	0,8	300	500	400
8	0,6	0,4	0,5	500	200	400
9	0,8	0,4	0,7	200	400	500

На следующем этапе проводят оценку надежности системы на заданный период времени T в случае, когда число возможных восстановлений ограничено количеством имеющихся резервных элементов. Исходные данные для такой оценки выбирают из табл. 6.2.

С помощью этих данных по формуле (6.14) определяют параметры $b_{\beta 1}$, $b_{\beta 2}$ и $b_{\beta 3}$, а затем по формуле (6.13) для заданного периода $T=100$ ч определяют

вероятности безотказной работы элементов системы $R_{э1}(T)$, $R_{э2}(T)$ и $R_{э3}(T)$ и по формуле (6.4) - вероятность безотказной работы нерезервированной системы $R_{нс}(T)$.

Затем с учетом найденных значений $R_{э1}(T)$, $R_{э2}(T)$, и $R_{э3}(T)$ отбирают наиболее рациональные варианты (не менее двух) резервирования системы замещением с помощью трех резервных элементов из схем, приведенных на рис.6.2 таким образом, чтобы обеспечить максимальную вероятность безотказной работы системы. При выборе рациональных вариантов резервирования следует рассматривать в первую очередь схемы, которые обеспечивают резервирование наименее надежных элементов системы.

Для отобранных вариантов схем, используя формулы (6.4) и (6.5), рассчитывают величины вероятности безотказной работы системы, вначале считая, что резервные элементы образуют параллельное соединение с основными (постоянное резервирование). Сравнивая альтернативные варианты схем, выбирают окончательный вариант с наибольшей вероятностью безотказной работы системы с постоянным резервированием и затем по формулам (6.10), (6.12) и (6.4) для выбранного варианта схемы резервирования определяют вероятность безотказной работы системы $R_c(T)$ при резервировании замещением. Этот показатель характеризует надежность системы при мгновенной замене отказывающихся элементов резервными.

По формуле (6.15) рассчитывают коэффициент оперативной готовности $K_{ог}(T)$, учитывающий реальное время замены элементов и ограниченность их числа, и строят графики изменения $K_{ог}(T)$ и $R_c(T)$ при увеличении T . По графику функции $K_{ог}(T)$ определяют период работы $\tilde{T}$, соответствующий заданному значению коэффициента оперативной готовности $\tilde{K}_{ог}$.

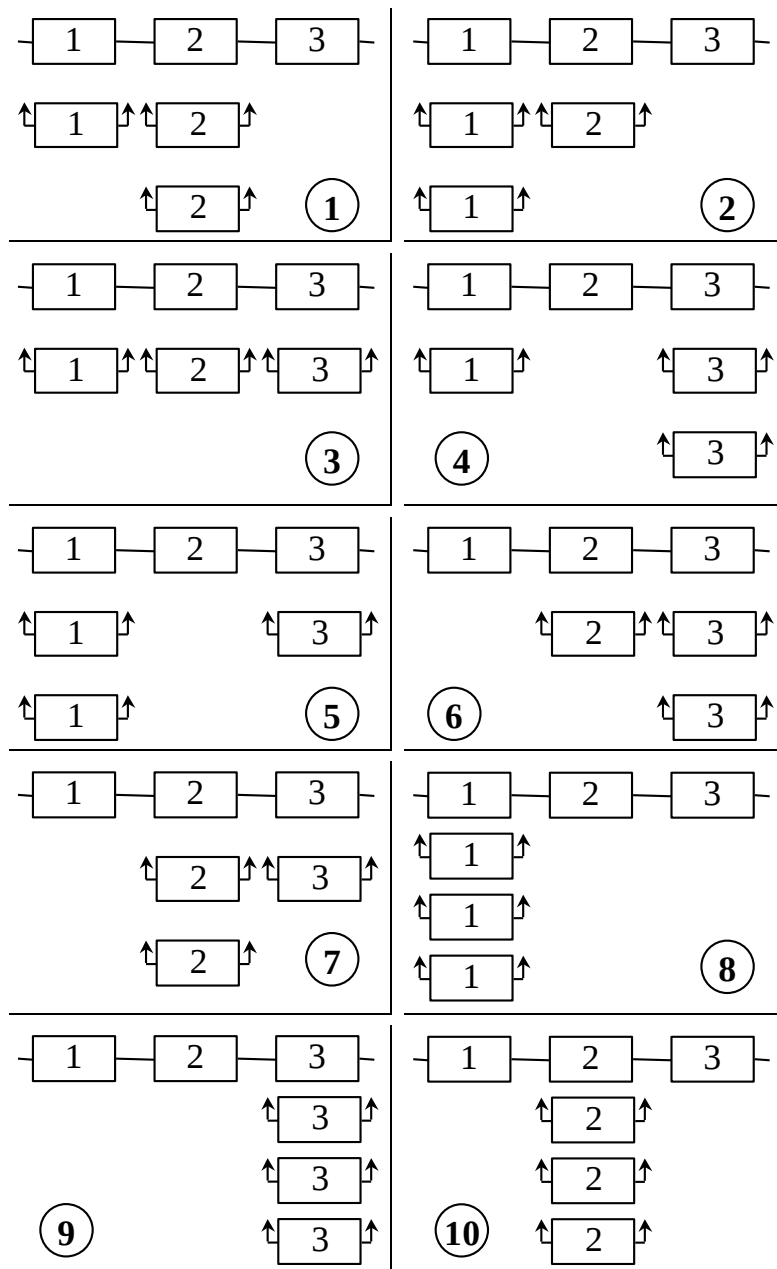


Рисунок 6.2. Варианты резервирования элементов в системе

Пример.

Таблица 6.3 Исходные данные к расчету коэффициента готовности

Наработки между отказами t_i , ч	41	76	168	136	306	67	244	107	248	201	$\Sigma t_i=1594$
Время восстановления t_{ei} , ч	2,1	7,0	5,0	4,7	3,6	3,4	6,9	10,2	5,8	1,8	$\Sigma t_{ei}=50,5$

В соответствии с формулами (2.1), (2.2), (2.3):

средняя наработка на отказ системы

$$T_o = \frac{\Sigma t_i}{n_o} = \frac{1594}{10} = 159,4 \text{ ч;}$$

среднее время восстановления

$$T_{\text{с}} = \frac{\sum t_{\text{с}i}}{n_o} = \frac{50,5}{10} = 5,05 \text{ч};$$

Коэффициент готовности

$$K_{\text{г}} = \frac{T_o}{T_o + T_{\text{с}}} = \frac{159,4}{159,4 + 5,05} = 0,969.$$

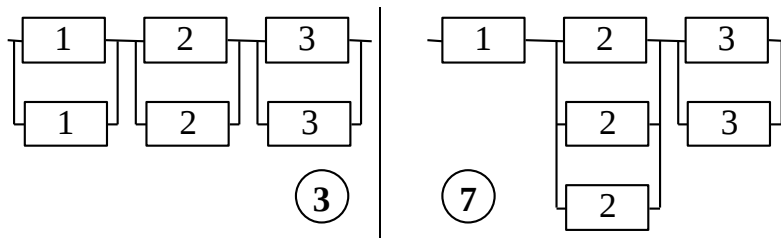
Таблица 6.4 Исходные данные и результаты расчета вероятности безотказной работы элементов

№ элемента	$T_{\text{с}}, \text{ч}$	$\nu_{\text{с}}$	$b_{\text{с}}$	$\Gamma\left(1 + \frac{1}{b_{\text{с}}}\right)$	$R_{\text{с}}(100)$
1	450	0,5	2,16	0,8856	0,9706
2	200	0,7	1,49	0,9033	0,7364
3	400	0,6	1,77	0,8900	0,9324

Вероятность безотказной работы нерезервированной системы

$$R_{\text{нс}}(100) = 0,9706 \cdot 0,7364 \cdot 0,9324 = 0,6664.$$

Альтернативные варианты постоянного резервирования



Вероятность безотказной работы по варианту 3:

$$R_{C1} = 1 - (1 - 0,9706)^2 = 0,9991$$

$$R_{C2} = 1 - (1 - 0,7364)^2 = 0,9305$$

$$R_{C3} = 1 - (1 - 0,9324)^2 = 0,9954$$

$$R_C^* = 0,9991 \cdot 0,9305 \cdot 0,9954 = 0,9254.$$

Вероятность безотказной работы по варианту 7:

$$R_{C2}^* = 1 - (1 - 0,7364)^3 = 0,9817$$

$$R_C^* = 0,9706 \cdot 0,9817 \cdot 0,9954 = 0,9485.$$

Для варианта 7, у которого R_C^* выше, рассчитываем вероятность безотказной работы при резервировании замещением.

Для второго элемента при $K=2$ по формуле (6.10) определяем параметр формы:

$$b_2 = \frac{1,126}{0,7} \sqrt{3} + \frac{0,011}{0,49} \cdot 3 - 0,137 = 2,72.$$

Значение гамма-функции из таблицы (прил.1):

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,72}\right) = 0,8893.$$

Вероятность безотказной работы по формуле (6.12):

$$R_{c2}(100) = \exp\left[-\left(\frac{100 \cdot 0,8893}{200 \cdot 3}\right)^{2,72}\right] = 0,9945.$$

Для третьего элемента при $K=1$ имеем

$$b_3 = \frac{1,126}{0,6} \sqrt{2} + \frac{0,011}{0,36} \cdot 2 - 0,137 = 2,58.$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,58}\right) = 0,8879.$$

$$R_{c3}(100) = \exp\left[-\left(\frac{100 \cdot 0,8879}{400 \cdot 2}\right)^{2,58}\right] = 0,9966.$$

Вероятность безотказной работы системы при $T=100$ ч

$$R_c(100) = 0,9706 \cdot 0,9945 \cdot 0,9966 = 0,962.$$

Коэффициент оперативной готовности

$$K_{oz}(100) = 0,969 \cdot 0,962 = 0,9322.$$

Величины R_c и $K_{ог}$ при значениях $T=150$ ч и $T=200$ ч рассчитываем аналогично и заносим в табл. 6.5.

Таблица 6.5 Результаты расчетов R_c и $K_{ог}$ к примеру

$T, \text{ч}$	0	100	150	200
R_{c1}	1	0,9706	0,9308	0,8751
R_{c2}	1	0,9945	0,9834	0,9640
R_{c3}	1	0,9966	0,9903	0,9796
R_c	1	0,9620	0,9065	0,8264
$K_{ог}$	0,969	0,9322	0,8784	0,8008

Строим графики R_c и $K_{ог}$ в функции T и определяем период работы, соответствующий заданному значению $\tilde{K}_{ог} = 0,9$: $\tilde{T} = 130$ ч (рис.2.3). На графике наносим постоянный уровень $K_r = 0,969$.

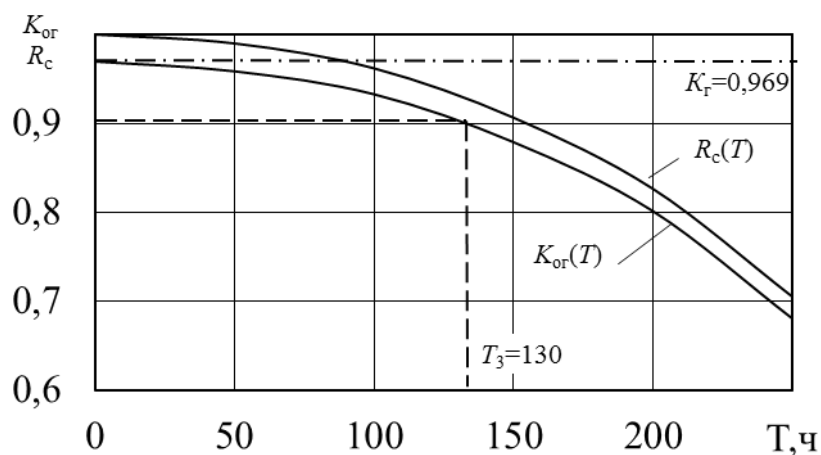


Рисунок 6.3. Графики вероятности безотказной работы системы и коэффициента оперативной готовности.

Полученные показатели комплексно характеризуют надежность ремонтируемой системы.

При выполнении самостоятельной работы следует выбрать исходные данные из таблиц 6.1 и 6.2 (построчно) и использовать варианты резервирования из рис. 6.2.

Инструкции по выполнению практического занятия

- 1 Получить задание для практической работы.
- 2 Проанализировать полученное задание.
- 3 Выполнить полученное задание в надлежащем виде

Содержание отчета:

По результатам проведения работы составляется отчет, в который должны войти: графики и таблицы, ответы на контрольные вопросы.

Вопросы для самоконтроля.

1. Как определить вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов?
2. Как определить вероятность безотказной работы системы с параллельным соединением элементов?
3. Что такое коэффициент готовности системы?

Список рекомендуемой литературы

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.

Список литературы.

1. Калугин В.Н. Анализ отказов и повреждений судовых технических средств. Учебное пособие / В.Н. Калугин, И.В. Логишев. - Одесса, 2009. – 71с.
2. Мартынов А.А., Основы теории надёжности и диагностики: Конспект лекций/ А.А. Мартынов, Г.А. Долгополов. - Новосибирск: НГАВТ, 2009г.-106с.
3. Фока А.А. Техническое обслуживание судна в рейсе / А. А. Фока. – М.: Транспорт, 1985. – 319 с.
4. Токарев А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники: Учеб. пособие / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 250 с.
5. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля. Уч.пособие / И.Н. Каневский. - Владивосток. Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243с.
6. Кончаков Е.И. Техническая диагностика судовых энергетических установок: учеб. Пособие / Е.И. Кончаков. - Владивосток: Изд- во ДВГТУ, 2007. - 112 с.
7. Шерстнев Н.В. Обслуживание и ремонт судовых дизелей / Н.В. Шерстнев. - Севастополь.: Рибэст, 2013. – 560с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под.ред. В.В. Ключева, 2 –е изд. испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656., ил.
9. Гальперин М.М. Система технического обслуживания и ремонта морских судов / М. М. Гальперин. – М.: Транспорт, 1985. – 302 с.
10. Ворохобин С.В. Практикум по основам теории надёжности и диагностики. Учебное пособие / С.В. Ворохобин. - изд. Владивосток: Мор.гос.ун-т, 2011.-93с.

Гамма-функция

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906
01	0,99433	26	0,90440	51	0,88659	76	0,92137
02	0,98884	27	0,90250	52	0,88704	77	0,92376
03	0,98355	28	0,90072	53	0,88757	78	0,92623
04	0,97844	29	0,89904	54	0,88818	79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93138
06	0,96874	31	0,89600	56	0,88964	81	0,93408
07	0,96415	32	0,89464	57	0,89049	82	0,93685
08	0,95973	33	0,89338	58	0,89142	83	0,93969
09	0,95546	34	0,89222	59	0,89243	84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
11	0,94740	36	0,89018	61	0,89468	86	0,94869
12	0,94359	37	0,88931	62	0,89592	87	0,95184
13	0,93993	38	0,88854	63	0,89724	88	0,95507
14	0,93642	39	0,88785	64	0,89864	89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
16	0,92980	41	0,88676	66	0,90167	91	0,96523
17	0,92670	42	0,88636	67	0,90330	92	0,96877
18	0,92373	43	0,88604	68	0,90500	93	0,97240
19	0,92089	44	0,88581	69	0,90678	94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
21	0,91558	46	0,88560	71	0,91057	96	0,98374
22	0,91311	47	0,88563	72	0,91258	97	0,98768
23	0,91075	48	0,88575	73	0,91467	98	0,99171
24	0,90852	49	0,88595	74	0,91683	99	0,99581
1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906	2,00	1,00000

Елена Владимировна Богатырева
Николай Петрович Клименко
Вячеслав Леонтьевич Конюков

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Практикум
для курсантов специальности
26.05.06 Эксплуатация судовых энергетических установок
очной и заочной форм обучения

Тираж _____ экз. Подписано к печати _____.
Заказ № _____. Объём 2,05 п.л.

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309 г. Керчь, Орджоникидзе, 82.