

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения

А.В.Ефимов

А.Г.Галкин

А.О.Грехов

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА
И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Методические указания к практическим занятиям

**Екатеринбург
2006**

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения

Кафедра электроснабжения транспорта

А.В.Ефимов

А.Г.Галкин

А.О.Грехов

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА
И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Методические указания к практическим занятиям

Екатеринбург
2006

Методические указания составлены в соответствии с программой по дисциплине «Надежность устройств электроснабжения» для студентов всех форм обучения. Специальности – 190401 «Электроснабжение железных дорог». Программа рекомендована Министерством образования Российской Федерации и Департаментом кадров и учебных заведений Федерального агентства железнодорожного транспорта России в 2001г.

В методических указаниях приведены условия и примеры решения задач по курсу «Основы теории надежности», «Основы технической диагностики» и «Надежность и диагностика устройств электроснабжения».

Все расчетные методики проиллюстрированы числовыми примерами. В приложении приведен перечень вопросов для семинаров и экзаменов.

Методические указания выполнены в соответствии с ГОСТ 2105.

Авторы: профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», канд. техн. наук
А.В. Ефимов;
доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», д-р техн. наук
А.Г. Галкин;
ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта»
А.О. Грехов.

Рецензент: начальник дорожной электротехнической лаборатории
Свердловской железной дороги филиала ОАО «РЖД»,
И.А. Пятецкий.

Содержание

1 Основы теории надежности.....	6
1.1 Статистическая обработка опытных данных.....	6
1.2 Оценка показателей надежности невосстанавливаемого объекта	16
1.3 Расчет показателей надежности невосстанавливаемого объекта при известном законе распределения времени безотказной работы.....	20
1.4 Расчет элементной надежности системы способом преобразования структуры.....	28
1.5 Расчет надежности системы с постоянным резервированием.....	30
1.6 Расчет надежности системы с поэлементным резервированием.....	36
1.7 Резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом.....	40
1.8 Скользящее резервирование при экспоненциальном законе надежности.....	45
2 Основы технической диагностики.....	48
2.1 Оценка качества продукции.....	48
2.2 Составление таблицы функций неисправностей.....	49
2.3 Проверка изоляционных свойств масла трансформатора.....	49
2.4 Метод Байеса.....	52
2.5 Метод минимального риска.....	54
2.6 Метод поэлементных проверок.....	59
2.7 Метод групповых проверок.....	65
3 Надежность и диагностика устройств электроснабжения железных дорог.....	72
3.1 Выбор варианта модернизации устройства электроснабжения.....	72
3.2 Расчет оптимальной периодичности замены трубчатого разрядника по критерию безотказности.....	75
3.3 Расчет ресурса трансформатора тяговой подстанции.....	78
3.4 Определение ресурса батареи конденсаторов.....	88
3.5 Организация технического обслуживания участка контактной сети по состоянию с контролем уровня надежности.....	95
Список использованных источников.....	101
Приложение 1.....	102
Приложение 2.....	104
Приложение 3.....	106
Приложение 4.....	126

Введение

Под надежностью понимается способность технических устройств безотказно (исправно) работать в течение определенного отрезка времени в заданных условиях. Безотказной (исправной) работой считается нормальное выполнение техническими устройствами всех своих функций в пределах заданных допусков. При этом предполагается, что рассматриваемые устройства имеют практическое назначение, заключающееся в выполнении задания в заранее установленном объеме.

Надежность тесно связана с различными сторонами процесса эксплуатации технических устройств. Большое значение имеют вопросы, связанные с восстановлением свойств отказавших объектов. Рост значения проблемы надежности связан с некоторыми особенностями развития современной техники. Во – первых, существует стремление к подробному планированию хода производственных процессов, которые становятся все более сложными. Во – вторых, все больше распространяется автоматизация различных процессов; постепенно автоматизация становится основным средством технического прогресса. В – третьих, автоматические системы выполняют все более ответственные задачи.

Методические указания предназначены для получения студентами практических навыков по повышению надежности системы электроснабжения электрифицированных железных дорог.

Предназначено для студентов всех форм обучения. Исходные данные определяются по номеру варианта, заданного преподавателем. Вопросы для тестирования представлены в приложении 3. В приложении 4 приведен перечень вопросов для экзаменов.

1 Основы теории надежности

1.1 Статистическая обработка результатов измерений

В качестве исходных данных имеется результаты контроля некоторой физической величины. Требуется по выборке построить гистограмму, оценить математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение, подобрать закон распределения и проверить соответствие опытных данных принятому закону.

Исходные данные

Таблица 1.1 - Результаты контроля

№	Варианты																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	59	54	51	48	32	23	54	25	24	53	7	32	15	22	48	35	45	29	21	13
2	55	29	42	51	35	31	60	82	34	36	62	30	73	75	42	28	32	35	30	17
3	51	31	63	51	22	25	43	32	31	28	51	38	23	32	60	21	35	79	32	31
4	43	37	48	42	29	6	55	35	28	33	14	23	28	47	4	36	28	37	34	18
5	54	37	39	71	30	28	54	10	35	23	21	24	12	31	43	35	24	37	36	31
6	58	47	58	47	31	28	30	19	21	4	17	38	46	45	2	44	33	33	26	17
7	56	36	49	63	40	12	28	19	29	17	25	52	9	23	23	29	26	35	48	37
8	53	25	59	65	42	18	23	22	14	26	51	40	43	38	17	29	48	30	36	32
9	45	46	22	37	14	27	30	18	12	10	28	27	26	30	24	35	39	42	28	37
10	34	37	39	70	46	21	23	74	65	13	25	19	29	28	5	20	16	39	31	21
11	54	39	31	46	44	13	43	32	13	2	36	44	49	68	2	40	16	34	34	62
12	31	23	38	58	21	47	99	50	28	33	38	38	55	47	12	23	10	41	43	21
13	54	43	23	41	69	24	66	38	45	2	56	40	48	39	1	32	34	39	21	31
14	69	44	12	56	24	41	3	50	18	16	41	27	61	37	12	35	9	39	39	18
15	66	29	16	45	29	45	8	59	62	44	41	45	49	42	1	35	56	54	39	30
16	43	25	29	23	32	35	1	53	25	9	76	21	59	50	10	32	40	43	36	20
17	32	33	71	25	33	25	35	67	24	23	53	31	63	29	16	6	9	38	19	35
18	30	27	96	47	70	25	2	20	40	5	59	30	46	17	5	27	14	61	19	45
19	42	37	30	74	69	34	37	34	14	36	41	36	49	52	20	28	4	40	44	21
20	21	44	16	18	29	23	30	30	42	18	22	27	56	39	1	20	25	34	36	42
21	61	31	83	29	49	41	12	27	19	1	44	32	70	35	6	31	26	30	28	28
22	18	30	38	58	17	24	16	44	46	1	23	49	33	54	1	20	68	15	24	52
23	38	20	3	18	56	15	75	21	51	2	34	13	31	49	4	37	28	64	23	13
24	35	39	11	42	41	23	9	22	20	19	42	14	37	36	52	42	20	17	46	4
25	71	39	3	41	23	14	2	42	41	25	40	63	0	62	35	23	14	52	35	40
26	58	25	15	48	28	38	74	34	52	1	55	31	37	19	12	29	19	22	38	43

Продолжение таблицы.1.1

№	Варианты																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
27	42	19	5	51	38	33	17	52	34	15	44	25	54	46	30	16	11	50	21	53
28	44	31	17	27	19	31	6	39	21	17	44	26	72	6	12	45	5	59	24	39
29	48	31	8	49	45	27	23	44	39	40	49	20	42	15	26	46	1	26	13	49
30	43	50	22	16	66	32	11	35	26	45	2	35	26	35	6	25	3	23	11	45
31	49	30	16	32	54	43	3	21	48	55	54	37	46	54	12	36	10	40	31	40
32	51	40	14	41	29	14	18	35	15	16	30	22	62	31	10	24	14	45	42	60
33	18	45	20	29	8	10	13	47	32	4	54	49	33	26	3	40	1	34	29	32
34	30	40	2	47	38	14	5	47	23	37	63	21	42	51	7	15	24	24	53	35
35	55	37	6	25	12	21	11	12	11	34	43	62	20	50	7	34	7	27	26	31
36	43	51	12	45	29	38	20	29	30	9	4	49	45	52	21	47	4	54	30	20
37	48	74	12	68	52	49	5	49	40	9	17	61	55	37	41	34	77	25	46	34
38	49	54	15	7	40	27	20	40	38	3	39	27	23	37	3	24	48	16	47	30
39	33	19	12	56	37	56	29	24	19	53	23	49	39	34	76	49	11	54	42	40
40	32	52	85	47	43	32	7	20	56	40	32	34	31	56	12	50	13	66	48	47
41	63	20	26	49	57	8	1	61	32	13	45	37	19	21	7	38	11	52	50	30
42	46	41	15	47	12	54	13	31	41	5	36	32	52	22	18	24	9	39	47	23
43	37	58	3	48	19	12	4	53	18	17	57	22	35	25	19	44	68	21	55	30
44	43	27	3	59	43	62	3	8	76	34	40	41	32	34	35	19	11	41	52	4
45	43	54	20	43	31	41	9	39	34	13	51	36	27	41	10	59	9	13	28	26
46	26	64	33	27	26	34	13	58	72	5	55	22	79	58	10	46	28	18	45	38
47	33	48	13	26	42	38	30	16	28	85	50	56	33	39	26	39	17	40	38	37
48	38	16	8	21	46	8	70	55	38	33	31	39	28	59	38	34	4	35	60	40
49	24	44	15	21	8	35	1	7	53	1	22	46	32	30	3	39	10	49	10	44
50	49	49	1	45	49	52	30	32	9	16	35	28	50	27	5	38	5	26	10	24

Таблица 1.2 - Результаты контроля

№	Варианты																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	10	22	25	25	41	43	59	29	47	58	19	59	43	49	45	6	37	44	41	13
2	32	34	41	50	38	93	76	34	50	43	10	27	21	29	39	11	19	37	36	15
3	29	16	40	27	31	62	42	47	47	47	16	29	22	29	35	5	20	49	40	23
4	14	0	45	28	39	46	46	29	45	39	26	46	26	55	30	8	51	42	47	9
5	21	34	39	29	44	50	41	53	45	36	15	34	27	30	49	43	50	39	56	15
6	19	12	39	22	39	75	55	40	44	48	23	43	28	37	42	41	42	34	25	22
7	39	22	45	25	44	59	55	30	29	38	24	44	44	37	34	7	44	41	14	13
8	18	1	35	31	31	73	54	28	28	41	31	54	31	45	42	33	49	37	22	23
9	22	45	40	40	39	46	77	60	36	53	12	22	15	51	42	9	24	42	5	26
10	36	20	47	27	45	50	38	25	26	39	23	40	2	54	37	7	68	37	3	20
11	34	41	41	26	45	33	64	16	49	53	12	37	3	35	35	44	63	50	14	26

Продолжение таблицы 1.2

№	Варианты																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
12	17	41	33	43	41	65	43	18	53	37	15	21	2	54	53	1	62	34	3	15
13	39	69	47	36	29	50	64	25	38	41	15	16	3	54	39	6	33	37	7	19
14	18	9	49	46	53	60	26	19	37	32	16	29	25	53	33	16	54	35	27	24
15	38	55	44	33	35	5	38	13	48	44	14	36	9	58	36	60	56	45	26	18
16	24	32	41	32	51	15	65	9	48	51	24	20	10	47	52	43	23	39	20	10
17	42	22	30	23	43	50	42	12	42	58	20	27	39	38	50	12	39	43	26	32
18	41	62	31	32	34	19	55	10	36	49	25	48	19	47	47	48	53	60	20	19
19	41	57	42	33	48	29	56	2	28	47	24	29	13	27	35	5	35	50	5	22
20	29	36	33	28	45	29	33	4	30	44	33	27	13	42	29	5	62	47	1	19
21	12	31	30	37	33	32	23	41	40	45	13	27	7	36	39	41	27	42	72	31
22	28	51	35	51	57	56	55	9	43	31	20	29	7	38	47	26	33	55	47	26
23	26	40	30	55	39	37	52	10	52	54	34	36	9	39	47	39	23	57	11	21
24	22	19	41	37	56	36	28	1	57	41	32	45	81	25	45	10	43	27	60	25
25	34	31	32	25	22	83	25	13	46	39	19	23	37	34	28	3	35	45	25	20
26	59	39	29	30	35	53	57	68	39	35	32	45	6	40	70	27	28	13	38	24
27	48	28	39	35	50	61	87	9	54	60	21	25	6	29	15	22	27	60	4	37
28	31	47	58	42	20	36	26	29	62	70	19	18	6	30	19	1	32	45	4	20
29	25	51	26	43	22	10	50	11	30	54	27	42	3	29	50	30	10	52	9	37
30	12	44	33	34	49	40	24	6	61	25	14	25	3	37	28	11	49	32	5	28
31	28	60	21	33	36	13	49	5	15	34	15	13	11	50	40	9	4	35	32	45
32	41	43	34	34	21	26	24	25	47	52	16	34	1	67	53	26	39	33	25	16
33	23	24	37	40	28	38	20	4	33	48	40	15	52	13	27	11	13	53	12	38
34	13	29	37	36	38	35	26	8	25	34	14	34	7	19	66	25	35	27	3	33
35	57	37	53	44	55	55	24	23	25	37	17	30	2	12	55	24	4	32	5	27
36	33	45	46	24	34	40	86	5	43	30	28	20	10	56	24	16	33	31	41	34
37	31	59	46	42	50	40	41	2	34	21	10	28	12	21	64	8	32	33	7	38
38	23	25	27	41	49	47	26	23	23	39	37	38	3	44	31	22	14	31	14	38
39	41	72	29	50	56	53	6	22	51	34	23	25	54	17	24	79	44	11	9	33
40	53	25	34	38	20	22	47	13	41	16	12	30	35	73	60	48	52	68	8	42
41	26	38	25	45	33	53	53	6	54	51	24	37	11	26	27	24	21	10	23	32
42	50	32	44	51	38	66	22	3	37	64	27	30	8	29	53	3	51	42	5	29
43	37	26	21	16	54	39	21	21	36	29	38	50	15	40	28	33	34	29	22	52
44	71	46	37	33	37	4	19	9	39	17	26	14	4	37	24	21	48	29	25	41
45	48	35	27	25	49	34	53	13	41	68	12	28	9	42	5	32	37	25	9	28
46	54	49	55	26	55	13	41	27	43	65	11	21	23	31	40	13	35	10	7	23
47	17	44	22	35	58	25	31	18	34	27	52	39	2	29	49	12	29	46	6	7
48	70	38	34	39	46	42	43	7	32	38	29	40	44	41	62	24	39	32	1	25
49	36	48	43	19	34	29	43	49	44	57	20	37	26	64	1	6	42	48	46	30
50	36	18	18	45	64	58	44	3	40	18	13	22	24	17	8	11	23	34	20	43

Таблица 1.3 – Результаты контроля

№	Варианты																			
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	27	64	68	21	11	18	43	48	24	18	24	12	27	36	19	8	32	60	30	26
2	29	24	68	14	2	45	46	15	26	19	31	43	27	56	61	1	29	26	36	25
3	30	25	46	12	4	19	42	45	23	28	33	39	29	61	24	3	29	62	32	5
4	56	31	79	52	12	30	50	24	22	15	19	5	31	46	31	2	29	60	27	20
5	55	47	42	20	9	18	53	20	18	15	37	42	29	54	10	3	36	27	46	50
6	27	33	56	16	44	57	25	44	20	15	29	24	26	27	31	4	31	60	35	6
7	41	52	61	65	1	29	82	38	16	28	37	6	43	76	15	40	27	23	40	5
8	28	47	73	18	47	11	19	48	13	38	23	10	30	62	30	14	26	77	35	19
9	46	26	59	22	12	15	35	50	21	27	32	14	27	23	25	6	29	32	29	21
10	35	59	36	46	16	3	35	36	16	26	49	11	32	81	27	6	17	30	43	26
11	22	29	47	30	13	2	58	31	13	60	46	11	32	36	27	5	23	33	31	23
12	26	58	47	7	40	13	42	31	47	47	22	37	35	28	25	5	22	45	40	8
13	34	48	5	36	21	1	55	10	19	24	32	59	43	70	27	34	45	80	45	30
14	21	58	27	21	11	37	38	38	31	26	28	11	32	58	15	4	49	31	45	5
15	39	61	24	14	10	7	21	25	18	8	59	23	31	54	22	1	22	44	43	11
16	53	67	42	20	23	13	44	45	41	28	34	21	32	33	29	1	41	75	43	11
17	45	24	57	12	7	5	26	62	11	23	33	15	39	44	67	45	50	51	40	55
18	27	42	50	34	3	7	29	37	25	50	21	1	39	29	28	9	25	36	27	4
19	27	80	37	29	4	16	25	19	43	28	19	9	27	59	42	13	24	59	41	10
20	34	35	47	27	1	51	32	46	35	13	16	3	26	26	29	48	39	64	20	15
21	13	17	29	23	27	56	30	42	21	33	34	1	25	46	10	54	28	43	41	36
22	27	49	32	28	4	20	25	71	17	14	49	53	46	37	47	4	46	58	23	15
23	43	22	18	38	67	84	3	60	53	27	22	12	48	26	51	8	18	25	35	8
24	35	52	49	12	26	48	59	15	27	33	24	9	31	16	39	11	33	53	29	17
25	33	47	54	8	9	15	18	57	47	7	40	15	40	31	14	18	25	42	27	27
26	37	23	93	12	22	18	22	55	7	40	40	40	44	9	33	25	14	81	20	1
27	47	84	69	19	38	35	48	56	35	39	50	7	40	56	46	15	31	63	49	17
28	13	27	70	33	14	8	60	29	50	18	17	10	38	65	32	24	40	18	28	1
29	19	78	24	43	2	6	54	26	14	13	21	16	49	33	39	20	39	39	19	27
30	37	29	30	48	6	8	66	13	48	32	36	7	67	47	68	13	21	49	54	7
31	29	57	47	49	28	10	54	28	6	41	46	14	52	27	24	10	53	49	27	16
32	24	80	14	28	16	6	21	37	27	33	33	32	22	46	42	19	33	53	3	3
33	37	31	28	7	37	4	38	1	28	57	24	17	50	15	17	16	41	8	35	3
34	39	45	12	47	19	14	42	24	30	34	36	6	23	21	19	1	21	60	45	5
35	9	45	54	10	29	14	46	68	34	35	47	26	41	24	47	3	68	34	52	22
36	41	60	28	55	46	50	42	35	52	37	10	6	54	37	45	29	35	45	34	38
37	44	63	45	36	28	41	50	34	32	35	24	28	29	60	33	19	65	71	20	12
38	35	56	53	30	20	26	72	37	40	57	56	3	51	48	22	31	30	47	41	20
39	12	40	62	33	16	21	27	33	25	22	34	27	59	27	24	21	38	16	62	20
40	29	49	49	7	12	4	37	64	51	36	26	10	47	41	39	26	51	51	35	1

Продолжение таблицы 1.3

№	Варианты																			
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
41	40	40	35	31	10	2	76	66	22	35	46	8	19	53	13	20	12	76	46	8
42	28	8	45	45	54	31	16	33	25	21	46	33	43	44	42	41	48	48	30	31
43	34	50	21	30	20	13	47	51	36	15	40	9	48	41	47	15	44	59	22	1
44	60	46	25	20	21	7	11	46	31	44	21	58	38	9	44	10	41	61	20	4
45	21	22	58	22	26	31	33	56	63	31	56	21	21	48	31	13	68	37	36	4
46	37	34	4	24	59	5	37	54	29	42	52	10	40	5	42	8	38	47	45	36
47	15	71	58	32	17	12	54	38	34	43	26	1	50	20	38	28	26	46	46	2
48	17	36	53	41	36	48	59	19	48	13	39	41	15	37	18	26	47	45	36	3
49	41	59	37	82	1	19	53	45	17	22	24	19	46	79	33	1	24	50	34	22
50	39	46	36	18	3	14	76	33	36	36	37	33	36	48	8	4	16	8	34	7

Пример решения

Рассчитаем число интервалов по формуле

$$k = 5 \cdot \ln \frac{n}{10} = 5, \quad (1.1)$$

где n - число наблюдений.

Рассчитаем длину интервала

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}, \quad (1.2)$$

где x_{\max} - максимальное значение x ;

x_{\min} - минимальное значение x .

$$k = 5 \cdot \ln \frac{120}{10} = 12,4.$$

Предпочтительнее выбирать число интервалов нечётным, так как при чётном числе интервалов и островершинном распределении в центре гистограммы окажутся два столбца и середина кривой распределения предварительно уплотняется.

Принимаем $k=11$

Рассчитываем длину интервалов

$$\Delta X = \frac{26,06 - 1,53}{11} = 2,23$$

Для того чтобы построить гистограмму распределения достигнутых износов, необходимо рассчитать относительную частоту попаданий в интервал

$$q_i(x) = \frac{n_i}{n \cdot \Delta X}, \quad (1.3)$$

где n_i - число попаданий в интервал;
 n - число наблюдений.

Результаты расчёта $q_i(x)$ сведём в таблицу 1.4 и изобразим гистограмму (рис. 1.1).

Таблица 1.4 - Относительная частоты попаданий в интервал

границ интерв.	1.53- 3.76	3.76- 5.99	5.99- 8.22	8.22- 10.45	10.45- 12.68	12.68- 14.91	14.91- 17.14	17.14- 19.3	19.37- 21.6	21.6- 23.83	23.83- 26.06
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$q_i(x)$	0,011	0,056	0,037	0,075	0,086	0,06	0,045	0,034	0,015	0,019	0,011
n_i	3	15	10	20	23	16	12	9	4	5	3

Для опытных данных необходимо выбрать закон распределения.

Проверяем для опытных данных два закона распределения Гаусса (нормальный) и Вейбулла. Выбор закона распределения производится с помощью критерия согласия Пирсона.

Критерий согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (1.4)$$

$$E_i = n(Q(x_i) - Q(x_{i-1})), \quad (1.5)$$

где $Q(x)$ - интегральная функция;
 x_i - правая граница интервала;
 x_{i-1} - левая граница интервала.

Закон распределения Гаусса

$$Q(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} dx. \quad (1.6)$$

Функция нормировочной величины $z = (x - \mu)/\sigma$ (Интеграл Лапласа) табулирована.

где x - граница интервала;

μ - математическое ожидание;

σ - среднее квадратичное отклонение.

$$q(x) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2p}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{s}\right)^2\right]}, \quad (1.7)$$

где x - середина интервала.

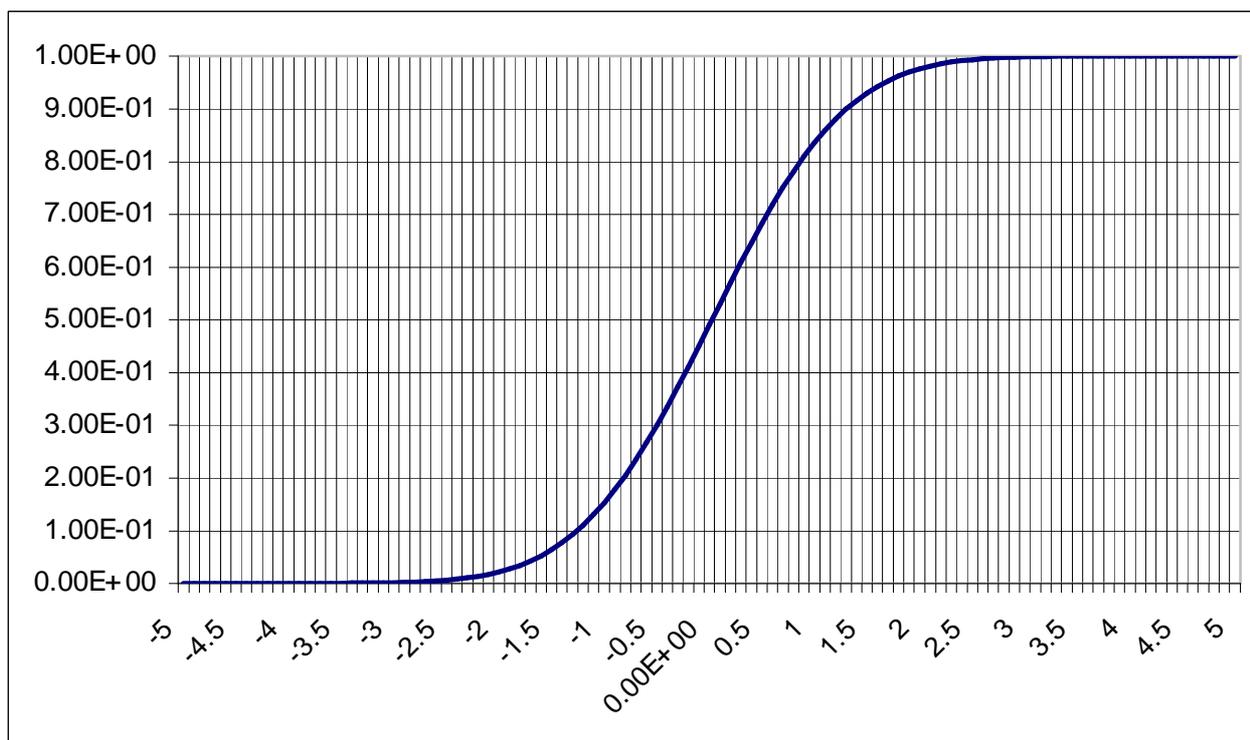


Рисунок 1.1 – Гистограмма распределения

При совпадении модели с опытными данными значение критерия равнялось бы нулю. Полученная величина критерия сравнивается с табличным значением с числом степеней свободы при определённом уровне значимости

$$V = k-r-1, \quad (1.8)$$

где r - число параметров закона распределения (для Гаусса $r=2$, для Вейбулла $r=3$).

Закон распределения Вейбулла

$$Q(x) = 1 - e \left[- \left(\frac{x-x_0}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (1.9)$$

где x_0 - минимальная граница интервала;

β - форма;

η - масштаб.

$$\beta = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot S_y} \cdot 0,986, \quad (1.10)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln \cdot (x_i - x_{\min}) - \bar{y}]^2}{n-1}}, \quad (1.11)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \ln(x_i - x_{\min}). \quad (1.12)$$

$$\eta = e \left(\bar{y} + \frac{0,577226}{\beta} \right) \quad (1.13)$$

$$q(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-x_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e \left[- \left(\frac{x-x_0}{\eta} \right)^\beta \right]. \quad (1.14)$$

Экспоненциальный закон распределения

$$Q(x) = 1 - \exp(-\lambda_0 x), \quad (1.15)$$

$$\lambda_0 = n / \sum x_i, \quad (1.16)$$

$$q(x) = \lambda_0 \exp(-\lambda_0 x), \quad (1.17)$$

Значения $Q(x)$ и $q(x)$ сведены в табл. 1.5.

Рассчитаем критерий согласия для обоих законов распределения.

Закон распределения Гаусса

$$E_1 = 120(0,05951 - 0,02394) = 4,2684$$

$$E_2 = 120(0,12725 - 0,05951) = 8,1288$$

$$E_3 = 120(0,23576 - 0,12725) = 13,0212$$

$$E_4 = 120(0,38187 - 0,23576) = 17,5332$$

$$E_5 = 120(0,54732 - 0,38187) = 19,854$$

$$E_6 = 120(0,70483 - 0,54732) = 18,9012$$

$$E_7 = 120(0,83092 - 0,70483) = 15,1308$$

$$E_8 = 120(0,91578 - 0,83092) = 10,1832$$

$$E_9 = 120(0,96381 - 0,91578) = 5,7636$$

$$E_{10} = 120(0,98666 - 0,96381) = 2,742$$

$$E_{11} = 120(0,99580 - 0,98666) = 1,0968$$

Критерий согласия

$$\begin{aligned} c^2 = & \frac{(3-4,2684)^2}{4,2684} + \frac{(15-8,1288)^2}{8,1288} + \frac{(10-13,0212)^2}{13,0212} + \frac{(20-17,5332)^2}{17,5332} + \\ & + \frac{(23-19,854)^2}{19,854} + \frac{(16-18,9012)^2}{18,9012} + \frac{(12-15,1308)^2}{15,1308} + \frac{(9-10,1832)^2}{10,1832} + \\ & + \frac{(4-5,7636)^2}{5,7636} + \frac{(5-2,742)^2}{2,742} + \frac{(3-1,0968)^2}{1,0968} = 14,6638 \end{aligned}$$

Таблица 1.5 - Параметры распределений

границы интервалов	Q(x)г	Xi-Xmin	Q(x)в	середина интервалов	q(x)г	Xi-Xmin	q(x)в
1	2	3	4	5	6	7	8
1,5321	0,02394	0,00000	0,01138	2,64710	0,01570	1,11499	0,02975
3,7621	0,05951	2,22999	0,07757	4,87710	0,03020	3,34499	0,05495
5,9921	0,12725	4,45997	0,19926	7,10710	0,04871	5,57499	0,07143
8,2221	0,23576	6,68996	0,35740	9,33710	0,06588	7,80499	0,07582

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3	4	5	6	7	8
12,6820	0,54732	11,14993	0,67861	13,79700	0,07110	12,26489	0,05498
14,9120	0,70483	13,37991	0,80101	16,02700	0,05673	14,49489	0,03877
17,1420	0,83092	15,60990	0,88766	18,25700	0,03796	16,72489	0,02434
19,3720	0,91578	17,83988	0,94230	20,48700	0,02130	18,95489	0,01364
21,6020	0,96381	20,06987	0,97309	22,71700	0,01003	21,18489	0,00684
23,8320	0,98666	22,29986	0,98863	24,94500	0,00396	23,41289	0,00307
26,0620	0,99580	24,52984	0,99565				

$$V = 11 - 2 - 1 = 8,$$

$\alpha = 0,05$ - уровень значимости.

Закон распределения Вейбулла

$$y = 2,21655; \quad S_y = 0,58195; \quad \beta = 2,175097; \quad \eta = 11,96439.$$

$$E_1 = 120(0,07757 - 0,01138) = 7,9428$$

$$E_2 = 120(0,19926 - 0,07757) = 14,6028$$

$$E_3 = 120(0,35740 - 0,19926) = 18,9768$$

$$E_4 = 120(0,52542 - 0,35740) = 20,1624$$

$$E_5 = 120(0,67861 - 0,52542) = 18,3828$$

$$E_6 = 120(0,80101 - 0,67861) = 14,688$$

$$E_7 = 120(0,88766 - 0,80101) = 10,398$$

$$E_8 = 120(0,9423 - 0,88766) = 6,5568$$

$$E_9 = 120(0,97309 - 0,9423) = 3,6948$$

$$E_{10} = 120(0,98863 - 0,97309) = 1,8648$$

$$E_{11} = 120(0,99565 - 0,98863) = 0,8424$$

Критерий согласия

$$\begin{aligned} \chi^2 = & \sum_{i=1}^{11} \frac{(n_i - E_i)^2}{E_i} = \frac{(3 - 7,9428)^2}{7,9428} + \frac{(15 - 14,6028)^2}{14,6028} + \\ & + \frac{(10 - 18,9768)^2}{18,9768} + \frac{(20 - 20,1624)^2}{20,1624} + \frac{(23 - 18,3828)^2}{18,3828} + \frac{(16 - 14,688)^2}{14,688} + \\ & + \frac{(12 - 10,398)^2}{10,398} + \frac{(9 - 6,5568)^2}{6,5568} + \frac{(4 - 3,6948)^2}{3,6948} + \frac{(5 - 1,8648)^2}{1,8648} + \\ & + \frac{(3 - 0,8424)^2}{0,8424} = 20,59 \end{aligned}$$

$$V = 11 - 3 - 1 = 7,$$

$\alpha = 0,05$.

Оценим принятие для наших опытных данных или закона Гаусса или закона Вейбулла.

$c_{расч}^2 = 14,66 \leq 15,5 = c_{табл}^2$ при заданном уровне значимости. Так как расчётное значение критерия согласия меньше табличного, то делаем вывод, что опытные данные не противоречат выбранному закону распределения Гаусса.

Закон распределения Вейбулла

$c_{расч}^2 = 20,59 \geq 14,1 = c_{табл}^2$ при заданном уровне значимости.

Так как расчётное значение критерия согласия больше табличного, то делаем вывод, что, опытные данные противоречат выбранному закону распределения Вейбулла.

1.2 Оценка показателей надежности невосстанавливаемого объекта

Теоретические сведения

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\hat{P}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (1.18)$$

где $n(t)$ – число изделий, не отказавших к моменту времени t ;

N – число изделий, поставленных на испытания;

$\hat{P}(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы изделия.

Для вероятности отказа по статистическим данным справедливо соотношение

$$\hat{q}(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (1.19)$$

где $N - n(t)$ – число изделий, отказавших к моменту времени t ;

$\hat{q}(t)$ – статистическая оценка вероятности отказа изделия.

Частота отказов по статистическим данным об отказах определяется выражением

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.20)$$

где $n(t)$ - число отказавших изделий на участке времени $(t, t+\Delta t)$;

$\hat{f}(t)$ - статистическая оценка частоты отказов изделия;

Δt - интервал времени.

Интенсивность отказов по статистическим данным об отказах определяется формулой

$$\hat{I}(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)}, \quad (1.21)$$

где $n(t)$ - число изделий, не отказавших к моменту времени t ;

$\Delta n(t)$ - число отказавших изделий на участке времени $(t, t+\Delta t)$;

$\hat{I}(t)$ - статистическая оценка интенсивности отказов изделия.

Среднее время безотказной работы изделия по статистическим данным оценивается выражением

$$\hat{m}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.22)$$

где t_i - время безотказной работы i -го изделия;

N - общее число изделий, поставленных на испытания;

\hat{m}_t - статистическая оценка среднего времени безотказной работы изделия.

Для определения \hat{m}_t по формуле (1.22) необходимо знать моменты выхода из строя всех N изделий. Можно определять \hat{m}_t из уравнения

$$\hat{m}_t \approx \sum_{i=1}^m n_i t_{cp.i}, \quad (1.23)$$

где n_i - количество вышедших из строя изделий в i - ом интервале времени;

$$t_{cp.i} = (t_{i-1} + t_i) / 2;$$

$$m = t_k / t;$$

$$t = t_{i+1} - t_i;$$

t_{i-1} - время начала i - го интервала;

t_i - время конца i - го интервала;

t_k - время, в течение которого вышли из строя все изделия;

t -интервал времени.

Дисперсия времени безотказной работы изделия по статистическим данным определяется формулой

$$\hat{D}_t = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{m}_t)^2, \quad (1.24)$$

где \hat{D}_t - статистическая оценка дисперсии времени безотказной работы изделия.

Решение типовых задач

Задача 1.2.1

На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп, за 3000 часов отказало 80 ламп. Требуется определить $\hat{P}(t)$, $\hat{q}(t)$ при $t = 3000$ час.

Исходные данные

$$t = 3000 + 10 \cdot N$$

число отказавших ламп: $80 + 10 \cdot N$.

Пример решения

В данном случае $N = 1000$; $n(t) = 1000 - 80 = 920$; $N - n(t) = 1000 - 920 = 80$. По формулам (1.18) и (1.19) определяем

$$\hat{P}(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{920}{1000} = 0,92$$

$$\hat{q}(3000) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08$$

Задача 1.2.2

На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 часов отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000 - 4000 часов отказало еще 50 ламп. Требуется определить статистическую оценку частоты и интенсивности отказов электронных ламп в промежутке времени 3000 - 4000 часов.

Исходные данные

Число отказавших ламп: $80 + 10 \cdot N$;

число отказавших ламп в промежутке 3000 – 4000 час.: $50 + 10 \cdot N$.

Пример решения

В данном случае $N = 1000$; $t = 3000$ час; $t = 1000$ час; $n(t) = 50$; $n(t) = 920$.

По формулам (1.20) и (1.21) находим

$$\hat{f}(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час};$$

$$\hat{I}(3000) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} = \frac{100}{100 \cdot 920} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}.$$

Задача 1.2.3

На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i - время безотказной работы i - го изделия) : $t_1 = 280$ час; $t_2 = 350$ час; $t_3 = 400$ час; $t_4 = 320$ час; $t_5 = 380$ час; $t_6 = 330$ час.

Исходные данные

$$t_1 = 220 + 5 \cdot N; t_2 = 350 + 5 \cdot N; t_3 = 400 + 5 \cdot N; t_4 = 320 + 5 \cdot N; t_5 = 380 + 5 \cdot N; t_6 = 330 + 5 \cdot N$$

Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Пример решения

По формуле (1.22) имеем

$$\hat{m}(t) = \frac{280 + 350 + 400 + 320 + 380 + 330}{6} = \frac{2060}{6} = 343,3 \text{ час.}$$

Задача 1.2.4

За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 7 отказов. Время восстановления составило:

$t_1 = 12$ мин.; $t_2 = 23$ мин.; $t_3 = 15$ мин.; $t_4 = 9$ мин.; $t_5 = 17$ мин.; $t_6 = 28$ мин.; $t_7 = 25$ мин.; $t_8 = 31$ мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры $m_{\text{в}}$.

Исходные данные

$t_1 = 12 + 1N$ мин.; $t_2 = 23 + 2N$ мин.; $t_3 = 15$ мин.; $t_4 = 9$ мин.; $t_5 = 17$ мин.; $t_6 = 28 + 2N$ мин.; $t_7 = 25 + 2N$ мин.; $t_8 = 31 + 1N$ мин.

Пример решения

$$\hat{m}_{\text{в}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ мин.}$$

1.3 Расчет показателей надежности невосстанавливаемого объекта при известном законе распределения времени безотказной работы

Теоретические сведения

Выпишем формулы, по которым определяются количественные характеристики надежности изделия

$$p(t) = \exp\left(-\int_0^t I(t)dt\right) = 1 - \int_0^t f(t)dt; \quad (1.25)$$

$$q(t) = 1 - p(t); \quad (1.26)$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}; \quad (1.27)$$

$$I(t) = \frac{f(t)}{p(t)}; \quad (1.28)$$

$$m_t = \int_0^{\infty} p(t)dt, \quad (1.29)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до t ;

$q(t)$ – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t ;

$f(t)$ – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия T ;

$I(t)$ – интенсивность отказов изделия;

m_t – среднее время безотказной работы изделия.

Выше приведенные формулы для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$p(t) = e^{-I t}; \quad (1.30)$$

$$q(t) = 1 - e^{-lt}; \quad (1.31)$$

$$f(t) = l \cdot e^{-lt}; \quad (1.32)$$

$$l(t) = \frac{l \cdot e^{-lt}}{e^{-lt}} = l; \quad (1.33)$$

$$m_t = \frac{1}{l}. \quad (1.34)$$

Формулы для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$p(t) = 0,5 - \Phi(U); U = \frac{t - m_t}{s_t}; \quad (1.35)$$

$$q(t) = 0,5 + \Phi(U); \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \cdot \int_0^u e^{-\frac{U^2}{2}} dU; \quad (1.36)$$

$$f(t) = \frac{\Phi(U)}{s_t}; \Phi(U) = \frac{1}{2p} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad (1.37)$$

$$l(t) = \frac{\Phi(U)}{s_t} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}, \quad (1.38)$$

где $\Phi(U)$ - функция Лапласа, обладающая свойствами;

$$\Phi(0)=0; \quad (1.39)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U); \quad (1.40)$$

m_t - среднее значение случайной величины T ;

t^2 - дисперсия случайной величины T ;

T - время безотказной работы изделия.

Формулы для закона распределения Вейбулла времени безотказной работы изделия имеют вид

$$p(t) = e^{-at^2}; \quad (1.42)$$

$$q(t) = 1 - e^{-at^2}; \quad (1.43)$$

$$f(t) = akt^{k-1} \cdot p(t); \quad (1.44)$$

$$I(t) = akt^{k-1}; \quad (1.45)$$

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \cdot \Gamma(\frac{1}{k})}{a^{\frac{1}{k}}}; \quad (1.46)$$

где a, k - параметры закона распределения Вейбулла.

Формулы для закона распределения Релея времени безотказной работы изделия имеют вид

$$p(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2S_t^2}\right); \quad (1.47)$$

$$q(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2S_t^2}\right); \quad (1.48)$$

$$f(t) = \frac{t}{S_t^2} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2S_t^2}\right); \quad (1.49)$$

$$I(t) = \frac{t}{S_t^2}; \quad (1.50)$$

$$m(t) = S_t \cdot \sqrt{\frac{p}{2}}; \quad (1.51)$$

где t - мода распределения случайной величины T ;

T - время безотказной работы изделия.

Задача 1.2.5

Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента $p(t)$, $q(t)$, $f(t)$, m_t для $t=1000$ час.

Пример решения:

Используем формулы (1.30), (1.31), (1.32), (1.33) для $p(t)$, $q(t)$, $f(t)$, m_t .

Вычислим вероятность безотказной работы

$$p(t) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t};$$

$$p(1000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0,025} = 0,9753.$$

Вычислим вероятность отказа $q(1000)$

$$q(1000) = 1 - p(1000) = 0,0247.$$

Вычислим частоту отказов

$$f(t) = \lambda \cdot p(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t};$$

$$f(1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9753 = 2,439 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

Вычислим среднее время безотказной работы

$$m(t) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час}.$$

Исходные данные

Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $I = (2,3 + 0,1 \cdot N) \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$.

Задача 1.2.6

Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000$ час, $s_t = 2000$ час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t для $t = 10000$ час.

Пример решения

Воспользуемся формулами (1.35), (1.36), (1.37), (1.38) для $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t .

Вычислим вероятность безотказной работы

$$p(t) = 0.5\Phi(U);$$

$$U = (10000 - 8000) / 2000 = 1; \Phi(1) = 0.3413;$$

$$p(10000) = 0.5 - 0.3413 = 0.1587.$$

Определим частоту отказа $f(t)$

$$f(10000) = (1) / 2000 = 0.242 / 2000 = 12,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Рассчитаем интенсивность отказов $I(t)$

$$I(10000) = \frac{12,1 \cdot 10^{-5}}{0,1587} = 76,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Среднее время безотказной работы элемента

$$m_t = 8000 \text{ час}.$$

Исходные данные

Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000 + 20 \cdot N$ час, $s_t = 2000 + 10 \cdot N$ час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t для $t=10000$ час.

Задача 1.2.7

Время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t для $t=1000$ час, если параметр распределения $s_t=1000$ час.

Пример решения:

Воспользуемся формулами (1.47), (1.48), (1.49), (1.50), (1.51) для $p(t)$, $f(t)$, m_t , $I(t)$.

Вычислим вероятность безотказной работы $p(t)$

$$P(1000) = \exp\left(-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}\right) = e^{-0,5} = 0,606$$

Определим частоту отказа $f(t)$

$$f(1000) = 10000 \cdot 0,606 / 1000^2 = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час.}$$

Рассчитаем интенсивность отказов

$$I(1000) = 1000 / 1000^2 = 10^{-3} \text{ 1/час.}$$

Определим среднее время безотказной работы изделия, час.

$$m_t = 1000 \cdot 1,253 = 1253 \text{ час.}$$

Исходные данные

Время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности

изделия $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t для $t=1000$ час, если параметр распределения $s_t = 1300 + 20 \cdot N$ час.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.2.9

Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров автомобильного двигателя в течение $20 + 2 \cdot N$ час равна 0.9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени $t = 120 + 20 \cdot N$ час., а также среднее время безотказной работы.

Задача 1.2.10

Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $120 + 3 \cdot N$ час., частоту отказов для момента времени $t = 120 + 3 \cdot N$ час. и интенсивность отказов.

Задача 1.2.11

Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами

$m_t = 8000 + 30 \cdot N$ час., $s_t = 1000 + 20 \cdot N$ час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $I(t)$, m_t для $t = 8000 + 30 \cdot N$ час.

Задача 1.2.12

Время безотказной работы прибора подчинено закону Релея с параметром $s_t = 1860$ час. Требуется вычислить $P(t)$, $f(t)$, $I(t)$ для $t = 1000 + 10 \cdot N$ час и среднее время безотказной работы прибора.

Задача 1.2.13

Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами $K = 2,6 + 0,1 \cdot N$, $a = 1,65 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{час}}$.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности $P(t)$, $f(t)$, $I(t)$ для $t=150$ час. и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задача 1.2.14

Вероятность безотказной работы изделия в течение $t=1000$ час. $P(1000) = 0,92 + 0,001 \cdot N$. Время исправной работы подчинено закону Релея. Требуется определить количественные характеристики надежности $f(t)$, $I(t)$, m_t .

Задача 1.2.15

Среднее время исправной работы изделия равно 1260 час. Время исправной работы подчинено закону Релея. Необходимо найти его количественные характеристики надежности $P(t)$, $f(t)$, $I(t)$ для $t = 1000 + 10 \cdot N$ час.

Задача 1.2.16

В результате анализа данных об отказах изделия установлено, что частота отказов имеет вид $f(t) = 2e^{-t} \cdot (1 - e^{-t})$. Необходимо найти количественные характеристики надежности $P(t)$, $I(t)$, m_t .

Задача 1.2.17

В результате анализа данных об отказах изделий установлено, что вероятность безотказной работы выражается формулой $P(t) = 3e^{-t} - 3e^{-2t} + e^{-3t}$.

Требуется найти количественные характеристики надежности $P(t)$, $I(t)$, m_t .

Задача 1.2.18

Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов прибора при $t = 1300$ часов работы, если при испытаниях получено значение среднего времени безотказной работы $m_t = 1500$ час. и среднее квадратическое отклонение $s_t = 100$ час.

1.4 Расчет элементной надежности системы способом преобразования структуры

Известны вероятности отказов элементов системы, представленные в табл. 1.6. Необходимо рассчитать вероятность отказа системы способом преобразования структуры "звезда-треугольник" и "треугольник-звезда"/1/.

Таблица 1.6 – Надежность элементов системы

Вари- ант	Рисунок	Вероятности отказов						
		3	4	5	6	7	8	9
		1	2	3	4	5	6	7
1 2	1.2 1.3	0,10	0,10	0,50	0,10	0,30	0,10	0,40
3 4	1.2 1.3	0,10	0,10	0,40	0,20	0,40	0,20	0,30
5 6	1.2 1.3	0,05	0,05	0,30	0,30	0,50	0,10	0,20
7 8	1.2 1.3	0,05	0,05	0,20	0,40	0,60	0,20	0,40
9 10	1.2 1.3	0,10	0,05	0,10	0,10	0,30	0,10	0,30
11 12	1.2 1.3	0,10	0,05	0,50	0,20	0,40	0,20	0,20
13 14	1.2 1.3	0,05	0,10	0,40	0,30	0,60	0,30	0,40
15 16	1.2 1.3	0,05	0,10	0,30	0,40	0,50	0,30	0,30
17 18	1.2 1.3	0,12	0,06	0,20	0,10	0,40	0,10	0,20
19 20	1.2 1.3	0,12	0,12	0,10	0,20	0,30	0,20	0,40
21 22	1.2 1.3	0,06	0,06	0,50	0,30	0,40	0,20	0,30
23 24	1.2 1.3	0,06	0,12	0,40	0,40	0,50	0,20	0,20
25 26	1.2 1.3	0,07	0,12	0,30	0,10	0,60	0,10	0,40

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	1.2	0,12	0,07	0,20	0,20	0,50	0,20	0,30
28	1.3							
29	1.2	0,12	0,05	0,10	0,30	0,40	0,10	0,20
30	1.3							
31	1.2	0,05	0,11	0,50	0,40	0,30	0,30	0,40
32	1.3							

Схемы систем:

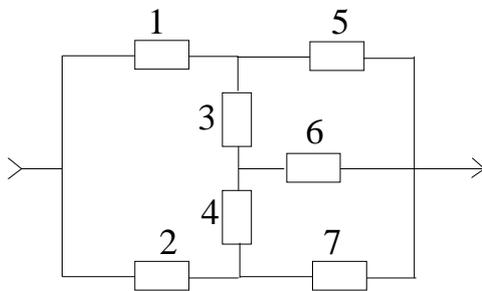


Рисунок 1.2

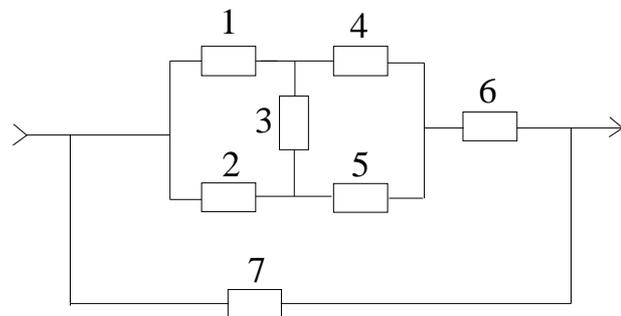


Рисунок 1.3

1.5 Расчет надежности системы с постоянным резервированием

Теоретические сведения

При постоянном резервировании резервные элементы 1,2,... соединены параллельно с основным (рабочим) элементом в течение всего периода работы системы. Все элементы соединены постоянно, перестройка схемы при отказах не происходит, отказавший элемент не отключается.

Вероятность отказа системы $q_c(t)$ определяется формулой

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^m q_j(t); \quad (1.52)$$

где $q_j(t)$ - вероятность отказа j - го элемента.

Вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^m (1 - P_j(t)), \quad (1.53)$$

где $P_j(t)$ - вероятность безотказной работы j - го элемента.

Если $P_j(t) = P(t)$, $j = 0, 1, \dots, m$, то

$$\begin{aligned} q_c(t) &= q^{m+1}(t); \\ P_c(t) &= 1 - (1 - P(t))^{m+1}. \end{aligned} \quad (1.54)$$

При экспоненциальном законе надежности отдельных элементов имеем

$$\begin{aligned} P_j(t) &= P(t) = e^{-lt}; \\ q_c(t) &= (1 - e^{-lt})^{m+1}; \\ P_c(t) &= 1 - (1 - e^{-lt})^{m+1}; \\ m_{tc} &= \frac{1}{l} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i}. \end{aligned} \quad (1.55)$$

Резервирование называется общим, если резервируется вся система, состоящая из последовательного соединения n элементов.

Определим количественные характеристики надежности системы с общим резервированием (резервные цепи включены постоянно).

Запишем вероятность безотказной работы j - ой цепи

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n P_{ij}(t); j = 1, 2, \dots, n, \quad (1.56)$$

где $P_{ij}(t)$, $j=0, 1, 2, \dots, n$;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ - вероятность безотказной работы элемента.

Вероятность отказа j - ой цепи

$$q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t). \quad (1.57)$$

Вероятность отказа системы с общим резервированием

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^m (1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t)). \quad (1.58)$$

Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^m (1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t)). \quad (1.59)$$

Частный случай: основная и резервные цепи имеют одинаковую надежность, т.е.

$$P_{ij}(t) = P_i(t). \quad (1.60)$$

Тогда

$$q_c(t) = (1 - \prod_{i=1}^n P_i(t))^{m+1}. \quad (1.61)$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n P_i(t))^{m+1}. \quad (1.62)$$

Рассмотрим экспоненциальный закон надежности, т. е.

$$P_i(t) = e^{-it}, \quad (1.63)$$

$$q_c(t) = (1 - e^{-0t})^{m+1}, \quad (1.64)$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-I_o t})^{m+1}, \quad (1.65)$$

$$I_o = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (1.66)$$

где I_o - интенсивность отказов цепи, состоящей из n элементов.

Частота отказов системы с общим резервированием

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = I_o \cdot (m+1) \cdot e^{-I_o t} \cdot (1 - e^{-I_o t})^m. \quad (1.67)$$

Интенсивность отказов системы с общим резервированием

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{I_o \cdot (m+1) \cdot e^{-I_o t} \cdot (1 - e^{-I_o t})^m}{1 - (1 - e^{-I_o t})^{m+1}}. \quad (1.68)$$

Среднее время безотказной работы резервированной системы

$$m_{tc} = T_o \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j}, \quad (1.69)$$

где $T_o = 1/I_o$ - среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

Решение типовых задач

Задача 1.5.1

Система состоит из 10 равнонадежных элементов, среднее время безотказной работы элемента $m_t = 1000$ час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы и основная и резервная системы равнонадежны. Необходимо найти среднее время безотказной работы системы m_{tc} , а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $I_c(t)$ в момент времени $t = 50$ час в следующих случаях:

а) нерезервированной системы,

б) дублированной системы при постоянно включенном резерве.

Решение

а)
$$I_c = \sum_{i=1}^n I_i,$$

где I_c - интенсивность отказов системы;

I_i - интенсивность отказов i - го элемента;

$n = 10$.

$$I_i = \frac{1}{m_i} = \frac{1}{1000} = 0,001 \text{ 1/час};$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

$$I_c = I_i \cdot n = 0,001 \cdot 10 = 0,01 \text{ 1/час};$$

$$m_{tc} = \frac{1}{I_c} = 100 \text{ час};$$

$$f_c(t) = I_c(t) \cdot P_c(t);$$

б)
$$m_{tc} = \frac{1}{I_c} \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j};$$

$$m = 1;$$

$$m_{tc} = \frac{1}{0,01} \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 150 \text{ час};$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-l_o t})^{m+1};$$

$$l_o = I_c = 0,01 \text{ 1/час};$$

$$P_c = 1 - (1 - e^{-l_o t})^2 = 2e^{-l_o t} - e^{-2l_o t};$$

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = 2l_o \cdot e^{-l_o t} \cdot (1 - e^{-l_o t});$$

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{2l_o(1 - e^{-l_o t})}{2 - e^{-l_o t}};$$

Задача 1.5.2

В системе телеуправления применено дублирование канала управления. Интенсивность отказов канала $I = 10^{-2}$ 1/час. Рассчитать вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ при $t=10$ час, среднее время безотказной работы m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$ системы.

Пример решения

В данном случае $n=1$; $\lambda_i = \lambda$; $I_o = I \cdot n = I$; $m=1$.

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-t})^2;$$
$$P_c(10) = 1 - (1 - e^{-0,1})^2.$$

Тогда

$$e^{-0,1} = 0,9048.$$

Тогда

$$P_c(10) = 1 - (1 - 0,9048)^2 = 1 - 0,0952^2 = 0,9909.$$

Определим m_{tc} , час

$$m_{tc} = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^1 \frac{1}{1+i} = \frac{1}{I} \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 150 \text{ час}.$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$. Получим

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = 2I e^{-It} \cdot (1 - e^{-It});$$

Определим интенсивность отказов $\lambda_c(t)$

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{2I e^{-It} \cdot (1 - e^{-It})}{e^{-It} \cdot (2 - e^{-It})} = \frac{2I \cdot (1 - e^{-It})}{2 - e^{-It}};$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.5.3

Приемник состоит из трех. блоков: УВЧ, УПЧ и УНЧ. Интенсивности отказов этих блоков соответственно равны: $I_1 = 4 \cdot N \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{час}}$; $I_2 = 2,5N \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{час}}$; $I_3 = 3 \cdot N \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{час}}$. Требуется рассчитать вероятность безотказной работы приемника при $t=100$ час для следующих случаев:

а) резерв отсутствует; б) имеется общее дублирование приемника в целом.

Задача 1.5.4

Нерезервированная система управления состоит из $n = 4000 + 10 \cdot N$ элементов. Известна требуемая вероятность безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 100$ час. Необходимо рассчитать допустимую среднюю интенсивность отказов одного элемента, считая элементы равнонадежными, для того чтобы приближенно оценить достижение заданной вероятности безотказной работы при отсутствии профилактических осмотров в следующих случаях: а) резервирование отсутствует ; б) применено общее дублирование.

1.6 Расчет надежности системы с поэлементным резервированием

Теоретические сведения

При поэлементном резервировании резервируются отдельно элементы системы. Определим количественные характеристики надежности системы.

Запишем вероятность отказа i - ой группы

$$q_i(t) = \prod_{j=0}^m q_{ij}(t), \quad (1.70)$$

где $q_{ij}(t)$ - вероятность отказа элемента на интервале времени $(0, t)$.

Запишем вероятность безотказной работы j -ой группы. Получим

$$P_i(t) = 1 - q_i(t) = 1 - \prod_{j=0}^m (1 - P_{ij}(t)), \quad (1.71)$$

где $P_{ij}(t)$ - вероятность безотказной работы элемента на интервале времени $(0,t)$;

m_j - кратность резервирования элемента j -ой группы.

Запишем вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

или

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=0}^{m_j} (1 - P_{ij}(t))). \quad (1.72)$$

Для равнонадежных элементов системы и $m_j = m = \text{const}$ имеем

$$P_{ij}(t) = P(t); \quad (1.73)$$

$$P_c(t) = (1 - (1 - P(t))^{m+1})^n. \quad (1.74)$$

Если

$$P_{ij}(t) = P_i(t), \quad (1.75)$$

то формула (1.72) примет вид

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - P_i(t))^{m+1}). \quad (1.76)$$

При экспоненциальном законе надежности, когда $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^{m+1}). \quad (1.77)$$

В этом случае формула примет вид

$$P_c(t) = (1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1})^n, \quad (1.78)$$

а среднее время безотказной работы системы определяется соотношением

$$m_{tc} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (1.79)$$

Подставляя (1.78) в (1.79), получим

$$m_{tc} = \frac{(n-1)!}{l \cdot (m+1)} \cdot \sum_{j=0}^m \frac{1}{n_j \cdot (n_j + 1) \dots (n_j + n - 1)}, \quad (1.80)$$

где $n_j = (j+1)/(m+1)$.

Решение типовых задач

Задача 1.6.1

Для повышения надежности усилителя все его элементы дублированы. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы. Необходимо найти вероятность безотказной работы усилителя в течение $t = 5000 + 100 \cdot N$ час. Состав элементов нерезервированного усилителя и данные по интенсивности отказов элементов приведены в табл.1.7.

Таблица 1.7 – Данные для задачи 1.6.1

Элементы	Количество элементов	Интенсивность отказов элемента , 10^{-5} 1/час
1	2	3
Транзисторы	1	2,16N
Резисторы	5	0,23N
Конденсаторы	3	0,32N
Диоды	1	0,78N
Катушки индуктивности	1	0,09N

Пример решения

В рассматриваемом случае имеет место отдельное резервирование с кратностью $m_i = m = 1$, число элементов нерезервированного усилителя $n = 11$. Тогда, используя данные табл.1.7, на основании формулы (1.78) получим

$$P_c(5000) = \prod_{i=1}^n (1 - (e^{-I_i \cdot 5000})^2).$$

Для приближенного вычисления показательную функцию можно разложить в ряд и ограничиться первыми двумя членами разложения.

Тогда

$$\begin{aligned} P_c(5000) &\approx \prod_{i=1}^n (1 - (5000I_i)^2) \approx 1 - \sum_{i=1}^n (5000I_i)^2 = 1 - 5000^2 \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 = \\ &= 1 - 25 \cdot 10^{-6} \cdot (2,16^2 + 50,23^2 + 30,32^2 + 0,78^2 + 0,09^2) \cdot 10^{-100,985}. \end{aligned}$$

Задача 1.6.2

Нерезервированная система управления состоит из $n=5000$ элементов. Для повышения надежности системы предполагается провести отдельное дублирование элементов. Чтобы приближенно оценить возможность достижения заданной вероятности безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 10 + N$ час, необходимо рассчитать среднюю интенсивность отказов одного элемента при предположении отсутствия последствия отказов.

Пример решения

Вероятность безотказной работы системы при отдельном дублировании и равнонадежных элементах равна

$$P_c(t) = (1 - (1 - P(t))^2)^n,$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы одного элемента.

Так как должно быть

$$(1 - (1 - P(t))^2)^n \geq 0,9,$$

то:

$$P(t) \geq 1 - \sqrt[n]{1 - \sqrt[n]{0,9}}.$$

Разложив $\sqrt[n]{0,9} = (1 - 0,1)^{1/n}$ по степени $1/n$ в ряд и пренебрегая членами ряда высшего порядка малости, получим

$$(1 - 0,1)^{1/5000} \approx 1 - \frac{1}{5000} \cdot 0,1 = 1 - 2 \cdot 10^{-5}.$$

Интенсивность отказов элемента должна быть

$$I \leq \frac{1}{t} \cdot \sqrt[n]{1 - \sqrt[n]{0,9}} = \frac{1}{10} \cdot \sqrt[n]{1 - 1 + 2 \cdot 10^{-5}} \approx 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.6.3

Нерезервированная система управления состоит из $n = 4000 + 100 \cdot N$ элементов. Известна требуемая вероятность безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 100 + N$ час. Необходимо рассчитать допустимую среднюю интенсивность отказов одного элемента, считая элементы равнонадежными, для того чтобы приблизительно оценить достижение заданной вероятности безотказной работы при отсутствии профилактических осмотров в следующих случаях: а) резервирование отсутствует; б) применено отдельное (поэлементное) дублирование.

Задача 1.6.4

В радиопередатчике, состоящем из трех равнонадежных каскадов ($n=3$) применено отдельное дублирование каждого каскада. Интенсивность отказов каскадов равна $I = 5 \cdot N \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}$. Рассчитать вероятность безотказной работы $P_c(t)$ в течение времени $t = 100$ час и среднее время безотказной работы $m_{тс}$ радиопередатчика.

1.7 Резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом

Теоретические сведения

Резервированная система состоит из l отдельных систем. Для ее нормальной работы необходимо, чтобы исправными были не менее чем h систем. Кратность резервирования такой системы равна

$$m = \frac{l-h}{h} . \quad (1.81)$$

Предполагается, что основные и все резервные системы равнонадежны. Вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i P_o^{l-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_o^j(t),$$

где

$$C_l^i = \frac{l!}{i!(l-i)!} . \quad (1.82)$$

Здесь $P_o(t)$ - вероятность безотказной работы основной системы или любой резервной системы;

l - общее число основных и резервных систем;

h число систем, необходимых для нормальной работы.

Будем предполагать, что для любой отдельно взятой системы справедлив экспоненциальный закон надежности, т.е.

$$P_o(t) = e^{-l_o t} . \quad (1.83)$$

Определим среднее время безотказной работы системы. Имеем

$$m_{tc} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{1}{l_o} \cdot \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i} . \quad (1.84)$$

Решение типовых задач

Задача 1.7.1

Система электроснабжения блока ЭВМ состоит из четырех генераторов, номинальная мощность каждого из которых 18 квт. Безаварийная работа блока еще возможна, если система электроснабжения может обеспечивать потребителя мощностью 30 квт. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы энергоснабжения в течение времени $t = 600 + N$ час, среднее время безотказной работы $m_{тс}$, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $l_c(t)$ системы энергоснабжения, если интенсивность отказов каждого из генераторов 10^{-3} 1/час.

Пример решения:

Мощности двух генераторов достаточно для питания блока ЭЦВМ, так как их суммарная мощность составляет 36 квт. Это означает, что отказ системы электроснабжения еще не наступит, если откажут один или два любых генератора, т.е. имеет место случай резервирования с дробной кратностью $m = 2/2$ при общем числе устройств, равном 4. На основании формулы (1.82) имеем

$$\begin{aligned} P_c(t) &= \sum_{i=0}^2 C_4^i P_o^{4-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j C_1^j P_o^j(t) = \\ &= C_4^0 P_o^4(t) C_0^0 P_o^0(t) + C_4^1 P_o^3(t) \cdot (C_1^0 P_o^0(t) - C_1^1 P_o^1(t)) + \\ &\quad + C_4^2 P_o^2(t) \cdot (C_2^0 P_o^0(t) - C_2^1 P_o^1(t) + C_2^2 P_o^2(t)). \end{aligned}$$

Так как

$$C_4^0 = 1; C_0^0 = 1; C_4^1 = 4; C_1^0 = 1; C_1^1 = 1; C_4^2 = 6; C_2^0 = 1; C_2^1 = 2; C_2^2 = 1,$$

то

$$P_c(t) = 6P_o^2(t) - 8P_o^3(t) + 3P_o^4(t).$$

Так как $P_o(t) = \exp(-It)$, то

$$P_c(t) = 6e^{-2It} - 8e^{-3It} + 3e^{-4It}.$$

Для данных нашей задачи $It = 0,09$. Тогда

$$P_c(600) = 0,997.$$

Среднее время безотказной работы на основании формулы (1.84) будет

$$m_{tc} = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=0}^2 \frac{1}{2+i} = \frac{13}{12I} \approx 7200 \text{час.}$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$. Имеем

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = 12I e^{-2t} - 24I e^{-3t} + 12I e^{-4t}.$$

Определим интенсивность отказов $I_c(t)$. Получим

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{12I \cdot (1 - 2e^{-t} + e^{-2t})}{6 - 8e^{-t} + 3e^{-2t}}.$$

Задача 1.7.2

Для повышения точности измерения некоторой величины применена схема группирования приборов из пяти по три, т.е. результат измерения считается верным по показанию среднего (третьего) прибора. Требуется найти вероятность безотказной работы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc} такой системы, а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $I_c(t)$ системы, если интенсивность отказов каждого прибора $I = 0,4 \cdot N \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}$.

Пример решения

В данном случае измерительная система отказывает в том случае, если откажут из пяти приборов три и более, т.е. имеет место общее резервирование дробной кратности, когда общее число приборов $l = 5$, число приборов, необходимых для нормальной работы, $h = 3$, а кратность резервирования $m = 2/3$.

Используя формулу (1.82), получаем

$$\begin{aligned} P_c(t) &= \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i P_o^{l-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_o^j(t) = \sum_{i=0}^2 C_5^i P_o^{5-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_o^j(t) = \\ &= C_5^0 P_o^5(t) \cdot C_0^0 P_o^0(t) + C_5^1 P_o^4(t) \cdot (C_1^0 P_o^0(t) - C_1^1 P_o^1(t)) + C_5^2 P_o^3(t) \cdot (C_2^0 P_o^0(t) + C_2^2 P_o^2(t)). \end{aligned}$$

Так как

$$C_5^0 = 1; C_0^0 = 1; C_5^1 = 5; C_1^0 = 1; C_1^1 = 1; C_5^2 = 10; C_2^0 = 1; C_2^1 = 2; C_2^2 = 1,$$

то

$$P_c(t) = P_0^5(t) + 5P_0^4(t)1P_0(t) + 10P_0^3(t)12P_0(t) + P_0^2(t) = 6P_0^5(t)15P_0^4(t) + 10P_0^3(t).$$

Так как $P_0(t) = \exp(-lt)$, то

$$P_c(t) = 6e^{-5lt} 15e^{-4lt} + 10e^{-3lt}.$$

Среднее время безотказной работы на основании формулы (1.84) будет

$$m_{tc} = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=0}^2 \frac{1}{3+i} = \frac{1}{I_0} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right) = \frac{47}{60I} = 1958 \text{ час.}$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$. Имеем

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = -30Ie^{-5lt} - 60Ie^{-4lt} + 30Ie^{-3lt}.$$

Определим $I_c(t)$. Получим

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{30I \cdot (1 - e^{-lt})^2}{6e^{-2lt} - 15e^{-lt} + 10}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.7.3

Интенсивность отказов измерительного прибора $I = 0,83 \cdot N \cdot 10^3 \text{ } 1/\text{час}$. Для повышения точности измерения применена схема группирования из трех по два ($m=1/2$). Необходимо определить вероятность безотказной работы схемы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы схемы m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$ схемы.

Задача 1.7.4

Автомобильный двигатель имеет $l=4$ свечи зажигания по одной на каждый цилиндр. Интенсивность отказов свечи $I = 2 \cdot N \cdot 10^3 \text{ } 1/\text{час}$, а длительность работы двигателя в течение всего путешествия $t = 20 + N \text{ час}$. Предполагается, что автомобиль может ехать также при одном неработающем цилиндре. Необходимо определить вероятность безотказной работы двигателя $P_c(t)$, среднее время безотказной работы двигателя m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$ двигателя. Какова вероятность того, что автомобиль доставит туристов в пункт назначения без замены свечей?

Задача 1.7.5

В вычислительном устройстве применено резервирование с дробной кратностью “один из трех”. Интенсивность отказов одного нерезервированного блока равна: $I = 4 \cdot N \cdot 10^3 \text{ } 1/\text{час}$.

Требуется рассчитать вероятность безотказной работы устройства $P_c(t)$ и среднее время безотказной работы m_{tc} резервированного вычислительного устройства.

1.8 Скользящее резервирование при экспоненциальном законе надежности

Теоретические сведения

Вероятность безотказной работы резервированной системы определяется соотношением

$$P_c(t) = e^{-I_0 t} \cdot \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(I_0 t)^i}{i!}, \quad (1.85)$$

где I_0 - интенсивность отказов нерезервированной системы;

n - число элементов основной системы;

m_0 - число резервных элементов, находящихся в ненагруженном резерве.

В этом случае кратность резервирования

$$m = \frac{m_0}{n}. \quad (1.86)$$

Среднее время безотказной работы резервированной системы определяется формулой

$$m_{tc} = T_0 (m_0 + 1), \quad (1.87)$$

где T_0 - среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

Решение типовых задач

Задача 1.8.1

Цифровая вычислительная машина состоит из 1024 однотипных ячеек и сконструирована так, что есть возможность заменить любую из отказавших ячеек. В составе ЗИПа имеется 3 ячейки, каждая из которых может заменить любую отказавшую. Требуется определить вероятность безотказной работы ЦВМ $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$. Также требуется определить $P_c(t)$ при $t=10000$ час. Известно, что интенсивность отказов ячейки $I = 0,12 \cdot N \cdot 10^6 \frac{1}{\text{час}}$. Под отказом будем понимать событие, когда ЦВМ не может работать из-за отсутствия ЗИПа, т.е. когда весь ЗИП израсходован и отказала еще одна ячейка памяти ЦВМ.

Пример решения

Так как любая ячейка из состава ЗИПа может заменить любую отказавшую ячейку ЦВМ, то имеет место “скользящее” резервирование. В нашем случае число элементов основной системы $n=1024$, число резервных элементов $m_0=3$. На основании формулы (1.85) имеем

$$P_c(t) = e^{-I_o t} \cdot \sum_{i=0}^3 \frac{(I_o t)^i}{i!} = e^{-I_o t} \cdot \left(1 + I_o t + \frac{I_o^2 t^2}{2} + \frac{I_o^3 t^3}{6}\right).$$

Определим m_{tc} . Получим

$$m_{tc} = T_o \cdot (m_o + 1); T_o = \frac{1}{I_o}$$

или

$$m_{tc} = \frac{1}{1,23 \cdot 10^{-4}} \cdot (3 + 1) \approx 32500 \text{ час.}$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$. Имеем

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{1}{6} \cdot I_o^4 t^3 e^{-I_o t}.$$

Определим интенсивность отказов $I_c(t)$. Получим

$$I_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{1}{6} \cdot \frac{I_0^4 t^3}{1 + I_0 t + \frac{I_0^2 t^2}{2} + \frac{I_0^3 t^3}{6}}$$

Определим $P_c(t)$ при $t=10000$ час. Имеем

$$P_c(t) = e^{-1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4} \cdot \left(1 + 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4 + \frac{(1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4)^2}{2} + \frac{(1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4)^3}{6}\right) \approx 0,96.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.8.2

Блок усилителей промышленной частоты включает в себя $n = 4$ последовательно соединенных усилителя и один усилитель в ненагруженном резерве. Интенсивность отказов каждого работающего усилителя $I = 6 \cdot N \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}$. Определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ резервированной системы, среднее время безотказной работы m_{tc} системы, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$. Определить также $P_c(t)$ при $t = 100 + 10 \cdot N$ час.

Задача 1.8.3

Блок телеметрии включает в себя два одинаковых приемника. Интенсивность отказов каждого приемника составляет $I = 250 + 10 \cdot N \text{ 1/час}$. Имеется один приемник в ненагруженном скользящем резерве. Определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ резервированной системы, среднее время безотказной работы m_{tc} системы, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $I_c(t)$. Определить $P_c(t)$ при $t = 250 + 10 \cdot N$ час. Определить $P_c(t)$, когда резерв отсутствует.

2 Основы технической диагностики

2.1 Оценка качества продукции

Завод по производству электрооборудования производит разъединители. Из выпускаемой партии отбираются 300 разъединителей, и производится их контроль по максимальному ударному току, который способен выдерживать разъединитель в момент короткого замыкания (80 кА). Допустимое отклонение от заданного значения равняется 5 кА. Вычислить какова вероятность того, что в данной партии не окажутся разъединители с превышением заданного отклонения ударного тока.

Пример решения задачи

В результате испытаний мы получаем выборку результатов испытаний из 300 значений. Для данной выборки вычислим математическое ожидание по формуле

$$\bar{x} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n}, \quad (2.1)$$

где h_n - экспериментальные данные;

n – величина выборки.

$$\bar{x} = \frac{80 + 84 + 71,3 + \dots + 77,4 + 89,4}{300} = 79,53$$

Далее вычисляем дисперсию и среднеквадратичное отклонение по формулам

$$Dx_n = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n} \quad (2.2)$$

$$Dx_n^2 = \frac{(80 - 79,53)^2 + (84 - 79,53)^2 + \dots + (89,4 - 79,53)^2}{300} = 32,37$$

$$Do_n = \sqrt{32,37} = 5,7$$

После вычисления среднеквадратичного отклонения можно вычислить вероятность попадания в партию разъединителя с отклонением от ударного тока 5кА по формуле

$$P = 2\Phi\left(\frac{e}{Dx_n}\right), \quad (2.3)$$

где e - допустимое отклонения от заданного значения;
 Φ_x - функция Лапласа.

$$P = 2\Phi\left(\frac{5}{5,7}\right) = 0,62$$

Вероятность того, что в партии окажутся такие разъединители равна 0,62.

Исходные данные

Необходимо для любого типа электрооборудования составить выборку из трехсот значений любого электрического параметра. Найти математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратичное отклонение и вероятность попадания в партию электрооборудования с заданным отклонением.

2.2 Составление таблицы функций неисправностей

Необходимо составить таблицу функций неисправностей для любого типа электрооборудования. При этом необходимо составить структурную, логическую и функциональную схему устройства (п.4.2.2 и 4.2.3 /1/). По полученной ТФН разработать алгоритм диагностирования устройства.

2.3 Проверка изоляционных свойств масла трансформатора

Проводится диагностика твердой изоляции обмоток трансформатора по определению примесей в масле бака /1/. Исследование проведено на 100 трансформаторах, среди которых $40 + N$ (где N – номер варианта) имели исправное состояние изоляции (A_1) и $100 - (40 + N)$ - неисправное (A_2). Количество примесей в масле было квантовано на три уровня B_1, B_2, B_3 .

Найти:

- среднюю информацию о состоянии твердой изоляции по результатам исследования масла;
- величины информации об исправном и неисправном состоянии твердой изоляции по результатам исследования масла;

– величины информации о состоянии твердой изоляции для каждого уровня квантования состояния масла.

Исходные данные

Таблица 2.1 - Распределение числа трансформаторов в зависимости от от уровня примесей в баке

Состояние A ₁ , шт.	Состояние A ₂ , шт.	Состояние масла
20 + N	0	B ₁
15	6	B ₂
5	100 – (46 + N)	B ₃

Пример решения

Таблица 2.2 – Исходные данные

Состояние A ₁ , шт.	Состояние A ₂ , шт.	Состояние масла
40	0	B ₁
20	6	B ₂
4	30	B ₃

Средняя информация о состоянии изоляции по исследованиям масла

$$\begin{aligned}
 J_A(B) &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(A_i \cdot B_j) \cdot \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)} = \\
 &= \frac{1}{\lg 2} \left(0,40 \cdot \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + 0,20 \cdot \lg \frac{0,20}{0,64 \cdot 0,26} + 0,04 \cdot \lg \frac{0,04}{0,64 \cdot 0,34} + \right. \\
 &\quad \left. + 0 \cdot \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} + 0,06 \cdot \lg \frac{0,06}{0,36 \cdot 0,26} + 0,30 \cdot \lg \frac{0,30}{0,36 \cdot 0,34} \right) = 0,56.
 \end{aligned}$$

Величина информации об исправном состоянии изоляции

$$J_{A_1}(B) = \sum_{j=1}^3 P(B_j/A_1) \cdot \log_2 \frac{P(A_1 B_j)}{P(B_j) \cdot P(A_1)} = \frac{1}{\lg 2} \left(\frac{0,40}{0,64} \cdot \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + \frac{0,20}{0,64} \cdot \lg \frac{0,20}{0,64 \cdot 0,26} + \frac{0,04}{0,64} \cdot \lg \frac{0,04}{0,64 \cdot 0,34} \right) = 0,33.$$

Величина информации о неисправном состоянии изоляции

$$J_{A_2}(B) = \sum_{j=1}^3 P(B_j/A_2) \cdot \log_2 \frac{P(A_2 B_j)}{P(B_j) \cdot P(A_2)} = \frac{1}{\lg 2} \left(\frac{0}{0,36} \cdot \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} + \frac{0,06}{0,36} \cdot \lg \frac{0,06}{0,36 \cdot 0,26} + \frac{0,30}{0,36} \cdot \lg \frac{0,30}{0,36 \cdot 0,34} \right) = 0,97.$$

Величина информации о состоянии твердой изоляции для первого уровня квантования

$$J_A(B_1) = \sum_{i=1}^2 P(A_i/B_1) \cdot \log_2 \frac{P(A_i B_1)}{P(B_1) \cdot P(A_i)} = \frac{1}{\lg 2} \left(\frac{0,40}{0,40} \cdot \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + \frac{0}{0,40} \cdot \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} \right) = 0,64.$$

Находим $J_A(B_2) = 0,05$.

Находим $J_A(B_3) = 0,85$.

Остальные результаты сводим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Результаты расчетов информации $J_{A_i}(B_j)$

A_i	B_j		
	B_1	B_2	B_3
A_1	0,64	0,26	- 2,45
A_2	- ∞	- 0,64	1,29

Анализируя результаты расчетов, можно оценить информационную ценность каждого состояния. Разбиение пространства состояний на кванты должно проводиться с учетом их информационной ценности. В рассмотренном примере состояние B_2 является малоценным. Использование неинформативных признаков не только бесполезно, но и создает помехи при распознавании.

Наибольший диагностический вес имеет признак B_1 (отсутствие примесей в масле), равный минус бесконечности, что отрицает возможность неисправного состояния твердой изоляции.

2.4 Метод Байеса

Пусть состояние объекта характеризуется некоторым признаком K_j , причем известно, что он может появляться как при наличии диагноза D_i , так и при его отсутствии. Вероятность совместного появления событий (наличие у объекта состояния D_i и признака K_j) /1/

$$P(D_i K_j) = P(D_i) \cdot P(K_j / D_i) = P(K_j) \cdot P(D_i / K_j).$$

Из этого равенства вытекает теорема Байеса

$$P(D_i / K_j) = P(D_i) \cdot P(K_j / D_i) / P(K_j),$$

где – $P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза, определенная по статистическим данным;

$P(K_j / D_i)$ – вероятность появления признака K_j у объектов с состоянием D_i ;

$P(K_j)$ – вероятность появления признака K_j у всех объектов независимо от состояния.

Таблица 2.5 – Задание для решения задачи

Состояние зажима	Показания измерителя	Показания термометра	
		Норма	Не норма
Исправное	$1000 - 10 \cdot N$	$950 - 10 \cdot N$	50
Неисправное	$10 \cdot N$	$2 \cdot N$	$8 \cdot N$

Пример решения

На контактной сети провели 1000 испытаний, чтобы определить возможность бесконтактного контроля состояния питающих зажимов. При этом сравнивали результаты контроля бесконтактным термометром и измерителем

переходного сопротивления. Было принято допущение об абсолютной достоверности контроля измерителем сопротивления. Результаты опытов приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты опытов по определению состояния питающих зажимов

Состояние зажима	Показания измерителя	Показания термометра	
		Норма	Не норма
Исправное	990	970	20
Неисправное	10	2	8

Требуется найти следующие оценки
 априорной вероятности состояния «неисправен»;
 вероятности появления признака «не норма» у неисправного зажима;
 вероятности появления признака «не норма» независимо от состояния зажима;
 вероятности диагноза «неисправное состояние зажима» при получении результатов «не норма».

Оценка априорной вероятности диагноза «неисправен»

$$P(D_H) = 10/990 = 0,0101.$$

Оценка вероятности появления признака «не норма» у неисправного зажима

$$P(K_{HH}/D_H) = 8/10 = 0,8.$$

Оценка вероятности появления признака «не норма» независимо от состояния зажима

$$P(K_{HH}) = 28/1000 = 0,028.$$

Оценка вероятности диагноза «неисправное состояние» при получении результата «не норм»

$$P(D_H / K_{HH}) = 0,0101 \cdot (0,8 / 0,028) = 0,29.$$

2.5 Метод минимального риска

При наличии неопределенности принятия решения применяют специальные методы, учитывающие вероятностную природу событий. Они позволяют назначать границу поля допуска параметра для принятия решения о диагностировании /1/.

Пусть производится диагностика состояния железобетонной опоры вибрационным методом.

Вибрационный метод (Рис. 2.1) основан на зависимости декремента затухающих колебаний опоры от степени коррозии арматуры. Опора приводится в колебательное движение, например, при помощи троса оттяжки и сбрасывающего устройства. Сбрасывающее устройство калибруется на заданное усилие. На опоре устанавливается датчик колебаний, например акселерометр. Декремент затухающих колебаний определяется как логарифм отношения амплитуд колебаний:

$$\delta = \ln \frac{A_2}{A_7}, \quad (2.4)$$

где A_2 и A_7 – амплитуды соответственно второго и седьмого колебаний.

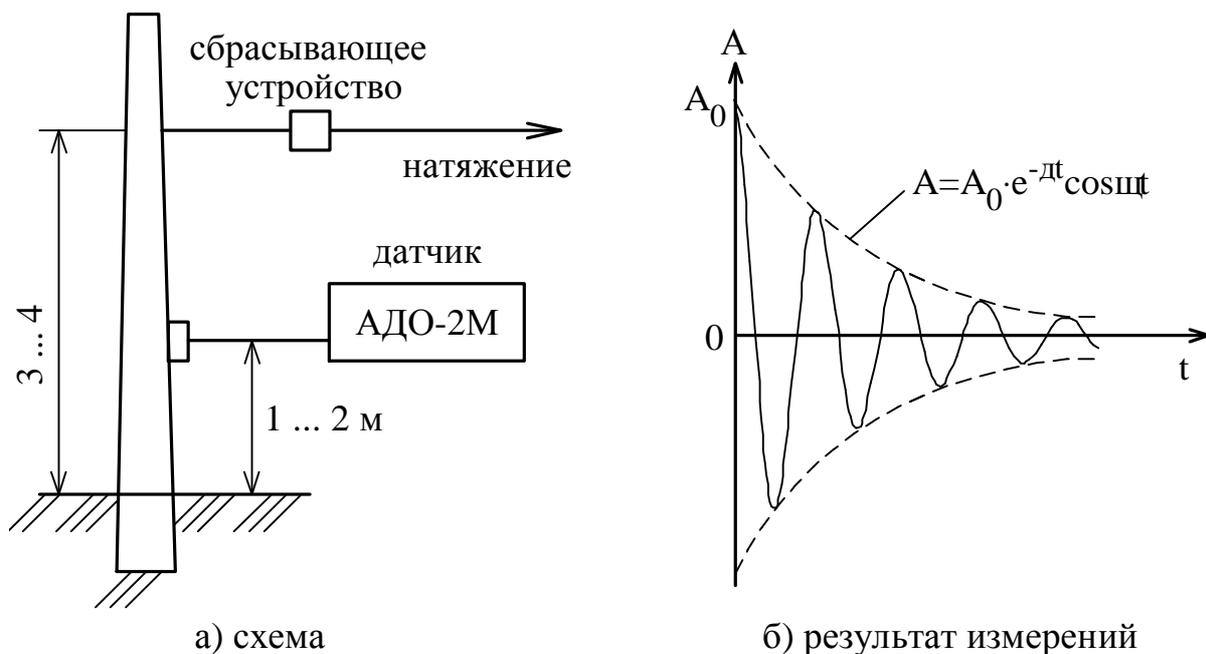


Рисунок 2.1 – Вибрационный метод

АДО-2М измеряет амплитуды колебаний 0,01 ... 2,0 мм частотой 1 ... 3 Гц.

Чем больше степень коррозии, тем быстрее затухают колебания. Недостатком метода является то, что декремент колебаний в большой степени зависит от параметров грунта, способа заделки опоры, отклонений технологии изготовления опоры, качества бетона. Заметное влияние коррозии проявляется лишь при значительном развитии процесса.

Задача стоит в выборе значения X_0 параметра X таким образом, чтобы при $X > X_0$ принимали решение о замене опоры, а при $X < X_0$ не проводили управляющего воздействия.

Условимся считать $D1$ – исправное состояние опоры, $D2$ – наличие коррозии. Тогда правило состоит в следующем:

$$\left. \begin{array}{l} x \in D_1 \text{ при } x < x_0 \\ x \in D_2 \text{ при } x > x_0 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Декремент колебаний опоры зависит не только от степени коррозии, но и от множества других факторов. Поэтому можно говорить о некоторой области, в которой может находиться величина декремента. Распределения декремента колебаний для исправной и проржавевшей опоры показано на рис. 2.2.

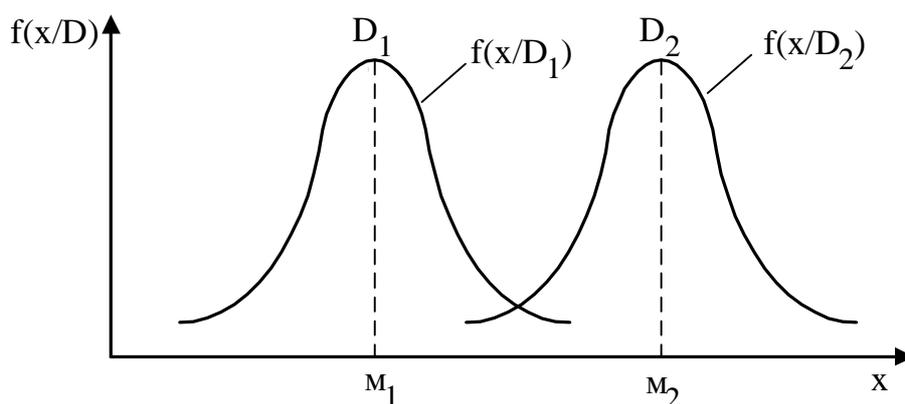


Рисунок 2.2 - Плотность вероятности декремента колебаний опоры

Существенно, что области исправного D_1 и коррозионного D_2 состояний пересекаются и потому невозможно выбрать x_0 так, чтобы правило (2.5) не давало бы ошибочных решений.

Ошибка первого рода - принятие решения о наличии коррозии (дефекта), когда в действительности опора (система) находится в исправном состоянии.

Ошибка второго рода - принятие решения об исправном состоянии, тогда как опора (система) прокорродировала (содержит дефект).

Вероятность ошибки первого рода равна произведению вероятностей двух событий: вероятности наличия исправного состояния и вероятности того, что $x > x_0$ при исправном состоянии

$$\alpha(x_0) = P(D_1) \cdot P(x > x_0 / D_1) = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_1) dx, \quad (2.6)$$

где $P(D_1) = P_1$ - априорная вероятность нахождения опоры в исправном состоянии (считается известной на основании предварительных статистических данных).

Вероятность ошибки второго рода

$$\beta(x_0) = P(D_2) \cdot P(x < x_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_2) dx, \quad (2.7)$$

где $P(D_2) = P_2$ - априорная вероятность коррозии (дефекта), $P_2 = 1 - P_1$.

Если известны цены ошибок первого и второго рода s и y соответственно, то можно записать уравнение для среднего риска

$$R(x_0) = c \cdot \alpha(x_0) + y \cdot \beta(x_0). \quad (2.8)$$

Найдем граничное значение x_0 для правила (2.5) из условия минимума среднего риска. Подставляя (2.6) и (2.7) в (2.8) дифференцируя $R(x)$ по x_0 , приравняем производную нулю

$$\frac{dR(x_0)}{dx_0} = -c \cdot P_1 f(x_0/D_1) + y \cdot P_2 f(x_0/D_2) = 0, \quad (2.9)$$

или

$$\frac{f(x_0/D_1)}{f(x_0/D_2)} = \frac{y \cdot P_2}{c \cdot P_1}. \quad (2.10)$$

Это условие для нахождения двух экстремумов - максимума и минимума. Для существования минимума в точке $x = x_0$ вторая производная должна быть положительной

$$\frac{d^2R(x_0)}{dx_0^2} > 0. \quad (2.11)$$

Это приводит к следующему условию

$$\frac{f'(x_0/D_1)}{f'(x_0/D_2)} < \frac{y \cdot P_2}{c \cdot P_1}. \quad (2.12)$$

Если распределения $f(x/D_1)$ и $f(x/D_2)$ одномодальные, то при

$$\mu_1 < x_0 < \mu_2 \quad (2.13)$$

условие (4.58) выполняется.

Если плотности распределений параметров исправной и неисправной (системы) подчинены закону Гаусса, то они имеют вид

$$f(x/D_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 \right], \quad (2.14)$$

$$f(x/D_2) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right]. \quad (2.15)$$

Условия (2.10) в этом случае принимает вид

$$\frac{\sigma_2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right]}{\sigma_1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0 - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]} = \frac{y \cdot p_2}{c \cdot p_1}. \quad (2.16)$$

После преобразования и логарифмирования получаем квадратное уравнение

$$a \cdot x_0^2 + b \cdot x_0 + c = 0, \quad (2.17)$$

где $a = \sigma_1^2 - \sigma_2^2;$

$$b = 2m_1s_2^2 - 2m_2s_1^2;$$

$$c = \mu_2^2\sigma_1^2 - \mu_1^2\sigma_2^2 - \sigma_1^2\sigma_2^2 \cdot \ln\left(\frac{y \cdot p_2 \cdot \sigma_1}{c \cdot p_1 \cdot \sigma_2}\right).$$

Решая уравнение (2.17) можно найти такую величину x_0 , при которой достигается минимум риска.

Пример решения

Таблица 2.6 – Исходные данные

Номер варианта	m_1	s_1	m_2	s_2	c	y	P_2
N	0,1	0,01	0,3	0,015	300	1500	0,011

$$ax_0^2 + bx_0 + c = 0$$

$$a = s_1^2 - s_2^2 = 0,01^2 - 0,015^2 = -0,00013$$

$$b = 2m_1s_2^2 - 2m_2s_1^2 = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,000225 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,0001 = -0,00001$$

$$c = m_2^2s_1^2 - m_1^2s_2^2 - s_1^2s_2^2 \cdot \ln\left(\frac{y \cdot p_2 \cdot s_1}{c \cdot p_1 \cdot s_2}\right) =$$

$$= 0,09 \cdot 0,0001 - 0,001 \cdot 0,00023 - 0,0001 \cdot 0,00023 \cdot \ln\left(\frac{300 \cdot 0,011 \cdot 0,01}{1500 \cdot 0,989 \cdot 0,015}\right) = 0,000067.$$

$$D = e^2 - 4ac$$

$$D = (-0,00001)^2 - 4 \cdot 0,00013 \cdot 0,000067 = 3 \cdot 10^{-3}$$

$$X_{1,2} = -e \pm \frac{\sqrt{D}}{2a}$$

$$X_1 = -0,00001 - \frac{\sqrt{0,000000003}}{2 \cdot (-0,00013)} = -0,21$$

$$X_2 = -0,00001 + \frac{\sqrt{0,000000003}}{2 \cdot (-0,00013)} = 0,23$$

Вывод

При $X_o = 0,23$ достигается минимум риска.

Исходные данные

Исправное состояние

Математическое ожидание: $0,07 + 0,01 \cdot N$;

Вероятность исправного состояния системы: $0,57 + 0,01 \cdot N$;

Среднеквадратичное отклонение: $0,007 + 0,005 \cdot N$;

Приведенные затраты на исправное состояние: $100 + 10 \cdot N$;

Неисправное состояние

Математическое ожидание: $0,1 + 0,01 \cdot N$;

Вероятность неисправного состояния системы: $0,43 - 0,01 \cdot N$;

Среднеквадратичное отклонение: $0,01 + 0,005 \cdot N$;

Приведенные затраты на неисправное состояние: $1500 + 20 \cdot N$.

2.6 Метод поэлементных проверок

Теоретические сведения

Рассмотрим устройство релейной защиты, стоящее из N функциональных блоков (рис. 2.3) /1/

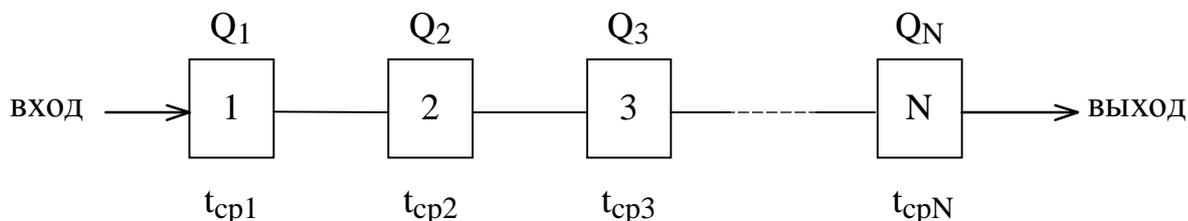


Рисунок 2.3 – Устройство релейной защиты

Пусть известно, что устройство отказало, но неизвестно, какой элемент отказал. Пусть также известны средние времена проверок элементов t_{cp_i} и априорные (доопытные) вероятности отказов элементов Q_i .

Необходимо разработать алгоритм диагностики, оптимизировав его по критерию максимальной скорости получения информации.

Рассмотрим вначале ситуацию, когда средние времена проверок одинаковы.

$$t_{cp1} = t_{cp2} = t_{cp3} = \dots = t_{cpN}. \quad (2.18)$$

Сумма априорных вероятностей отказа равна единице

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 1. \quad (2.19)$$

Как следует из названия метода, в результате каждой элементарной проверки имеется возможность определить состояние только одного элемента. Таким образом, все устройство разбивается как бы на две части: проверяемый элемент и все остальные элементы. Выше уже рассматривалось зависимость энтропии системы от вероятностей отказов входящих в нее элементов. На рис. 2.4 показана такая зависимость для метода поэлементных проверок.

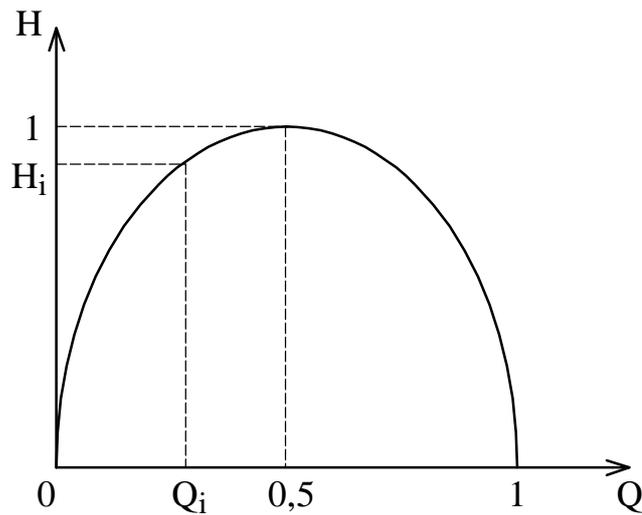


Рисунок 2.4 - Зависимость $H(Q)$

Для максимальной скорости получения информации при условии (2.18) необходимо для первой проверки выбрать такой элемент, у которого априорная вероятность отказа ближе всего к 0,5. Вторая элементарная проверка должна проверять следующий элемент из оставшихся, вероятность отказа которого также ближе всех к 0,5. Практически же указанное условие будет соблюдаться, если алгоритм проверок имеет вид

$$Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \dots > Q_N. \quad (2.20)$$

Если средние времена проверок различны, то необходимо рассчитывать скорость получения информации при каждой элементарной проверке. Но, учитывая рис. 2.3, можно алгоритм представить в виде

$$\frac{Q_1}{t_{cp1}} \geq \frac{Q_2}{t_{cp2}} \geq \frac{Q_3}{t_{cp3}} \geq \dots \geq \frac{Q_N}{t_{cpN}}. \quad (2.21)$$

Если априорные вероятности отказов элементов одинаковы

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_N, \quad (2.22)$$

что может иметь место и при отсутствии достоверной информации о надежности функциональных блоков, а средние времена проверок различны, то получаем еще один алгоритм проверок

$$t_{cp1} \leq t_{cp2} \leq t_{cp3} \leq \dots \leq t_{cpN}. \quad (2.23)$$

Исходные данные

Таблица 2.7 – Среднее время проверок

N опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{CP}	7 N	3 N	1 N	8 N	12N	15N	3 N	11N	10N	4 N

Таблица 2.8 – Вероятности отказов элементов системы

N опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N Варианта										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,05	0,23	0,14	0,04	0,07	0,1	0,11	0,18	0,05	0,03
2	0,1	0,24	0,01	0,09	0,14	0,21	0,05	0,07	0,03	0,06
3	0,13	0,11	0,26	0,02	0,05	0,14	0,23	0,02	0,01	0,03
4	0,20	0,06	0,09	0,10	0,01	0,15	0,03	0,01	0,24	0,11
5	0,16	0,18	0,03	0,08	0,07	0,05	0,11	0,26	0,04	0,02
6	0,01	0,24	0,05	0,09	0,07	0,16	0,19	0,07	0,10	0,02
7	0,23	0,03	0,04	0,06	0,11	0,13	0,18	0,06	0,06	0,10
8	0,24	0,02	0,05	0,10	0,27	0,01	0,08	0,11	0,02	0,10
9	0,04	0,06	0,19	0,07	0,07	0,17	0,29	0,02	0,01	0,08
10	0,11	0,08	0,14	0,03	0,06	0,08	0,13	0,12	0,15	0,10
11	0,20	0,11	0,03	0,05	0,07	0,18	0,15	0,13	0,02	0,06
12	0,14	0,23	0,08	0,09	0,05	0,06	0,17	0,02	0,10	0,06
13	0,01	0,06	0,09	0,05	0,25	0,17	0,03	0,05	0,09	0,20
14	0,12	0,14	0,01	0,05	0,08	0,14	0,03	0,10	0,30	0,03

Продолжение таблицы 2.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	0,04	0,1	0,18	0,10	0,06	0,05	0,19	0,02	0,25	0,05
16	0,05	0,07	0,09	0,18	0,19	0,05	0,04	0,03	0,10	0,20
17	0,05	0,19	0,11	0,01	0,03	0,04	0,16	0,04	0,31	0,08
18	0,04	0,02	0,13	0,13	0,07	0,03	0,17	0,05	0,08	0,28
19	0,26	0,04	0,10	0,10	0,01	0,07	0,04	0,10	0,19	0,09
20	0,03	0,06	0,16	0,02	0,16	0,15	0,02	0,10	0,15	0,15
21	0,04	0,03	0,07	0,19	0,14	0,20	0,01	0,02	0,19	0,11
22	0,02	0,09	0,14	0,06	0,08	0,11	0,17	0,01	0,07	0,25
23	0,05	0,06	0,16	0,13	0,07	0,04	0,02	0,18	0,09	0,20
24	0,04	0,02	0,19	0,13	0,04	0,02	0,08	0,04	0,34	0,10
25	0,11	0,19	0,01	0,01	0,03	0,19	0,07	0,05	0,05	0,29
26	0,17	0,03	0,02	0,05	0,06	0,02	0,07	0,06	0,22	0,30
27	0,02	0,04	0,08	0,06	0,04	0,19	0,17	0,15	0,18	0,07
28	0,10	0,16	0,01	0,02	0,04	0,05	0,10	0,05	0,12	0,35
29	0,09	0,06	0,05	0,11	0,13	0,05	0,06	0,18	0,01	0,26
30	0,09	0,17	0,16	0,02	0,04	0,05	0,06	0,17	0,08	0,16
31	0,05	0,03	0,05	0,13	0,13	0,16	0,01	0,05	0,15	0,24

Пример решения

Таблица 2.9 – Исходные данные

N опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q \cdot 10^{-2}$	6	7	13	16	2	7	4	14	18	13
t_{CP}	17	32	9	2	19	43	40	50	35	12

1) $t_{CP} = const$, $Q = var$

$$Q_1 \geq Q_2 \geq \dots Q_N;$$

$$0,18 \geq 0,16 \geq 0,14 \geq 0,13 \geq 0,13 \geq 0,07 \geq 0,07 \geq 0,06 \geq 0,04 \geq 0,02$$

$$Q_9 \geq Q_4 \geq Q_8 \geq Q_3 \geq Q_{10} \geq Q_6 \geq Q_2 \geq Q_1 \geq Q_7 \geq Q_5$$

2) $Q = const$; $t = var$

$$2 \leq 9 \leq 12 \leq 17 \leq 19 \leq 32 \leq 35 \leq 40 \leq 43 \leq 50$$

$$t_{CP4} \leq t_{CP3} \leq t_{CP10} \leq t_{CP1} \leq t_{CP5} \leq t_{CP2} \leq t_{CP9} \leq t_{CP7} \leq t_{CP6} \leq t_{CP8}$$

3) $Q = var$; $t_{CP} = var$

$$\frac{Q_1}{t_{CP1}} = \frac{0,06}{17} = 0,00353,$$

$$\frac{Q_2}{t_{CP2}} = \frac{0,07}{32} = 0,0022$$

$$\frac{Q_3}{t_{CP3}} = \frac{0,13}{9} = 0,014,$$

$$\frac{Q_4}{t_{CP4}} = \frac{0,16}{2} = 0,08$$

$$\frac{Q_5}{t_{CP5}} = \frac{0,02}{19} = 0,0105,$$

$$\frac{Q_6}{t_{CP6}} = \frac{0,07}{43} = 0,00162$$

$$\frac{Q_7}{t_{CP7}} = \frac{0,04}{40} = 0,001,$$

$$\frac{Q_8}{t_{CP8}} = \frac{0,14}{50} = 0,0028$$

$$\frac{Q_9}{t_{CP9}} = \frac{0,18}{35} = 0,00514,$$

$$\frac{Q_{10}}{t_{CP10}} = \frac{0,13}{12} = 0,0108$$

$$\frac{Q_4}{t_{CP4}} \geq \frac{Q_3}{t_{CP3}} \geq \frac{Q_9}{t_{CP9}} \geq \frac{Q_1}{t_{CP1}} \geq \frac{Q_8}{t_{CP8}} \geq \frac{Q_2}{t_{CP2}} \geq \frac{Q_6}{t_{CP6}} \geq$$

$$\geq \frac{Q_{10}}{t_{CP10}} \geq \frac{Q_5}{t_{CP5}} \geq \frac{Q_7}{t_{CP7}};$$

4) Найдем энтропию системы, для этого необходимо посчитать энтропию каждого из элементов системы

$$H_1 = -0,06 \ln 0,06 = 0,168$$

$$H_2 = -0,07 \ln 0,07 = 0,186$$

$$H_3 = -0,13 \ln 0,13 = 0,265$$

$$H_4 = -0,16 \ln 0,16 = 0,293$$

$$H_5 = -0,02 \ln 0,02 = 0,08$$

$$H_6 = -0,07 \ln 0,07 = 0,186$$

$$H_7 = -0,04 \ln 0,04 = 0,129$$

$$H_8 = -0,14 \ln 0,14 = 0,275$$

$$H_9 = -0,18 \ln 0,18 = 0,308$$

$$H_{10} = -0,13 \ln 0,13 = 0,265$$

$$H_C = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 + H_9 + H_{10} =$$

$$= 0,168 + 0,186 \cdot 2 + 0,265 \cdot 2 + 0,293 + 0,08 + 0,129 + 0,275 + 0,308 = 2,155$$

2.7 Метод групповых проверок

Теоретические сведения

Рассмотрим устройство релейной защиты, показанное на рис. 2.3. Отдельные элементы системы связаны между собой функционально, и всегда можно контролировать сигнал, позволяющий судить о состоянии всей системы или любой ее части. Оптимальный алгоритм проверок вырабатывается заранее, до наступления отказа /1/.

Такой метод предусматривает одновременную проверку группы элементов из основной системы. Если в результате проверки выясняется, что неисправный элемент находится в проверяемой группе, то она вновь разбивается на две подгруппы. Такая процедура деления системы продолжается до тех пор, пока не будет найден отказавший элемент.

Рассмотрим вначале ситуацию, когда априорные вероятности отказов элементов равны друг другу, а время проверки не зависит от способа разбиения на подгруппы. В этом случае применяют метод половинного деления, хорошо известный тем, кому приходилось искать перегоревшую лампу в новогодней гирлянде с последовательным электрическим соединением. При разбиении такой системы по средней точке, получаем равные вероятности отказов двух подгрупп. Так как весь объект отказал, то вероятности отказов каждой из полученных подгрупп получаются равными 0,5. Тогда при первой проверке будет получено наибольшее количество информации равное одному биту (рис.2.18).

Если вероятности отказов элементов, входящих в систему не равны, то необходимо придерживаться деления системы таким образом, чтобы вероятности отказов полученных подгрупп были как можно ближе к 0,5.

При второй проверке полученную на первом этапе подсистему необходимо также поделить на подгруппы. При этом следует исходить из положения о том, что отказавший элемент находится внутри рассматриваемой подсистемы. Следовательно, вероятности отказов элементов этой подсистемы в сумме должны составлять единицу. Для этого их необходимо пронормировать домножив на величину, обратную сумме вероятностей отказов элементов, входящих в подсистему. Для j -го элемента из подсистемы с n элементами пронормированная (условная) вероятность отказа будет

$$Q'_j = \frac{Q_j}{\sum_{i=1}^n Q_i}, \quad (2.24)$$

где n - число элементов в подсистеме.

Процедуру нормирования и деления на подсистемы необходимо повторять до тех пор, пока в каждой подгруппе не останется по одному элементу.

Если же различны не только вероятности отказов, но и времена проверок, то на каждом этапе разбиения помимо нормирования необходимо еще и вычислять количество информации, которое можно получить при такой проверке (таком разбиении). Затем для каждого возможного варианта "к" разбиения необходимо рассчитать скорость получения информации

$$W_k = \frac{J_k}{t_{cpk}}. \quad (2.25)$$

На каждом этапе разбиения системы на подгруппы выбирается тот вариант, при котором скорость получения информации будет наибольшей. Результаты расчетов оптимального алгоритма удобно представить в виде дерева (рис.2.5)



Рисунок 2.5 - Пример дерева алгоритма проверок

Исходные данные

Таблица 2.10 – Вероятности отказов элементов системы

N опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	N варианта									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,03	0,25	0,14	0,04	0,07	0,10	0,11	0,18	0,05	0,03
2	0,1	0,24	0,01	0,09	0,15	0,20	0,05	0,07	0,03	0,06
3	0,13	0,11	0,26	0,02	0,05	0,14	0,23	0,02	0,01	0,03
4	0,20	0,06	0,09	0,10	0,01	0,15	0,03	0,01	0,24	0,11
5	0,16	0,18	0,03	0,08	0,07	0,05	0,11	0,26	0,04	0,02
6	0,01	0,24	0,05	0,09	0,07	0,16	0,19	0,07	0,10	0,02
7	0,23	0,03	0,04	0,06	0,11	0,13	0,18	0,06	0,06	0,10
8	0,24	0,02	0,05	0,10	0,27	0,01	0,08	0,11	0,02	0,10
9	0,04	0,06	0,19	0,07	0,09	0,15	0,29	0,02	0,01	0,08
10	0,11	0,08	0,14	0,03	0,06	0,08	0,13	0,12	0,15	0,10
11	0,20	0,11	0,03	0,05	0,07	0,18	0,15	0,13	0,02	0,06
12	0,14	0,23	0,08	0,09	0,05	0,06	0,17	0,02	0,10	0,06
13	0,01	0,06	0,09	0,05	0,25	0,17	0,03	0,05	0,09	0,20
14	0,12	0,14	0,01	0,05	0,08	0,14	0,03	0,10	0,30	0,03
15	0,04	0,06	0,18	0,10	0,06	0,05	0,19	0,02	0,25	0,05
16	0,05	0,07	0,09	0,18	0,19	0,05	0,04	0,03	0,10	0,20
17	0,05	0,19	0,11	0,01	0,03	0,04	0,16	0,04	0,31	0,08
18	0,04	0,02	0,13	0,13	0,07	0,03	0,17	0,05	0,08	0,28

Продолжение таблицы 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	0,26	0,04	0,10	0,10	0,01	0,07	0,04	0,10	0,19	0,09
20	0,03	0,06	0,16	0,02	0,16	0,15	0,02	0,10	0,15	0,15
21	0,04	0,03	0,07	0,19	0,14	0,20	0,01	0,02	0,19	0,11
22	0,02	0,09	0,14	0,06	0,08	0,11	0,17	0,01	0,07	0,25
23	0,05	0,06	0,16	0,13	0,07	0,04	0,02	0,18	0,09	0,20
24	0,04	0,02	0,19	0,13	0,04	0,02	0,08	0,04	0,34	0,10
25	0,11	0,19	0,01	0,01	0,03	0,19	0,07	0,05	0,05	0,29
26	0,17	0,03	0,02	0,05	0,06	0,02	0,07	0,06	0,22	0,30
27	0,02	0,04	0,08	0,06	0,04	0,19	0,17	0,15	0,18	0,07
28	0,10	0,16	0,01	0,02	0,04	0,05	0,10	0,05	0,12	0,35
29	0,09	0,06	0,05	0,11	0,13	0,05	0,06	0,18	0,01	0,26
30	0,09	0,17	0,16	0,02	0,04	0,05	0,06	0,17	0,08	0,16
31	0,05	0,03	0,05	0,13	0,13	0,16	0,01	0,05	0,15	0,24

Пример решения

Таблица 2.11 – Исходные данные к задаче

N опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q \cdot 10^{-2}$	6	7	13	16	2	7	4	14	18	13

Разделим вероятности элементов, входящих в систему так, чтобы у нас получилось две подсистемы с вероятностями отказа близким к 0,5 ($t_{CP} = const$).

Построим дерево алгоритма проверок. На каждом этапе будем выполнять нормировку вероятностей отказов до тех пор, пока в каждой подгруппе не останется по одному элементу.

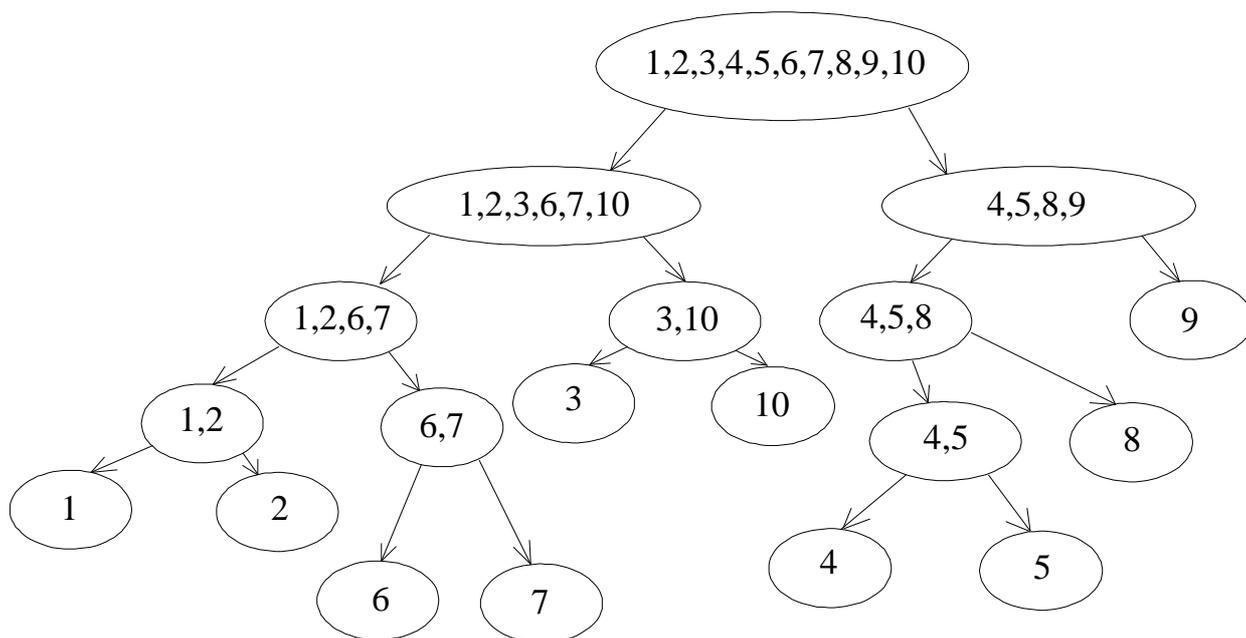


Рисунок 2.6 - Алгоритм диагностирования

Теперь выполним нормирование на 1 – ом этапе для обеих ветвей

$$Q_1^* = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_6 + Q_7 + Q_{10}} = \frac{0,06}{0,5} = 0,12$$

$$Q_2^* = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_3 + Q_6 + Q_7 + Q_{10}} = \frac{0,07}{0,5} = 0,14$$

$$Q_3^* = \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_6 + Q_7 + Q_{10}} = \frac{0,13}{0,5} = 0,26$$

$$Q_6^* = \frac{Q_6}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_7 + Q_{10}} = \frac{0,07}{0,5} = 0,14$$

$$Q_7^* = \frac{Q_7}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_6 + Q_{10}} = \frac{0,04}{0,5} = 0,08$$

$$Q_{10} = \frac{Q_{10}}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_6 + Q_7} = \frac{0,13}{0,5} = 0,26$$

Сделаем проверку вероятности отказов рассматриваемой подсистемы

$$Q_1^* + Q_2^* + Q_3^* + Q_6^* + Q_7^* + Q_{10}^* = 0,12 + 0,14 + 0,26 + 0,14 + 0,08 + 0,26 = 1$$

Для остальных ветвей производим аналогичные расчеты.

3 Надежность и диагностика устройств электроснабжения железных дорог

3.1 Выбор варианта модернизации устройства электроснабжения

Потребитель получает электроэнергию от понизительной подстанции через ЛЭП. Подстанция и ЛЭП отказывают независимо. Известны интенсивности потоков отказов и восстановления, средние затраты при отказах. В результате модернизации интенсивность восстановления возрастет вдвое. Имеются средства на модернизацию только одного устройства: ЛЭП или подстанция. Найти средние потери без модернизации и поочередно при модернизации одного и другого устройства/2/.

Исходные данные для задачи

Таблица 3.1 – Статистические данные по отказам подстанции и ЛЭП

Вариант	Подстанция			ЛЭП		
	интенсивность отказов, год ⁻¹	интенсивность восстановления, год ⁻¹	средние затраты, руб.	интенсивность отказов, год ⁻¹	интенсивность восстановления, год ⁻¹	средние затраты, руб.
1	2	3	4	5	6	7
2	3	300	100	1	720	1100
3	3	500	100	1	720	1100
4	3	500	300	1	720	1100
5	3	500	100	1	1440	1100
6	3	500	300	1	1440	1100
7	3	300	300	1	1440	600
8	3	500	100	1	720	600
9	1	300	100	1	720	600
10	1	500	300	1	1440	600
11	1	500	100	1	1440	600
12	3	300	100	3	720	600
13	3	300	300	3	720	600
14	3	300	300	3	720	1100
15	3	300	500	3	720	1100

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
16	3	300	300	3	1400	1100
17	3	300	100	3	1400	1100
18	1	300	300	3	720	100
19	1	300	500	3	720	100
20	1	300	300	3	1440	100
21	1	300	300	3	1440	100
22	1	300	300	3	1440	600
23	1	500	500	3	720	100
24	1	500	500	3	720	100
25	1	500	500	3	1440	100
26	1	500	500	3	1440	100
27	1	300	300	1	1400	500
28	1	300	300	1	1450	500
29	3	300	500	1	1600	400
30	3	500	500	1	1600	400
31	3	500	500	1	1650	400

Пример решения

Перечислим возможные состояния системы

0 – тяговая подстанция и ЛЭП исправны;

1 – тяговая подстанция отказала, а ЛЭП – исправна;

2 – тяговая подстанция исправна, а ЛЭП – отказала;

3 – тяговая подстанция и ЛЭП отказали.

Нарисуем граф состояний и переходов для такой системы

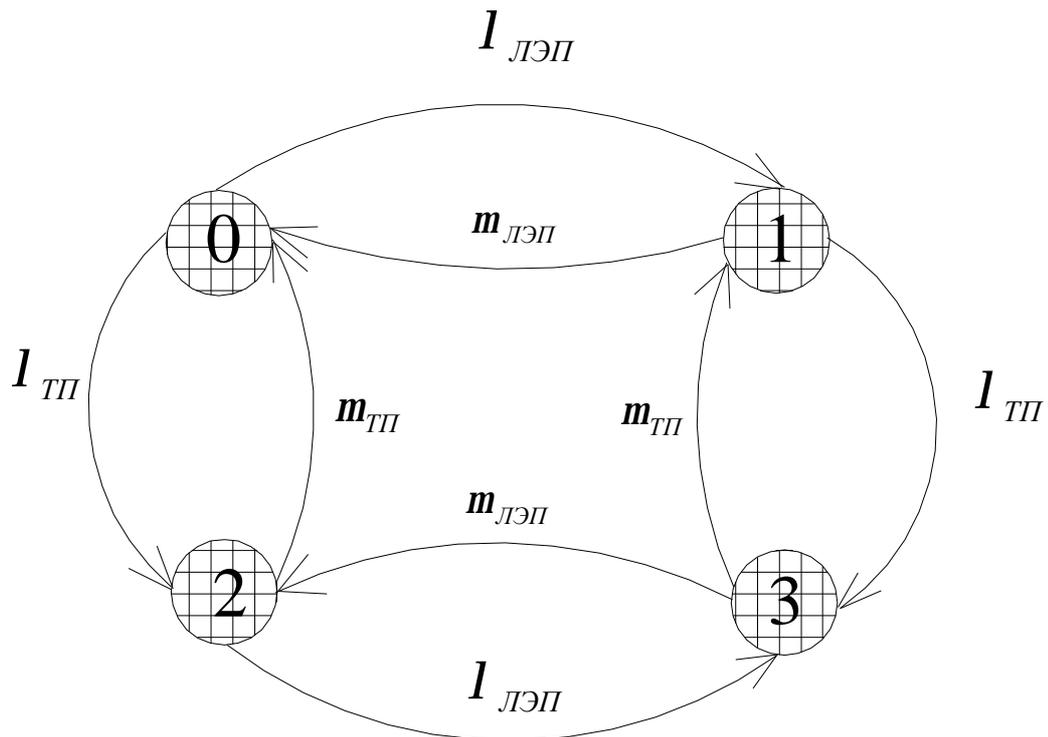


Рисунок 3.1 – Граф переходов системы

$I_{ЛЭП}$ - интенсивность отказов ЛЭП, 1/год;

$I_{ТП}$ - интенсивность отказов тяговой подстанции, 1\год;

$m_{ЛЭП}$ - интенсивность восстановления ЛЭП, 1\год;

$m_{ТП}$ - интенсивность восстановления тяговой подстанции, 1\год.

Запишем уравнения Колмогорова для данного графа состояний

$$\frac{dP_0}{dt} = -(I_{ЛЭП} + I_{ТП}) \cdot P_0(t) + m_{ЛЭП} \cdot P_1(t) + m_{ТП} \cdot P_2(t)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = -(I_{ТП} + m_{ЛЭП}) \cdot P_1(t) + I_{ЛЭП} \cdot P_0(t) + m_{ТП} \cdot P_3(t)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = -(m_{ТП} + I_{ЛЭП}) \cdot P_2(t) + I_{ТП} \cdot P_0(t) + m_{ЛЭП} \cdot P_3(t)$$

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1$$

Составим квадратную матрицу для каждого из состояний.

Например, тяговая подстанция и ЛЭП работают нормально

$$\begin{array}{ccccc} -(I_{ЛЭП} + I_{ТП}) & m_{ЛЭП} & m_{ТП} & 0 & 0 \\ I_{ЛЭП} & -(I_{ТП} + m_{ЛЭП}) & 0 & m_{ТП} & 0 \\ I_{ТП} & 0 & -(m_{ТП} + I_{ЛЭП}) & m_{ЛЭП} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array}$$

Решая полученные три матрицы методом Гаусса или Жордана – Гаусса, мы получим вероятности каждого из состояний. Возможно получить решение системы линейных уравнений, используя программу «Расчет линейных уравнений», разработанной лабораторией САПР КС (УрГУПС).

Теперь определим средние денежные потери M для трех этих вариантов:

$$M = C_{ЛЭП} \cdot P_1(t) + C_{ТП} \cdot P_2(t) + (C_{ЛЭП} + C_{ТП}) \cdot P_3(t) ,$$

где $C_{ЛЭП}$ и $C_{ТП}$ - средние затраты на модернизацию ЛЭП и тяговой подстанции.

По полученным средним денежным потерям делаем вывод о необходимости модернизации.

3.2 Расчет оптимальной периодичности замены трубчатого разрядника по критерию безотказности

Срабатывание трубчатого разрядника приводит к постепенному износу. Отказ может наступить как в результате износа, так и внезапного. Известны интенсивности предотказов, интенсивности внезапных и приработочных отказов. Причем интенсивность приработочных отказов изменяется по показательному закону, а все прочие интенсивности не зависят от времени.

Найти оптимальную периодичность замен по критерию безотказности. Исходные данные приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные по интенсивностям отказов трубчатого разрядника

вариант	Внезапные из состоя- ния рабо- тоспособ- ности $\cdot 10^{-3}, \text{день}^{-1}$	Прирабочные		постепен- ные в сос- тояние предотказа- зов $\cdot 10^{-3}, \text{день}^{-1}$	из состоя- ния предотка- зов $\cdot 10^{-3}, \text{день}^{-1}$
		аргумент $10^{-3}, \text{день}^{-1}$	параметр		
1	2	3	4	5	6
1	0,01	0,6	3	0,05	0,1
2	0,01	0,6	3	0,05	0,2
3	0,01	0,6	3	0,08	0,1
4	0,01	0,6	3	0,08	0,2
5	0,01	0,6	5	0,05	0,1
6	0,01	0,8	3	0,05	0,2
7	0,01	0,8	3	0,05	0,1
8	0,01	0,8	3	0,08	0,2
9	0,01	0,8	3	0,08	0,1
10	0,01	0,8	5	0,05	0,2
11	0,01	0,8	5	0,05	0,1
12	0,02	0,6	5	0,08	0,2
13	0,02	0,6	3	0,05	0,1
14	0,02	0,6	3	0,05	0,2
15	0,02	0,6	3	0,08	0,1
16	0,02	0,6	3	0,08	0,2
17	0,02	0,6	5	0,05	0,1
18	0,02	0,6	5	0,08	0,2
19	0,02	0,8	3	0,05	0,1
20	0,02	0,8	3	0,05	0,2
21	0,02	0,8	3	0,08	0,1
22	0,02	0,8	3	0,08	0,2
23	0,02	0,8	5	0,05	0,1
24	0,02	0,8	5	0,05	0,2
25	0,02	0,8	3	0,08	0,1
26	0,02	0,8	2	0,04	0,2
27	0,02	0,8	2	0,05	0,1

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
28	0,02	0,8	2	0,08	0,2
29	0,02	0,8	2	0,08	0,1
30	0,02	0,8	2	0,05	0,2

Теоретические сведения

Нарисуем граф состояний объекта

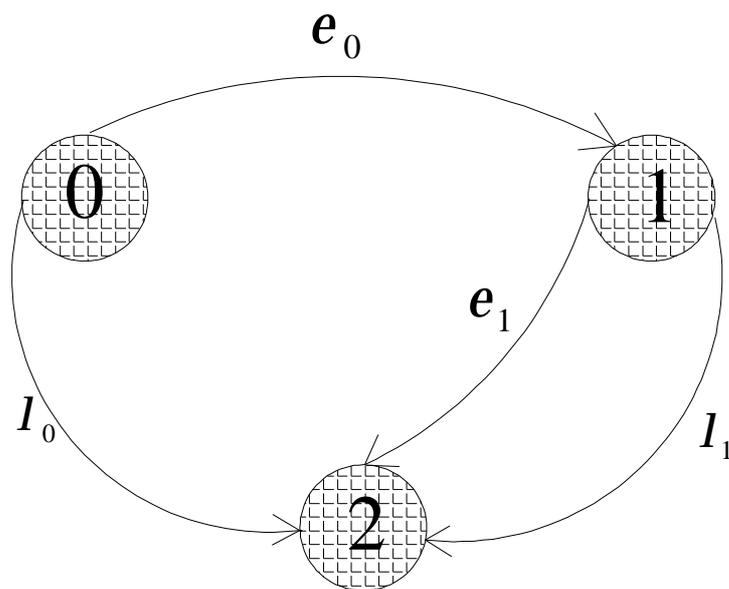


Рисунок 3.2 – Граф состояний объекта

Работоспособное состояние обозначено нулем, состояние предотказа – единицей, состояние отказа – двойкой.

Функция надежности (вероятность безотказной работы) объекта

$$F(t) = P_0(t) + P_1(t).$$

Полная интенсивность отказов

$$I(t) = \frac{q(t)}{F(t)}.$$

Средняя интенсивность отказов

$$I(r_{onm}) - I_{cp}(r_{onm}) = 0.$$

Решая это уравнение с помощью ЭВМ (комплекс программ, разработанных лабораторией САПР КС (УрГУПС) пример кода программы приведен в приложении 1), получаем графики зависимости интенсивности и средней интенсивности отказов. Точка пересечения этих графиков покажет уровень оптимальной периодичности замены трубчатого разрядника по критерию безотказной работы.

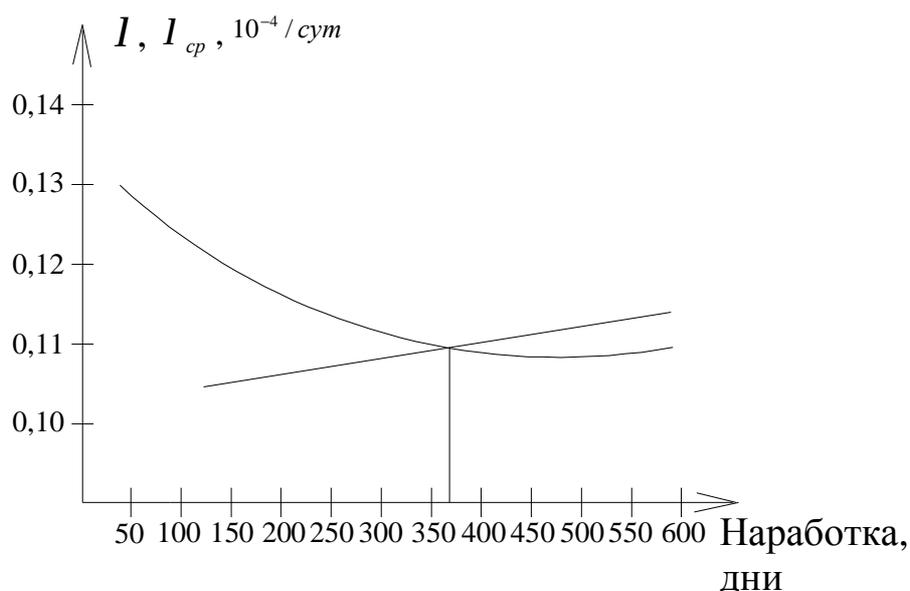


Рисунок 3.3 – Графики интенсивности отказов

Вывод

Оптимальной периодичностью замены трубчатого разрядника по критерию безотказной работы является наработка в 370 часов.

3.3 Расчет ресурса трансформатора тяговой подстанции

В задаче требуется

- 1) определить относительную степень износа трансформатора;
- 2) определить остаточный ресурс трансформатора.

Исходные данные

Таблица 3.3 – Тип и мощность трансформатора

Последняя цифра шифра	Тип и мощность трансформатора
0	ТДТНЭ – 40000/110
1	ТДТН – 25000/110 – 66
2	ТДТН – 16000/110 – 66
3	ТДТН – 40000/110 – 67
4	ТДТН – 16000/110 – 66
5	ТДТН – 25000/110 – 66
6	ТДТН – 40000/110 – 16У1
7	ТДТН – 40000/110 – 67
8	ТДТН – 25000/110 – 66
9	ТДТНЭ – 25000/110 – 69

Таблица 3.4 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (осенне – зимний период, последняя цифра шифра (первая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,2	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,1	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,3	0,5	0,2	0,6	1,4	0,1	0,2	0,4	1,3	0,4	0,6	0,1
2	0,5	0	0,3	0,4	1,4	1,2	0,4	0,5	0	0,4	0,8	0,6
3	0,2	0	0,9	0,6	0,4	0,6	1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,2
4	0,5	0,1	1	0,5	0,3	0,7	1,3	1	0,3	0,1	0,5	0,3
5	0,4	0,2	1	0,4	0,2	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,8	0,3
6	0,1	0,1	1,3	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,5	0,9	0,2
7	0,2	1	1,1	0	0,4	0,7	0,8	0,3	0,4	0,6	0,9	0,3
8	0,1	1,1	0,4	0,7	0,5	0,6	0,7	0,8	1	0,4	0,3	1

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
9	1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,9	1,1	1,4	0	0,1	0,2

Таблица 3.5 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (осенне – зимний период, последняя цифра шифра (вторая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,3	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,4	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,4	0,5	0,2	0,6	1,4	0,1	0,5	0,4	1,3	0,5	0,7	0,1
2	0,7	0	0,3	0,4	1,4	1,2	0,6	0,5	0	0,4	0,8	0,3
3	0,2	0	0,9	0,3	0,4	0,6	1	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2
4	0,6	0,4	1	0,5	0,5	0,7	1,4	1	0,3	0,1	0,5	0,3
5	0,5	0,2	1	0,4	0,2	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,8	0,6
6	0,5	0,3	1,4	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,2
7	0,7	1	1,1	0	0,7	0,7	0,6	0,3	0,7	0,7	0,9	0,3
8	0,8	1,1	0,8	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	1	0,4	0,3	1
9	1	0,8	0,1	0,4	0,6	0,7	0,6	1,1	1,4	0	0,1	0,5

Таблица 3.6 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (весенне - летний период, последняя цифра шифра (первая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,5	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,1	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,3	0,5	0,5	0,7	1,1	0,4	0,4	0,4	1,3	0,4	0,4	0,3
2	0,2	0	0,3	0,4	1,2	1,2	0,4	0,5	0	0,5	0,8	0,6
3	0,1	0	0,9	0,6	0,4	0,6	1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,2
4	0,6	0,4	1	0,5	0,3	0,7	1,3	1	0,7	0,1	0,5	0,3
5	0,4	0,2	1	0,4	0,1	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,6	0,2
6	0,1	0,1	1,3	1,3	1,1	0	0,5	1	0,5	0,2	0,9	0,2

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	0,2	1	1,1	0	0,4	0,6	0,8	0,5	0,6	0,6	0,9	0,1
8	0,6	1,2	0,4	0,7	0,5	0,6	0,5	0,8	1	0,4	0,4	1
9	1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,9	1,1	1,4	1	0,1	0,2

Таблица 3.7 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (весенне - летний период, последняя цифра шифра (вторая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,1	0,3	0,4	0,5	1,3	0	0,4	0,8	1,5	0,2	0,5	0,9
1	0,4	0,5	0,2	0,7	1,1	0,1	0,5	0,4	1,3	0,2	0,7	0,1
2	0,4	0	0,3	0,4	1,1	1,1	0,5	0,3	0	0,4	0,8	0,3
3	0,6	0	0,9	0,5	0,4	0,6	1	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2
4	0,5	0,4	1	0,5	0,5	0,7	1,4	1	0,5	0,1	0,5	0,6
5	0,5	0,2	1	0,4	0,4	0,8	1,4	0	0,6	0,7	0,8	0,6
6	0,5	0,1	1,2	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,8	0,7	0,2
7	0,6	1	1,1	0	0,7	0,5	0,7	0,2	0,7	0,7	0,4	0,3
8	0,8	1,1	0,5	0,3	0,4	0,4	0,7	0,1	1	0,4	0,3	1
9	1	0,8	0,1	0,4	0,6	0,3	0,4	1,1	1,2	0	0,1	0,5

Таблица 3.8 – Температура охлаждающей среды

Период	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
осень	5	0	5	10	5	15	0	5	5	0
весна	10	15	20	15	20	25	15	20	15	10

Теоретические сведения

Тепло, выделяемое при работе трансформатора, вызывает необратимые процессы в материале изоляции обмотки, происходит так называемое старение изоляции.

Старение изоляции обмотки при работе в среде масла зависит от целого ряда факторов: температуры, электрического поля, воды, кислорода, продуктов окисления масла и др., но решающим фактором является температура.

В самом общем случае температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $q_{ННТ}$ определяется по формуле

$$q_{ННТ} = n_{ННТМ} + n_M + q_{ОХЛ} , \quad (3.1)$$

где $n_{ННТМ}$ - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над маслом;

n_M - превышение температуры верхних слоев масла над охлаждающей средой;

$q_{ОХЛ}$ - температура охлаждающей среды.

При номинальной нагрузке трансформатора значения $n_{ННТМНОМ}$ и $n_{МНОМ}$ в соответствии с ГОСТ 14209 – 85 и 11677 – 75 равны соответственно 23 и 55 °С, а температура наиболее нагретой точки обмотки составляет 98 °С и называется базовой температурой обмотки $q_{ННТ}$. Если температура обмотки будет постоянно равна $q_{ННТ} = 98 °С$, то получим оптимальный срок службы трансформатора, который в настоящее время принят равным 25 годам. Под оптимальным сроком службы трансформатора понимают его срок службы, по истечению которого дальнейшая эксплуатация трансформатора экономически невыгодна. Это объясняется тем, что прогресс в трансформаторостроении за указанный период настолько значителен, что работающий трансформатор экономически выгодно заменить другим такой же мощности, но более совершенным как с точки зрения конструкции, так и с точки зрения использования более прогрессивных активных материалов.

Время, в течении которого изоляция обмотки практически теряет механическую прочность, называется продолжительностью жизни изоляции и определяется эмпирической формулой

$$L = A \cdot e^{-aq_{ННТ}} , \quad (3.2)$$

где L – продолжительность жизни изоляции в годах;

A – постоянная, определяемая видом изоляции;

a - коэффициент, характеризующий интенсивность старения изоляции;

q_{HHT} - температура наиболее нагретой точки.

В соответствии с шестиградусным правилом старения изоляции, согласно которому при изменении температуры изоляции на 6°C срок службы ее изменяется вдвое (сокращается при повышении температуры и увеличивается при понижении ее), коэффициент A равен 0,115.

Степень старения изоляции, другими словами ее износ, пропорциональна времени эксплуатации. За время t при температуре q_{HHT} степень старения изоляции

$$X = \frac{t}{L} = \frac{t}{A} \cdot e^{aq_{HHT}}.$$

При базовой температуре q_{HHTB} степень старения изоляции будем считать нормальной, т.е.

$$X_{HP} = \frac{t}{A} \cdot e^{aq_{HHTB}}.$$

Тогда отношение действительной степени старения изоляции к нормальной будет представлять относительную степень старения (или относительного износа) изоляции

$$F = \frac{X}{X_{HP}} = e^{a(q_{HHT} - q_{HHTB})}.$$

По ГОСТ 14209 – 85 выше приведенная формула записывается в ином виде

$$F = 2^{\frac{(q_{HHT} - q_{HHTB})}{\Delta}}, \quad (3.3)$$

где $\Delta = 6^{\circ}\text{C}$.

Относительный износ показывает, во сколько раз действительное старение изоляции отличается от старения изоляции при номинальной температуре обмотки. Если в течении года непрерывной работы трансформатора относительный износ оказался равным 2, то это означает, что время, “отжитое” изоляцией в течении года, равно двум годам. При дальнейшей работе трансформатора в таком режиме нагрузки действительный срок его службы составит не 25 лет, а 12,5.

При значении $F = 0,5$ действительный срок службы трансформатора составит 50 лет, так как время, “отжитое” изоляцией в течение года, равно 0,5 года.

Рассмотрим график относительной нагрузки трансформатора, представленный в виде ступенчатой кривой (рис. 3.4). Под относительной нагрузкой трансформатора K понимают отношение действительной нагрузки трансформатора к его номинальному току. Для данного графика нагрузки необходимо оценить характер изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки над охлаждающей средой и относительный износ изоляции трансформатора. Для i – того интервала прямоугольного графика нагрузки:

$$F_i = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2^{\frac{(q_{ННТi} - q_{ННТ})}{\Delta}}, \quad (3.4)$$

где $q_{ННТi}$ – среднее значение $q_{ННТ}$ на интервале i ;
 $\Delta = 6^\circ\text{C}$.

Среднечасовые нагрузки

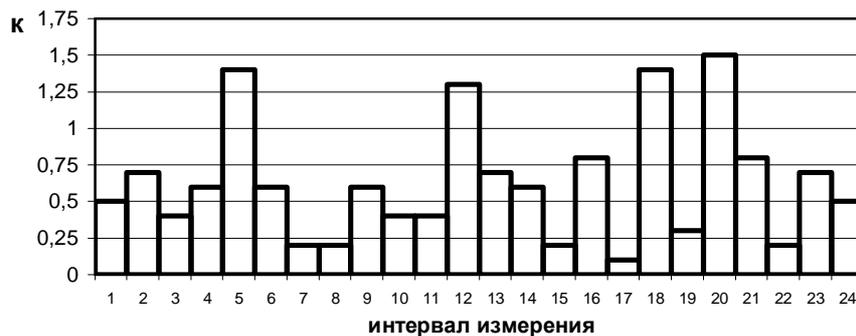


Рисунок 3.4 – График относительной нагрузки

За весь период T относительный износ

$$F = \sum F_i \quad (3.5)$$

Для расчета F предварительно определяется температура наиболее нагретой точки обмотки в установившемся тепловом режиме (при относительных нагрузках $K1$ и $K2$)

$$q_{ННТ} = q_{ОХЛ} + J_{МК} + J_{ННТМК}; \quad (3.6)$$

$$J_{МК} = J_{МНОМ} \cdot \left(\frac{1 + aK^2}{1 + a} \right)^x; \quad (3.7)$$

$$J_{ННТМК} = J_{ННТМНОМ} \cdot K^y, \quad (3.8)$$

где $J_{МК}$ - превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды при относительной нагрузке K ;

$J_{МНОМ}$ - то же, при номинальной нагрузке;

$J_{ННТМК}$ - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях при относительной нагрузке K ;

$J_{ННТМНОМ}$ - то же, при номинальной нагрузке;

a - отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода.

Показатели степени x и y определяются: для трансформаторов с видами охлаждения М и Д – $x = 0,9$ и $y = 1,6$; для трансформаторов с видами охлаждения ДЦ и Ц – $x = 1$ и $y = 1,8$.

В задаче применяется вид охлаждения Д.

Расчет производят для относительной нагрузки $K = K1$, а затем для $K = K2$.

Для расчета $J_{МК}$ и $J_{ННТМК}$ вместо формул (последние две (3.7), (3.8)) можно использовать более простые, аппроксимирующие их формулы

$$J_{МК} = 39,7K^2 + 15,3 \quad (3.9)$$

$$J_{ННТМК} = 17,7K^2 + 5,3 \quad (3.10)$$

Температура наиболее нагретой точки обмотки в переходном тепловом режиме снижения температуры при длительности снижения, превышающей $t > 4 t_{об}$ (где $t_{об}$ - тепловая постоянная нагрева обмотки)

$$q_{ННТt} = q_{охл} + J_{Mt} + J_{ННТМК}; \quad (3.11)$$

$$J_{Mt} = J_{МК1} + (J_{Mh} - J_{МК1}) \cdot e^{-\frac{t}{t}}; \quad (3.12)$$

$$J_{ННТМК1} = J_{ННТМНОМ} \cdot K_1^y. \quad (3.13)$$

Принятые в данных формулах обозначения

$K_1 = \frac{I_1}{I_{НОМ}}$ - начальная нагрузка, предшествующая нагрузке или перегрузке K_2 , в долях номинального тока;

$K_2 = \frac{I_2}{I_{НОМ}}$ - нагрузка или перегрузка, следующая за начальной нагрузкой K_1 , в долях номинального тока;

$q_{ННТК_1}, q_{ННТК_2}$ - температура наиболее нагретой точки обмотки в установившемся тепловом режиме при K_1 и K_2 ;

$q_{ННТh}$ - температура наиболее нагретой точки обмотки в конце периода h при нагрузке K_1 и K_2 , °C;

$q_{МК1}, q_{МК2}$ - температура масла в установившемся тепловом режиме при нагрузках K_1 и K_2 , °C;

$q_{ОХЛ}$ - температура охлаждающей среды, °C;

$J_{ННТМК1}, J_{ННТМК2}$ - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях при нагрузках K_1 и K_2 , °C;

$J_{МК}, J_{M(t)}$ - превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды соответственно в установившемся тепловом режиме при нагрузке K_1 и в момент времени t при нагрузке K_2 , °C;

t - тепловая постоянная времени трансформатора, ч (принимается равной 2,5 ч при дутьевом охлаждении).

Для начала первого интервала принять $J_{Mh} = 55^\circ\text{C}$, $J_{ННТМК} = 23^\circ\text{C}$,

$$q_{ННТt} = q_{ОХЛ} + 78.$$

Температура охлаждающей среды изменяется в течение года, сезона, месяца, суток. При изменении температуры охлаждающей среды, превышающем 12°C , или при отрицательных значениях температуры охлаждающего воздуха в соответствии с ГОСТ 14209 – 85 необходимо использовать эквивалентное значение температуры. Под ним понимают неизменное значение температуры охлаждающей среды, при котором имеет

место такой же износ изоляции трансформатора, несущего неизменную нагрузку, как при переменной температуре охлаждающей среды /2/.

В результате расчета строится график $q_{\text{ННТ}}(t)$ (см. рис. 3.5)



Рисунок 3.5 – График температуры

Относительный износ витковой изоляции необходимо рассчитать по каждому из m – интервалов нагрузки, каждый продолжительностью Δt_i (в задаче $\Delta t_i = 1\text{ч.}$) Затем по каждому интервалу Δt_i следует рассчитать $q_{\text{ННТ}i}(t)$.

Расчет относительного износа производится для суток осенне – зимнего (F_3) и весенне – летнего ($F_{\text{Л}}$) периодов с использованием соответствующих токовых нагрузок и эквивалентных температур охлаждающей среды.

Тогда относительный износ за год

$$F_{\Gamma} = \frac{F_3 + F_{\text{Л}}}{2} \quad (3.14)$$

В контрольной работе принимается неизменный график нагрузки трансформатора с момента включения его в работу. Тогда относительный износ за прошедшее время работы трансформатора T_p , лет (см.рис. 3.6)

$$F_p = F_{\Gamma} \cdot T_p.$$

Если $F_p > 1$, то это означает, что ресурс трансформатора исчерпан.

Если $F_p < 1$, то остаточный ресурс составит

$$T_{\text{ост}} = L_{\text{б}}(1 - F_p), \quad (3.15)$$

где $L_{\text{б}}$ - срок службы трансформатора при работе в номинальном

режиме ($L_6 = 25$ лет).

В контрольной работе для расчета T_{OCT} принять $T_P = 5$ лет.



Рисунок 3.6 – График относительного износа

Рекомендуется такая последовательность расчета ресурса трансформатора

- 1) по формулам (3.11), (3.12), (3.13) определяется q_{HHT} в конце каждого интервала весенне – летнего графика нагрузки и строится график $q_{HHT}(t)$. Внутри каждого интервала принять линейное изменение q_{HHT} . Для первого интервала принять: $n_{MK1} = 55$ °C, $n_{HHTMK1} = 23$ °C, $K_1 = 1$.
- 2) в каждом интервале нагрузки определяется среднее значение Q_{HHTi} .
- 3) определить относительный износ на каждом интервале графика нагрузки и построить его график.
- 4) определить относительный износ изоляции за рассматриваемые сутки.
- 5) повторить п.1, 2, 3 для осеннее – зимнего графика нагрузки.
- 6) определить относительный износ изоляции за год.
- 7) определить остаточный ресурс трансформатора.

3.4 Определение ресурса батареи конденсаторов

В задаче требуется

- 1) определить ресурс конденсаторов при заданных параметрах устройства поперечно – емкостной компенсации (УПК).
- 2) рассчитать число параллельно соединенных конденсаторов для их оптимального срока службы $T = 20$ лет.

Исходные данные

Таблица 3.9 – Число параллельно соединенных конденсаторов в УПК

последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	8	10	12	14	16	18	16	14	12	10

Таблица 3.10 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (осенне – зимний период, последняя цифра шифра (первая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,2	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,1	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,3	0,5	0,2	0,6	1,4	0,1	0,2	0,4	1,3	0,4	0,6	0,1
2	0,5	0	0,3	0,4	1,4	1,2	0,4	0,5	0	0,4	0,8	0,6
3	0,2	0	0,9	0,6	0,4	0,6	1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,2
4	0,5	0,1	1	0,5	0,3	0,7	1,3	1	0,3	0,1	0,5	0,3
5	0,4	0,2	1	0,4	0,2	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,8	0,3
6	0,1	0,1	1,3	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,5	0,9	0,2
7	0,2	1	1,1	0	0,4	0,7	0,8	0,3	0,4	0,6	0,9	0,3
8	0,1	1,1	0,4	0,7	0,5	0,6	0,7	0,8	1	0,4	0,3	1
9	1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,9	1,1	1,4	0	0,1	0,2

Таблица 3.11 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (осенне – зимний период, последняя цифра шифра (вторая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,3	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,4	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,4	0,5	0,2	0,6	1,4	0,1	0,5	0,4	1,3	0,5	0,7	0,1

Продолжение таблицы 3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	0,7	0	0,3	0,4	1,4	1,2	0,6	0,5	0	0,4	0,8	0,3
3	0,2	0	0,9	0,3	0,4	0,6	1	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2
4	0,6	0,4	1	0,5	0,5	0,7	1,4	1	0,3	0,1	0,5	0,3
5	0,5	0,2	1	0,4	0,2	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,8	0,6
6	0,5	0,3	1,4	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,2
7	0,7	1	1,1	0	0,7	0,7	0,6	0,3	0,7	0,7	0,9	0,3
8	0,8	1,1	0,8	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	1	0,4	0,3	1
9	1	0,8	0,1	0,4	0,6	0,7	0,6	1,1	1,4	0	0,1	0,5

Таблица 3.12 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (весенне - летний период, последняя цифра шифра (первая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,5	0,4	0,1	0,5	1,3	0	0,1	0,8	1,5	0,3	0,5	0,2
1	0,3	0,5	0,5	0,7	1,1	0,4	0,4	0,4	1,3	0,4	0,4	0,3
2	0,2	0	0,3	0,4	1,2	1,2	0,4	0,5	0	0,5	0,8	0,6
3	0,1	0	0,9	0,6	0,4	0,6	1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,2
4	0,6	0,4	1	0,5	0,3	0,7	1,3	1	0,7	0,1	0,5	0,3
5	0,4	0,2	1	0,4	0,1	0,8	1,4	0	0,6	0,9	0,6	0,2
6	0,1	0,1	1,3	1,3	1,1	0	0,5	1	0,5	0,2	0,9	0,2
7	0,2	1	1,1	0	0,4	0,6	0,8	0,5	0,6	0,6	0,9	0,1
8	0,6	1,2	0,4	0,7	0,5	0,6	0,5	0,8	1	0,4	0,4	1
9	1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,9	1,1	1,4	1	0,1	0,2

Таблица 3.13 – Среднечасовые нагрузки наиболее загруженной фазы трансформатора (весенне - летний период, последняя цифра шифра (вторая половина суток))

шифр	Средние часовые нагрузки											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,1	0,3	0,4	0,5	1,3	0	0,4	0,8	1,5	0,2	0,5	0,9
1	0,4	0,5	0,2	0,7	1,1	0,1	0,5	0,4	1,3	0,2	0,7	0,1
2	0,4	0	0,3	0,4	1,1	1,1	0,5	0,3	0	0,4	0,8	0,3
3	0,6	0	0,9	0,5	0,4	0,6	1	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2
4	0,5	0,4	1	0,5	0,5	0,7	1,4	1	0,5	0,1	0,5	0,6
5	0,5	0,2	1	0,4	0,4	0,8	1,4	0	0,6	0,7	0,8	0,6
6	0,5	0,1	1,2	1,1	1,4	0	0,5	1	0,5	0,8	0,7	0,2
7	0,6	1	1,1	0	0,7	0,5	0,7	0,2	0,7	0,7	0,4	0,3
8	0,8	1,1	0,5	0,3	0,4	0,4	0,7	0,1	1	0,4	0,3	1
9	1	0,8	0,1	0,4	0,6	0,3	0,4	1,1	1,2	0	0,1	0,5

Таблица 3.14 – Температура охлаждающей среды

Период	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
осень	5	0	5	10	5	15	0	5	5	0
весна	10	15	20	15	20	25	15	20	15	10

Исследования, проведенные на бумажно – хлордифениловых конденсаторах, показали, что в сравнительно узком интервале рабочих температур ресурс конденсатора L можно выразить степенной зависимостью

$$L = \left(\frac{A}{Eq}\right)^{7,7}, \quad (3.16)$$

где A – постоянный коэффициент;

E – рабочая напряженность поля;

q – температура диэлектрика.

Согласно формуле (3.16), зная долговечность L_2 при некоторых условиях (E_2, q_2) , можно определить долговечность L_i в других условиях (E_i, q_i) , не определяя коэффициента A

$$L_i = L_2 \cdot \left(\frac{E_2 q_2}{E_i L_i} \right)^{7,7} . \quad (3.17)$$

В формуле (3.17) принято, что напряженность поля в конденсаторах УПК не превышает значений, вызывающих критические частичные разряды, поэтому показатель степени 7,7 будет оставаться величиной постоянной при всех режимах работы УПК в тяговой сети.

Относительная степень старения (износа) диэлектрика определим из (3.17), учитывая, что $\frac{E_i}{E_2} = \frac{I_i}{I_2}$, и принимая для номинального режима

$$\begin{aligned} I_2 &= I_H, q_2 = q_H; \\ F_i &= \frac{L_H}{L_i} = \left(\frac{I_i \cdot q_i}{I_H \cdot q_H} \right)^{7,7}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

где I_i, q_i - средние значения тока через конденсатор и температуры диэлектрика в рабочем режиме i ;

I_H - номинальный ток конденсатора.

Наибольшая допустимая рабочая температура диэлектрика конденсатора с трихлордифениловой пропиткой, работающего на промышленной частоте, обеспечивающей экономически оптимальный ресурс, составляет $q_H = 95^\circ C$. Относительный износ показывает, во сколько раз действительное старение диэлектрика больше старения изоляции при номинальном режиме. При кратностях перегрузок более 1,2 – 1,3 износ резко возрастает и превышает нормальный в 5 – 25 раз и более.

Конденсаторы УПК при изменяющейся тяговой нагрузке работают в нестационарном тепловом режиме. Выделяемое в конденсаторе тепло P_K частично расходуется на повышение внутренней температуры конденсатора (увеличение перегрева), частично рассеиваются в окружающую среду. Если происходит ступенчатое изменение нагрузки от одного стационарного значения P_{Ki} , которому соответствует установившееся над охлаждающей средой превышение температуры диэлектрика J_{K1} , для другого стационарного значения P_{K2} и соответственно J_{K2} , то закон изменения температуры диэлектрика во времени имеет вид

$$q = q_{OXL} + J_{K2} + (J_{K1} - J_{K2}) \cdot e^{-\frac{t}{t_T}}, \quad (3.19)$$

где q_{OXL} - температура охлаждающей среды;

t_T - тепловая постоянная конденсатора (принять $t_T = 3$ часа).

Уравнение, определяющее установившееся превышение температуры над температурой охлаждающей среды, имеет вид

$$J_K = q_K - q_{OXL} = P_K R_T, \quad (3.20)$$

где q_K - установившаяся температура внутри конденсатора при мощности тепловыделения P_K ;

R_T - тепловое сопротивление конденсатора (для конденсаторов КСП $R_T = 0,45 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{BT}$);

P_K - мощность тепловыделения в конденсаторе на i – м интервале, $P_K = I^2 X_C \cdot \text{tg}d$, где X_C - емкостное сопротивление конденсатора КСП – 0,66 – 40, $X_C = 10,9$ Ом;

$\text{tg}d$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

При расчете принимаем, что R_T не зависит от тепловыделения P_K , а $\text{tg}d$ является величиной постоянной, не зависящей от температуры ($\text{tg}d = 0,003$).

Средняя интенсивность износа за определенный период времени T (рис. 3.7)

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m F_i \Delta t_i, \quad (3.21)$$

где F_i - относительный износ диэлектрика конденсатора при воздействии нагрузки I_i на конденсатор на i – том интервале графика нагрузки; m – количество интервалов нагрузки.

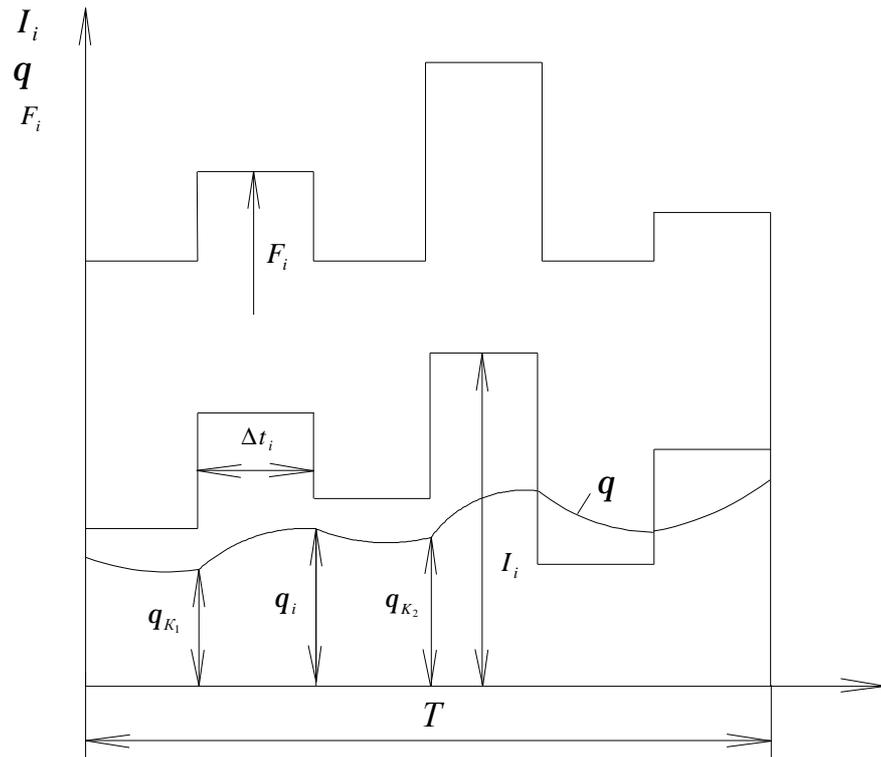


Рисунок 3.7 - Средняя интенсивность износа

Ток конденсатора

$$I_i = \frac{I_{УПК_i}}{N}, \quad (3.22)$$

где $I_{УПК_i}$ - ток, проходящий через УПК на i - том интервале графика нагрузки.

Номинальный ток УПК

$$I_{УПК_H} = I_H \cdot N, \quad (3.23)$$

где I_H - номинальный ток конденсатора (для КСП – 0,66 – 40 $I_H = 60,6$ А).

Тогда

$$K_i = \frac{I_{УПК_i}}{I_{УПК_i}}$$

$$I_i = K_i \cdot I_H.$$

С помощью приведенных формул по графику тяговой нагрузки, замеренной на действующем электрифицированном участке, или смоделированному на ЭВМ, производится машинный расчет УПК при различных N и затем выбирается оптимальное N_o из условия нормального износа конденсаторов, при котором $F_{CP} = 1$, и неперевышения максимальной температуры диэлектрика. Преимущество такого машинного метода расчета состоит в том, что, во – первых, учитываются все возможные режимы работы участка и, во – вторых, учитывается последовательность возникновения той или иной нагрузки.

В задаче условно принимается, что указанные графики распределяются на весь период – соответственно осеннее – зимний и весенне – летний.

Расчет относительного износа произвести для суток осенне – зимнего (F_3) и весенне – летнего (F_L) периодов с использованием соответствующих токовых нагрузок и эквивалентных температур охлаждающей среды.

Относительный износ равен

$$F_r = \frac{F_3 + F_L}{2} .$$

Тогда ресурс конденсаторов равен

$$L = F^{-1} \cdot L_H , \quad (3.24)$$

где L_H - срок жизни конденсатора при его номинальной нагрузке.

При F , отличающемся от единицы в 2 и более раз, следует уменьшить (при $F < 0,5$) или увеличить (при $F > 2$) число параллельно соединенных конденсаторов и повторить расчеты.

Следует учесть, что изменение числа параллельно включенных конденсаторов N на 10...15% приводит к изменению F примерно в 3...5 раз. При изменении числа параллельно соединенных конденсаторов N до N_h ток конденсатора рассчитывают по формуле

$$I_i = K_i I_H \frac{N}{N_h} .$$

Предлагается такая последовательность расчета

- 1) в начале первого интервала принимается $q_{K1} = 95^{\circ}C$ и определяется $J_{K1} = 95 - q_{OxL}$, где q_{OxL} - температура охлаждающей среды.
- 2) определяется q_{K2} в конце первого интервала, при этом $t = \Delta t_1 = 1ч$.
- 3) принимая линейное изменение температуры в интервале Δt_1 , определяется

$$q_i = \frac{q_{K1} + q_{K2}}{2}. \quad (3.25)$$

- 4) расчет продолжается для второго интервала, при этом принимается J_{K1} второго интервала равным $(q_{K2} - q_{OХЛ})$ первого интервала, а затем вычисляется Q_i для этого интервала.
- 5) расчеты повторяются для всех интервалов.
- б) далее расчет производится для осенне – зимнего периода, и определяется относительный износ за год.
- 7) производится перерасчет относительного износа при $F < 0,5$ и $F > 2$.
- 8) определяется ресурс конденсаторов.

Также решить эту задачу возможно, используя комплекс программ, разработанных лабораторией САПР КС (УрГУПС) пример кода программы приведен в приложении 1.

3.5 Организация технического обслуживания участка контактной сети по состоянию с контролем уровня надежности

Исходные данные

Стоимость управляющего воздействия $C_{II} = 3000 + 100 \cdot N$;

Ущерб от отказа $C_o = 500 + N$;

Параметр потока отказов $w = (0,03 + 0,01 \cdot N) \cdot 10^{-4}$ 1/год;

Длина участка $L = 70 + 5 \cdot N$ км;

Число проходов ЭПС в год $P = 10000 + 100 \cdot N$ раз;

Среднее число отказов старения в год $n_{cm} = 2,5 + 0,1 \cdot N$;

Фактическое число отказов в год $n_\phi = 2 + 0,1 \cdot N$;

Верхняя граница числа отказов – 12.

Теоретические сведения

Верхней границей регулирования (ВГР) называется число отказов, которое при исходных параметрах потока отказов, числе элементов и промежутка времени не превышает с заданной вероятностью при наличии одних лишь случайных отказов. При превышении ВГР ставится диагноз - старение объекта /2/.

Постановка диагноза сопряжена с риском ошибок первого и второго рода. Ошибку первого рода можно совершить, если число отказов превысило ВГР, а старение не наступило. Вероятность того, что превышение ВГР вызвано не старением

$$a = 1 - \sum_{n=0}^{12} \frac{(wLP)^n}{n!} e^{-wLP}, \quad (3.26)$$

где n - количество отказов (заданное);

W - параметр потока отказов, 1/км;

p – число проходов ЭПС;

L – развернутая длина участка.

Экономические потери от ошибки первого рода – это затраты на управляющее воздействие, в котором нет необходимости.

Ошибку второго рода можно совершить, когда число отказов не превысило ВГР, а старение появилось

$$b = \sum_{n=0}^{12} \frac{(wLR)^n}{n!} e^{-wLR} \quad (3.27)$$

Минимальные экономические потери

$$M = C_n a + n_{cm} C_o b \quad (3.28)$$

Пример решения

Таблица 3.15 – Исходные данные

Стоимость управл. воздейст., руб.	Ущерб от отказа, руб.	Параметр потока отказов, 1/год	Длина участка, км	Число проходов ЭПС в год	Среднее число отказов старения в год	Фактическое Число отказов в год
4600	900	0,035	100	19000	4,5	8

Посчитаем вероятности ошибок первого и второго родов

- при отсутствии отказов:

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^0}{0!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,9987;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9987 = 0,0013;$$

- при одном отказе

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^1}{1!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,9901;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,0099;$$

- при двух отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^2}{2!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,9615$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,0385;$$

- при трех отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^3}{3!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,8981;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,1019;$$

- при четырех отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^4}{4!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,7926;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,2074;$$

- при пяти отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^5}{5!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,6524;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,3476;$$

- при шести отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^6}{6!} \cdot \exp(-0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,497;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,5030;$$

- при семи отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^7}{7!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,3493;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,6507;$$

- при восьми отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^8}{8!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,2265;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,7735;$$

- при девяти отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^9}{9!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,1359;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,8614;$$

- при десяти отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^{10}}{10!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,0755;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,9245;$$

- при одиннадцати отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^{11}}{11!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,0396;$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,9604;$$

- при двенадцати отказах

$$a = 1 - \frac{(0,035 \cdot 10^{-4} \cdot 100)^{12}}{12!} \cdot \exp(-0.035 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 19000) = 0,0189$$

$$b = 1 - a = 1 - 0,9901 = 0,9811$$

Теперь посчитаем экономические потери

$$\min M_0 = 4600 \cdot 0,9987 + 0 = 4544,02 \text{ руб.};$$

$$\min M_1 = 4600 \cdot (1 - 0,0099) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,0013 = 4559,72 \text{ руб.};$$

$$\min M_2 = 4600 \cdot (1 - 0,0385) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,0099 = 4462,99 \text{ руб.};$$

$$\min M_3 = 4600 \cdot (1 - 0,1019) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,0385 = 4287,18 \text{ руб.};$$

$$\min M_4 = 4600 \cdot (1 - 0,2074) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,1019 = 4058,65 \text{ руб.};$$

$$\min M_5 = 4600 \cdot (1 - 0,3476) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,2074 = 3841,01 \text{ руб.};$$

$$\min M_6 = 4600 \cdot (1 - 0,5030) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,3476 = 3693,98 \text{ руб.};$$

$$\min M_7 = 4600 \cdot (1 - 0,6507) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,5030 = 3643,93 \text{ руб.};$$

$$\min M_8 = 4600 \cdot (1 - 0,7735) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,6507 = 3677,23 \text{ руб.};$$

$$\min M_9 = 4600 \cdot (1 - 0,8641) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,7735 = 3757,81 \text{ руб.};$$

$$\min M_{10} = 4600 \cdot (1 - 0,9245) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,8641 = 3846,70 \text{ руб.};$$

$$\min M_{11} = 4600 \cdot (1 - 0,9609) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,9245 = 3924,08 \text{ руб.};$$

$$\min M_{12} = 4600 \cdot (1 - 0,9811) + 4,5 \cdot 900 \cdot 0,9609 = 3978,58 \text{ руб.};$$

Вывод

Так как экономические потери не превысили стоимость управляющего воздействия, то проводить управляющее воздействие нет необходимости.

Список использованных источников

1. А.В. Ефимов, А.Г. Галкин Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. – М.:УМК МПС России,2000. – 512с.
2. А.В.Ефимов, А.Г. Галкин Надежность, диагностика и техническое обслуживание устройств электроснабжения электрических железных дорог. Учебно – методические указания для практических занятий (Часть 1). – Екатеринбург, 1997. – 29с.

Приложение 1

Пример кода для задачи 3.2 «Расчет оптимальной периодичности замены трубчатого разрядника по критерию безотказности» (Matlab):

```
disp('NTO2_2 Расчет оптимальной периодичности замен')
disp(' трубчатого разрядника по критерию безотказности')
clear
for i=50:50:600% заполнение строки наработки
t(i/50)=i;
end
disp('Введите интенсивности переходов')
lo=input('внезапных = ');
lp=input('приработочных, аргумент = ');
zp=input('приработочных, параметр = ');
eo=input('постепенных = ');
e1=input('из состояния предотказов = ');
gam=(lp/zp)*exp(-zp*t);k=e1-eo-lo;
ms=-lp*exp(-zp*t)/(k-zp)-(lp^2)*exp(-zp*t)/zp/(k-2*zp);
mo=1/k+lp/zp/(k-zp)+(lp/zp)^2/2/(k-2*zp);
m=1/k+gam/(k-zp)+(gam).^2/2/(k-2*zp);
for i=1:12
f(i)=exp(-lp/zp)*(exp(-(eo+lo)*t(i)+(lp/zp)*exp(-zp*t(i)))+eo*(m(i)*exp(-(eo+lo)*t(i))-mo*exp(-e1*t(i))));
q(i)=exp(-lp/zp)*((eo+lo+lp*exp(-zp*t(i)))*exp(-(eo+lo)*t(i)+(lp/zp)*exp(-zp*t(i)))-eo*(ms(i)-(eo+lo)*m(i))*exp(-(eo+lo)*t(i))-eo*e1*mo*exp(-e1*t(i)));
L(i)=q(i)/f(i);Lsr(i)=(-log(f(i)))/(t(i));
end
disp('наработка');disp(t);
disp('полная интенсивность отказов');disp(L);
disp('средняя интенсивность отказов');disp(Lsr)
disp('Спишите результаты и для вывода графиков нажмите любую клавишу')
pause;clg
hold on;plot(t,L,'r');plot(t,Lsr,'b'),grid;
title('Интенсивности отказов')
hold off
```

Пример кода для задачи 3.4 «Определение ресурса батареи конденсаторов» (Matlab):

```
disp('NTO2_3 Определение ресурса батареи конденсаторов')
clear
for i=400:200:3000% заполнение строки наработки
t((i-200)/200)=i;
```

```

end
disp('Введите параметры интенсивности отказов')
bet=input('параметр формы = ');
tet=input('параметр масштаба = ');
disp('Введите среднее время замены устройства')
da=input('отказавшего = ');
dp=input('исправного = ');
x=dp;q=1-exp(-(t/tet).^bet);
l=(bet/tet)*(t/tet).^(bet-1);
save nt
for i=1:14
lew(i)=dp/(da+x);
il(i)=quad8('kog',0,t(i));
praw(i)=1-1/(1-q(i)*l(i)*il(i));
end
disp('наработка');disp(t);
disp('левая часть');disp(lew);
disp('правая часть');disp(praw)
disp('Спишите результаты и для вывода графиков нажмите любую клавишу')
pause;clg
hold on;plot(t,lew,'r');plot(t,praw,'b'),grid;
title('Оптимизация по Kog')
hold off

```

Приложение 2

План практических занятий

Основы теории надежности:

- 1) Задача. Статистическая обработка опытных данных.
- 2) Семинар 1. Расчет надежности невосстанавливаемых объектов с непараметрическими моделями надежности. Задача.
- 3) Семинар 2. Расчет надежности невосстанавливаемых объектов с непараметрическими моделями надежности (продолжение). Задача.
- 4) Семинар 3. Расчет надежности невосстанавливаемых объектов с параметрическими моделями надежности. Задача.
- 5) Семинар 4. Расчет надежности восстанавливаемых объектов. Задача.
- 6) Семинар 5. Расчет надежности систем. Задача.
- 7) Семинар 6. Расчет надежности систем (продолжение). Задача.
- 8) Семинар 7. Расчет надежности резервированных объектов. Задача.
- 9) Семинар 8. Расчет надежности резервированных восстанавливаемых объектов. Задача.

Основы технической диагностики:

- 1) Задача. Оценка качества продукции.
- 2) Семинар 1. Основные понятия и определения диагностики. Задача. Составление таблицы функций неисправностей.
- 3) Семинар 2. Техническая диагностика и прогнозирование. Связь технической диагностики с качеством продукции. Задача. Проверка изоляционных свойств масла.
- 4) Семинар 3. Тестовое диагностирование. Функциональное диагностирование. Математическое моделирование при функциональном диагностировании аналоговых объектов. Задача. Метод Байеса.
- 5) Семинар 4. Математические модели с распределенными параметрами. Математические модели систем. Задача. Метод минимального риска.
- 6) Семинар 5. Статистические методы при формировании математических моделей. Таблица функций неисправностей. Задача. Метод поэлементных проверок.
- 7) Семинар 6. Модель непрерывного объекта. Модель дискретного объекта. Модель протяженного объекта. Задача. Метод групповых проверок.
- 8) Информационная энтропия и неопределенность состояния объекта. Статистические методы распознавания. Алгоритмы диагностирования.

Надежность и техобслуживание устройств электроснабжения

1) Задача. Выбор варианта модернизации устройства электроснабжения.

2) Семинар 1. Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта. Отказы оборудования контактной сети. Отказы оборудования тяговых подстанций, линий электропередачи, применение результатов расчета риска отказов.

Задача. Расчет оптимальной периодичности замены трубчатого разрядника по критерию безотказности.

3) Семинар 2. Процессы старения, разрегулировок, износов. Силовые трансформаторы и конденсаторы. Железобетонные опоры. Металлические конструкции, провода.

Задача. Расчет ресурса трансформатора тяговой подстанции.

4) Семинар 3. Контактные провода. Износ и разрегулировка контактных проводов. Воздушные стрелки. Электрическая изоляция.

5) Семинар 4. Силовые полупроводниковые приборы, коммутационная аппаратура. Кабельные ЛЭП, аккумуляторы, микросхемы, компьютеры, программное обеспечение.

Задача. Определение ресурса батареи конденсаторов.

6) Семинар 5. Расчет функциональной надежности системы электроснабжения. Стратегии технического обслуживания. Строго периодическое восстановление. Восстановление блоками.

7) Семинар 6. Стратегия с оптимизацией по критерию максимума коэффициента оперативной готовности. Обслуживание по состоянию с контролем уровня надежности. Стратегия обслуживания по состоянию с контролем монотонно изменяющегося параметра. Стратегия технического обслуживания с контролем параметра марковского типа.

Задача. Организация технического обслуживания участка контактной сети по состоянию с контролем уровня надежности.

8) Семинар 7. Стратегия технического обслуживания с марковской аппроксимацией процесса изменения параметра. Группировка управляющих воздействий в комплексы.

Приложение 3

Вопросы для тестирования

1 Основы теории надежности

- 1.1. Понятие надежности.
- 1.2. Понятия безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтно-пригодности.
- 1.3. Понятия исправности и работоспособности.
- 1.4. Понятия предельного состояния и повреждения.
- 1.5. Понятия отказа и внезапного отказа.
- 1.6. Понятия постепенного отказа и независимого отказа.
- 1.7. Понятия полного отказа и частичного отказа.
- 1.8. Понятия перемежающегося отказа и избыточности.
- 1.9. Понятия системы и элемента, относительность этих понятий.
- 1.10. Понятия невозстанавливаемого объекта и восстанавливаемого объекта.
- 1.11. Параметрический подход в расчетах надежности, его достоинства и недостатки.
- 1.12. Непараметрический подход в расчетах надежности, его область применения.
- 1.13. Области применения, достоинства и недостатки первого уровня исследований надежности.
- 1.14. Особенности структурного расчета надежности систем, его область применения.
- 1.15. Особенности функционального расчета надежности систем, его область применения.
- 1.16. Три этапа формирования надежности объекта, задачи решаемые на каждом из них.
- 1.17. Особенности надежности устройств преобразования энергии, передачи энергии, автоматики и защиты.

2 Невосстанавливаемые объекты

- 2.1. Перечислите основные показатели надежности восстанавливаемых объектов, их области изменения.
- 2.2. Понятия функций надежности и ненадежности, их свойства.
- 2.3. Вероятность безотказной работы в течение заданного интервала, их применение.
- 2.4. Понятие плотности распределения наработки до отказа, области его изменения, связь с функциями надежности и ненадежности.
- 2.5. Понятие интенсивности отказов объекта, область его изменения, три этапа, области применения.
- 2.6. Понятие средней наработки до отказа, способы ее вычисления.

- 2.7. Графическое изображение и допущения в модели отказа «нагрузка и прочность - случайные величины».
- 2.8. Особенности получения зависимости вероятности отказа в модели «нагрузка и прочность - случайные величины».
- 2.9. Понятия, области применения параметров расположения кривых плотностей распределения на вероятность отказа в модели «нагрузка и прочность - случайные величины». Понятие коэффициента запаса, способы его снижения.
- 2.10. Графическое изображение и допущения в модели отказа «нагрузка и прочность - случайные процессы» (три варианта).
- 2.11. Вид, понятие функции математического ожидания и дисперсии случайного процесса изменения нагрузки.
- 2.12. Понятие и свойства функции усталости.
- 2.13. Вероятность отказа в модели «нагрузка и прочность - случайные процессы» (три варианта), факторы влияющие на вероятность отказа.
- 2.14. Графическое изображение и допущения в модели отказа «параметр - поле допуска».
- 2.15. Порядок вывода функции ненадежности и плотности распределения наработки до отказа в модели «параметр - поле допуска».
- 2.16. Понятие моментных функций и функций параметров в модели «параметр - поле допуска», их вид.
- 2.17. Графическое изображение и допущения в модели отказа с марковской аппроксимацией.
- 2.18. Обобщенное уравнение Колмогорова для модели отказа с марковской аппроксимацией, способы его решения.
- 2.19. Вычисление показателей надежности в модели отказа с марковской аппроксимацией.
- 2.20. Модель процесса изменения параметра в виде цепи Маркова, допущения.
- 2.21. Физическое толкование закономерностей появления отказов невосстанавливаемых объектов во времени (три этапа).
- 2.22. Четыре класса зависимостей интенсивности отказов от наработки и их применение.
- 2.23. Оценки функций показателей надежности и невосстанавливаемых объектов.
- 2.24. Учет статистического влияния процесса нагрузки в параметрических моделях отказов. Ограничения в моделях.

3 Восстанавливаемые объекты

- 3.1. Два вида восстанавливаемых объектов, их описание и примеры.
- 3.2. Понятие параметра потока отказов, области его изменения.
- 3.3. Необходимые для того, чтобы, условия параметр потока отказов можно была бы считать постоянным. Практическая ценность.

- 3.4. Понятие математического ожидания наработки на отказ объекта с нулевым временем восстановления.
- 3.5. Показатели надежности объекта с конечным временем восстановления, области их применения.
- 3.6. Понятие плотности распределения наработки между очередными восстановлениями объекта с конечным временем восстановления и способы ее вычисления.
- 3.7. Понятие параметра потока восстановлений, его применение в практике расчетов.
- 3.8. Понятие функций готовности и оперативной готовности, области их изменения.
- 3.9. Понятие коэффициентов готовности и оперативной готовности, области их изменения.
- 3.10. Понятие математического ожидания времени безотказной работы, времени восстановления и времени между очередными событиями потока.
- 3.11. Оценки показателей надежности восстанавливаемых объектов.

4 Расчет структурной надежности систем

- 4.1. Понятия, сходства и различия, достоинства и недостатки, расчетов структурной и функциональной надежности систем.
- 4.2. Понятие структурной схемы надежности, ее назначение.
- 4.3. Понятие последовательного соединения по надежности, показатели надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.
- 4.4. Области изменения вероятности безотказной работы системы с последовательным соединением в зависимости от числа элементов.
- 4.5. Понятие параллельного соединения по надежности, функции надежности и ненадежности, их вычисление.
- 4.6. Вычисление математического ожидания наработки до отказа, интенсивности отказов при параллельном по надежности соединении.
- 4.7. Области изменения вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением в зависимости от числа элементов.
- 4.8. Понятие преобразования "звезда - треугольник" и область его применения.
- 4.9. Понятие преобразования "треугольник - звезда", и область его применения.
- 4.10. Расчет надежности системы из двух элементов с использованием графов состояний и переходов, вычисление показателей надежности.
- 4.11. Понятие узлов и ветвей сети.
- 4.12. Понятие графа сети.
- 4.13. Оценка надежности методом преобразованных сетей.
- 4.14. Допущения метода минимальных путей и сечений.
- 4.15. Понятия метода минимальных путей и сечений.

- 4.16. Матрица путей, ее применения.
- 4.17. Матрица сечений, ее применения.
- 4.18. Расчет вероятности отказа методом минимальных путей и сечений.
- 4.19. Учет преднамеренных отключений в методе минимальных путей и сечений.
- 4.20. Особенности, которые необходимо учитывать при расчете надежности объектов, распределенных в пространстве.
- 4.21. Непараметрический расчет надежности протяженных объектов.
- 4.22. Параметрический расчет надежности протяженных объектов.

5 Резервирование

- 5.1. Сходства и отличия структурного и функционального резервирования, их достоинства и недостатки, области применения.
- 5.2. Сходства и отличия пассивного и активного резервирования, области их применения.
- 5.3. Возможные варианты изменения условий нагружения элементов при пассивном резервировании, их влияние на надежность.
- 5.4. Понятия, виды активного резервирования, их достоинства и недостатки.
- 5.5. Структурные схемы общего и отдельного резервирования, особенности их работы.
- 5.6. Вероятности отказа и безотказной работы при общем резервировании, зависимость ее от параметров элементов.
- 5.7. Понятие плотности распределения наработки до отказа и интенсивности отказов при общем резервировании, способы их вычисления.
- 5.8. Понятие математического ожидания наработки до отказа и функции резервирования при общем резервировании, способы их вычисления.
- 5.9. Понятие вероятности отказа и безотказной работы при отдельном резервировании, способы их вычисления.
- 5.10. Понятия плотности распределения наработки до отказа и интенсивности отказов при отдельном резервировании, способы их вычисления.
- 5.11. Понятия математического ожидания наработки до отказа и функции резервирования при отдельном резервировании, способы их вычисления.
- 5.12. Особенности расчета активного резервирования в устройствах электроснабжения с учетом надежности переключателей.
- 5.13. Понятие вероятности отказа участка и узла при активном резервировании.
- 5.14. Влияние на надежность числа разбиений исходного объекта на участки.
- 5.15. Особенности пассивного резервирования с перераспределением нагрузки.

- 5.16. Пассивное резервирование в гирлянде из двух изоляторов постоянного тока.
- 5.17. Характер и причина закономерностей изменения (или постоянства) интенсивности отказов объекта с пассивным резервированием с перераспределением нагрузки.
- 5.18. Пассивное резервирование в гирлянде из трех изоляторов переменного тока.
- 5.19. Особенности ненагруженного резерва при абсолютно надежных переключателях, допущения в модели.
- 5.20. Расчет вероятности безотказной работы дублированной системы при ненагруженном резерве при абсолютно надежных переключателях.
- 5.21. Расчет плотности распределения времени безотказной работы дублированной системы при ненагруженном резерве при абсолютно надежных переключателях.
- 5.22. Расчет интенсивности отказов и математическое ожидание наработки до отказа дублированной системы при ненагруженном резерве при абсолютно надежных переключателях.
- 5.23. Особенности скользящего резервирования в устройствах электроснабжения.
- 5.24. Расчет вероятности безотказной работы объекта со скользящим резервированием.
- 5.25. Расчет плотности распределения наработки до отказа, интенсивности отказов и математического ожидания наработки до отказа объекта со скользящим резервированием.
- 5.26. Особенности резервирования по нагрузке в устройствах электроснабжения.
- 5.27. Влияние числа вентилях в группе на интенсивность отказов.
- 5.28. Описание модели дублированной восстанавливаемой системы, допущения.
- 5.29. Уравнения Колмогорова в модели дублированной восстанавливаемой системы, способы их решения.
- 5.30. Вычисление показателей готовности дублированной восстанавливаемой системы.

6 Расчет функциональной надежности систем

- 6.1. Представление процесса функционирования в моделях функциональной надежности.
- 6.2. Частные задачи и показатели функциональной надежности устройств электроснабжения, области их применения.
- 6.3. Расчет структурной надежности делителя напряжения, оценка влияния отдельных элементов.
- 6.4. Метод Монте-Карло при расчете функциональной надежности. Его достоинства и недостатки.

- 6.5. Метод моментов системы при расчете функциональной надежности. Его достоинства и недостатки.
- 6.6. Особенности расчета надежности уровня напряжения в контактной сети.
- 6.7. Факторы, влияющие на уровень напряжения в контактной сети.
- 6.8. Исходные данные при расчете надежности уровня напряжения в контактной сети, допущения.
- 6.9. Порядок заполнения расчетного перегона тяговыми нагрузками.
- 6.10. Расчет межпоездного интервала с учетом типа поездов.
- 6.11. Расчет токов фидеров и уровня напряжения у поезда.
- 6.12. Вид результатов расчета надежности уровня напряжения и выводы.
- 6.13. Особенности функционального резервирования уровня напряжения. Факторы, влияющие на него.
- 6.14. Порядок расчетов показателей надежности при функциональном резервировании и их назначение.
- 6.15. Выводы по результатам расчетов показателей надежности при функциональном резервировании.

7 Вероятность

- 7.1. Соотношение вероятности и относительной частоты, области их существования.
- 7.2. Понятия совместных и несовместных событий, полной группы событий.
- 7.3. Правила теории вероятностей, их применение.
- 7.4. Теорема Байеса, ее физический смысл и возможные применения.

8 Случайные величины

- 8.1. Понятия, виды и примеры случайных величин.
- 8.2. Понятие закона распределения случайной величины, формы его представления.
- 8.3. Понятие и свойства функции распределения.
- 8.4. Понятие математических ожиданий дискретной и непрерывной случайных величин.
- 8.5. Понятие показателей центра распределения, их геометрический смысл.
- 8.6. Понятие центральных моментов распределения, их геометрический смысл.
- 8.7. Порядок построения гистограммы распределения.
- 8.8. Оценка математического ожидания и центральных моментов по результатам наблюдений.
- 8.9. Закон распределения Вейбулла и его применение.
- 8.10. Закон распределения Гаусса и его применение.

- 8.11. Экспоненциальный закон распределения и его применение.
- 8.12. Показатели надежности для "теоретических" законов распределения.
- 8.13. Обобщенное распределение случайной величины.
- 8.14. Оценка параметров обобщенного распределения случайной величины.
- 8.15. Дискретные распределения и их применимость.
- 8.16. Порядок подбора "теоретического" закона распределения.
- 8.17. Понятие и возможные пределы изменения коэффициента корреляции.
- 8.18. Оценка коэффициента корреляции.
- 8.19. Понятие регрессионного анализа.
- 8.20. Метод наименьших квадратов, его применение.
- 8.21. Линейная регрессия X по Y и Y по X , способы вычисления коэффициентов.

9 Потоки событий

- 9.1. Понятия и примеры потоков событий, интенсивности потока.
- 9.2. Понятия регулярного и стационарного потоков.
- 9.3. Понятия ординарного потока, потока без последствия, простейшего потока.
- 9.4. Понятия функций и параметра потока событий, области их изменения.
- 9.5. Понятие среднего времени между событиями потока и его геометрический смысл.
- 9.6. Потоки Пальма и Эрланга, их применение.

10 Случайные процессы

- 10.1. Понятие процессов с непрерывным пространством состояний, примеры.
- 10.2. Понятия функции математического ожидания и дисперсии случайного процесса.
- 10.3. Понятия стационарного и нестационарного процессов, их свойства.
- 10.4. Понятия эргодический и неэргодический процессы, их свойства понятие.
- 10.5. Понятие корреляционной функции процесса и ее свойства, понятие времени корреляции процесса.
- 10.6. Понятия процессов с дискретными состояниями и непрерывным и дискретным временем, их применения.
- 10.7. Модель электрифицированного участка железной дороги в виде марковского процесса. Уравнения Колмогорова, допущения.
- 10.8. Понятие финальной (предельной) вероятности, ее свойства.
- 10.9. Понятие Марковской цепи, ее применения в расчетах надежности.
- 10.10. Оценки параметров марковских цепей.

11 Теория операционного исчисления

- 11.1. Понятия оригинала и изображения, их применение.
 - 11.2. Изображение постоянного числа.
 - 11.3. Изображение показательной функции.
 - 11.4. Изображения гиперболических функций.
 - 11.5. Изображения тригонометрических функций.
 - 11.6. Теоремы линейности и подобия, их применение.
 - 11.7. Теоремы запаздывания и затухания, их применение.
 - 11.8. Изображения производных и интегралов.
 - 11.9. Дифференцирование и интегрирование изображений.
 - 11.10. Первая теорема разложения.
 - 11.11. Вторая теорема разложения.
 - 11.12. Интегрирование обыкновенных линейных дифференциальных уравнений.
- Решение однородной системы дифференциальных уравнений.

12 Анализ эксплуатационной надежности устройств электроснабжения

- 12.1. Цель и задачи технического обслуживания.
- 12.2. Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта.
- 12.3. Структура системы электроснабжения.
- 12.4. Цели и задачи системы электроснабжения.
- 12.5. Требования к показателям эффективности функционирования.
- 12.6. Понятия тонно-километровой работы и пассажиро-километров.
- 12.7. Показатели качества электрической энергии, их применимость.
- 12.8. Показатели качества токосяема, их применимость.
- 12.9. Понятие приращение показателя эффективности функционирования системы.
- 12.10. Результаты анализа отказов контактной сети.
- 12.11. Результаты анализа отказов тяговых подстанций.
- 12.12. Характеристики состояния ограничения.
- 12.13. Правила расчета риска отказов, его особенности.
- 12.14. Результаты расчета риска отказов оборудования тяговых подстанций постоянного тока.
- 12.15. Результаты расчета риска отказов оборудования тяговых подстанций переменного тока.
- 12.16. Результаты расчета риска отказов оборудования контактной сети постоянного тока.
- 12.17. Результаты расчета риска отказов оборудования контактной сети переменного тока.

- 12.18. Причины отказов оборудования тяговых подстанций.
- 12.19. Причины отказов оборудования контактной сети.
- 12.20. Причины отказов оборудования воздушных ЛЭП.
- 12.21. Причины отказов оборудования кабельных ЛЭП.
- 12.22. Применение результатов расчета риска отказов.

13 Процессы старения, разрегулировок, износов

- 13.1. Три группы устройств электроснабжения, их особенности.
- 13.2. Основные типы опор контактной сети.
- 13.3. Общие сведения о коррозии. Активация и пассивация.
- 13.4. Понятие коррозии железобетона.
- 13.5. Факторы, действующие на бетон, возможные причины их появления.
- 13.6. Особенности электрокоррозионных повреждений опор.
- 13.7. Особенности повреждений опор, не связанные с протеканием тока.
- 13.8. Четыре группы повреждений металлических конструкций.
- 13.9. Понятие диаграммы растяжения стали, ее характерные участки.
- 13.10. Процессы старения и износа воздушных ЛЭП, их последствия.
- 13.11. Процессы старения и износа кабельных ЛЭП, их последствия.
- 13.12. Процессы старения и износа шин.
- 13.13. Процессы старения и износа несущего троса.
- 13.14. Процессы старения и износа электрических соединителей.
- 13.15. Особенности контактных проводов.
- 13.16. Распределение износа на анкерном участке.
- 13.17. Параметры местного износа и выбор параметров средств диагностирования.
- 13.18. Модель процесса приращений износа, функции параметров.
- 13.19. Причины и последствия процесса разрегулировок контактных проводов в плане.
- 13.20. Модель процесса разрегулировок положения контактных проводов в плане, допущения, область применения.
- 13.21. Модель процесса разрегулировок положения контактных проводов по высоте, допущения, область применения.
- 13.22. Причины и последствия разрегулировок воздушных стрелок.
- 13.23. Основные виды изоляции в устройствах электроснабжения, их причины старения и отказов.
- 13.24. Причины отказов изоляторов ЛЭП и контактной сети.
- 13.25. Относительная повреждаемость изоляторов контактной сети.
- 13.26. Процессы отказов тарельчатых изоляторов.
- 13.27. Отказы стержневых изоляторов.
- 13.28. Старение и отказы полимерных изоляторов.
- 13.29. Сходства и различия процессов загрязнения изоляторов ЛЭП и контактной сети.
- 13.30. Влияние влаги и пыли на загрязнение изоляторов.

- 13.31. Виды пробоя загрязненных изоляторов.
- 13.32. Атмосферный воздух, как газовая изоляция, его свойства.
- 13.33. Электрическая прочность и время до пробоя элегаза.
- 13.34. Процессы старения жидкой изоляции.
- 13.35. Три формы пробоя твердых диэлектриков, их области возникновения.
- 13.36. Понятие скорости старения твердой изоляции (8, 10 и 12 град. правила).
- 13.37. Влияние температуры, влажности и агрессивных сред на срок службы твердой изоляции.
- 13.38. Законы распределения времени до пробоя и напряжение пробоя твердой изоляции.
- 13.39. Повреждения магнитопроводов и переключающих устройств трансформаторов.
- 13.40. Повреждения отводов и вводов трансформаторов, описание механизма старения изоляции.
- 13.41. График (и пояснения) изменений температуры обмоток трансформатора.
- 13.42. Установившееся значение и зависимость превышения температуры масла над окружающей средой для трансформатора.
- 13.43. Зависимость температуры наиболее нагретой точки и средняя температура обмотки трансформатора.
- 13.44. Расчет и смысл относительного износа изоляции трансформатора.
- 13.45. Назначение и условия работы конденсаторов в КУ и УПК, три формы старения диэлектриков.
- 13.46. Понятие процесса старения изоляции конденсаторов.
- 13.47. Понятие тангенса угла диэлектрических потерь, механизм развития частичных разрядов в конденсаторе.
- 13.48. Установившееся значение превышения температуры диэлектрика конденсатора над температурой окружающей среды.
- 13.49. Зависимость от времени температуры наиболее нагретой точки диэлектрика конденсатора.
- 13.50. Понятие и расчет относительного износа диэлектрика конденсатора.
- 13.51. Виды, последствия и причины отказов в силовых полупроводниковых приборах.
- 13.52. Причины, механизм и следствия кристаллизации припоя в силовых полупроводниковых приборах.
- 13.53. Характер зависимости теплового сопротивления вентиля от наработки.
- 13.54. Влияние крутых фронтов бросков тока на отказы вентиля.
- 13.55. Виды и закономерности отказов силовых цепей преобразователей.
- 13.56. Определяющий параметр и процессы отказов масляных выключателей.
- 13.57. Отказы и ресурс вакуумных выключателей.
- 13.58. Отказы ВМГ-133 и ВМП-10.
- 13.59. Сравните процессы износа и отказов АБ-2/4 и ВАБ-28.
- 13.60. Отказы ВАБ-43.

- 13.61. Процессы разрегулировок и отказов разъединителей.
- 13.62. Процессы разрегулировок и отказов роговых и трубчатых разрядников.
- 13.63. Процессы разрегулировок и отказов разрядников РВС, РМВВ, РМВУБ, РВПК, РВБК.
- 13.64. Старение и повреждения кабельных ЛЭП.
- 13.65. Особенности устройств управления автоматики и релейной защиты.
- 13.66. Основные причины отказов устройств управления автоматики и релейной защиты.
- 13.67. Процессы старения и отказов интегральных микросхем.
Процессы старения и отказов аккумуляторов.

14 Стратегии технического обслуживания

- 14.1. Классификация стратегий технического обслуживания (СТО) по типу исходной информации о состоянии объектов.
- 14.2. Классификация стратегий технического обслуживания (СТО) по глубине управляющих воздействий (УВ).
- 14.3. Понятие критериев оптимизации СТО.
- 14.4. Рисунок и пояснения СТО со строго периодическим восстановлением.
- 14.5. Вероятность того, что случайная величина наработки между двумя последовательными восстановлениями окажется меньше t (СТО со строго периодическим восстановлением).
- 14.6. Математическое ожидание наработки между двумя аварийными УВ в СТО со строго периодическим восстановлением.
- 14.7. Средние числа профилактик всех видов в СТО со строго периодическим восстановлением.
- 14.8. Нахождение оптимального срока УВ при оптимизации по эксплуатационным затратам в СТО со строго периодическим восстановлением.
- 14.9. Рисунок и пояснения СТО с восстановлением блоками.
- 14.10. Нахождение оптимального срока УВ при оптимизации по эксплуатационным затратам в СТО с восстановлением блоками.
- 14.11. Узловая теорема восстановления, допущения и применимость СТО с оптимизацией по коэффициенту оперативной готовности ($k_{0Г}$).
- 14.12. Выражение для $k_{0Г}$ в СТО с оптимизацией по $k_{0Г}$, ее вычисление.
- 14.13. Вероятность безотказной работы объекта на интервале $(t, t+x)$ в СТО с оптимизацией по $k_{0Г}$, ее вычисление.
- 14.14. Выражение для математического ожидания интервала между УВ произвольного типа в СТО с оптимизацией по $k_{0Г}$, ее вычисление.
- 14.15. Уравнение для нахождения оптимальной периодичности УВ и способ его решения в СТО с оптимизацией по $k_{0Г}$, ее вычисление.
- 14.16. Требования к объектам, для которых возможно обслуживание по СТО с контролем уровня надежности.

- 14.17. Допущения в СТО с контролем уровня надежности.
- 14.18. Математическое описание вероятности возникновения случайных отказов в СТО с контролем уровня надежности.
- 14.19. Понятие верхней границы регулирования (ВГР).
- 14.20. Понятие, вероятность и потери для ошибки первого рода в СТО с контролем уровня надежности.
- 14.21. Понятие, вероятность и потери для ошибки второго рода в СТО с контролем уровня надежности.
- 14.22. Уравнение для нахождения ВГР и способ его решения.
- 14.23. Рисунок и пояснения СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра (достоверный контроль).
- 14.24. Рисунок и пояснения СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра (с учетом погрешности измерений).
- 14.25. Понятие удельных затрат в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра.
- 14.26. Уравнение для нахождения оптимального срока УВ в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра и способ его решения.
- 14.27. Выражение для вероятности отказа контактного провода в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра.
- 14.28. Учет степени перемешивания реализаций в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра.
- 14.29. Учет достоверности контроля (интеграл свертки) в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра.
- 14.30. Учет всех точек местного износа в СТО с контролем монотонно изменяющегося параметра.
- 14.31. Средние удельные затраты и критерий оптимизации в СТО с контролем параметра марковского типа.
- 14.32. Система уравнений стационарных вероятностей в СТО с контролем параметра марковского типа, способы ее решения.
- 14.33. Все уравнения с учетом введенного обозначения "X_i" в СТО с контролем параметра марковского типа.
- 14.34. Способ получения и правила использования матрицы управляющих решений в СТО с контролем параметра марковского типа.
- 14.35. Применение СТО с контролем параметра марковского типа для зигзага контактных проводов.
- 14.36. Допущения и критерий оптимизации в СТО с марковской аппроксимацией.
- 14.37. Граф состояний и переходов, а также уравнения Колмогорова в СТО с марковской аппроксимацией, их решение.
- 14.38. Нахождение (в общем виде) показателей надежности в СТО с марковской аппроксимацией.
- 14.39. Уравнение для нахождения оптимальной периодичности УВ и способ его решения в СТО с марковской аппроксимацией.
- 14.40. Модель и пояснения в СТО с марковской аппроксимацией износа контактных проводов.

15 Основные понятия и определения диагностики

- 15.1. Понятие технической диагностики.
- 15.2. Понятие жизненного цикла.
- 15.3. Понятия диагностирования, объекта, средства, алгоритма и системы диагностирования.
- 15.4. Цель и задачи диагностики устройств электроснабжения.
- 15.5. Понятия проверок исправности, работоспособности, правильности функционирования и поиска неисправностей их области применения.
- 15.6. Понятие глубины диагностирования.
- 15.7. Понятие системы тестового диагностирования.
- 15.8. Понятие системы функционального диагностирования.
- 15.9. Понятия прямой и косвенной диагностики их области применения.
- 15.10. Понятия элементарных проверок, их результатов и цели анализа.
- 15.11. Классификация средств диагностирования.
Вероятностный и детерминистический подходы в диагностировании.

16 Техническая диагностика и прогнозирование

- 16.1 Три типа задач технической диагностики
- 16.2 Особенности задач технического прогнозирования.
- 16.3 Классификация задач прогнозирования и диагностирования.
- 16.4 Теоретическая постановка задачи прогнозирования.
- 16.5 Приемы упрощения модели процесса прогнозирования.
- 16.6 Задачи теории и практики измерений.
- 16.7 Трудности и ограничения в решениях задачи прогнозирования.
- 16.8 Понятие критерия годности.

17 Связь технической диагностики с надежностью и качеством продукции

- 17.1 Понятие качества продукции.
- 17.2 Понятие физического аспекта надежности.
- 17.3 Понятие аппаратного аспекта надежности.
- 17.4 Понятие информационного аспекта надежности.
- 17.5 Понятие информационного аспекта надежности.
- 17.6 Понятие диагностического аспекта надежности.
- 17.7 Мероприятия, выполняемые в рамках каждого из аспектов надежности, их взаимосвязь.
- 17.8 Понятие неполноты обнаружения дефектов.
- 17.9 Неполнота обнаружения дефектов и ВИКС.
- 17.10 Понятие «приставной» диагностики.
- 17.11 Показатели качества систем диагностирования.

- 17.12 Взаимная связь и взаимное влияние показателей надежности объектов и характеристик систем диагностирования.
- 17.13 Раздел «Техническое диагностирование» в эскизных и технических проектах.

18 Тестовое диагностирование

- 18.1 Понятия непрерывных (аналоговых), дискретных и гибридных объектов.
- 18.2 Понятия сосредоточенных и протяженных объектов.
- 18.3 Понятия объектов с памятью и без памяти.
- 18.4 Периоды развития диагностики в описании дискретных объектов.
- 18.5 Машинные средства построения тестов и моделирования дискретных объектов.
- 18.6 Понятия логических моделей и графов причинно-следственных связей при моделировании аналоговых объектов.
- 18.7 Понятия теории чувствительности, методов шифрации и методов интегральной диагностики.
- 18.8 Понятие поверяющих тестов.
- 18.9 Понятие функциональных тестов.
- 18.10 Однолинейные схемы средств тестового диагностирования.
- 18.11 Автоматизированные средства тестового диагностирования.

19 Функциональное диагностирование

- 19.1 Встроенные средства контроля.
- 19.2 Самопроверяемые средства контроля.
- 19.3 Локальная и общая системы диагностирования.
- 19.4 Функциональное диагностирование непрерывных (аналоговых) объектов. Время и периодичность диагностирования

20 Математическое моделирование при функциональном диагностировании аналоговых объектов

- 20.1 Обоснование необходимости использования математических моделей (ММ) объектов диагностирования.
- 20.2 Понятие ММ.
- 20.3 Применение ММ при функциональном диагностировании.
- 20.4 Причины различия ММ исправного состояния объекта и его неисправных состояний.
- 20.5 Обоснование необходимости использования математических моделей (ММ) объектов диагностирования.
- 20.6 Понятие ММ.
- 20.7 Применение ММ при функциональном диагностировании.

20.8 Причины различия ММ исправного состояния объекта и его неисправных состояний.

21 Математические модели систем

- 21.1 ММ и эквивалентные электрические цепи гидравлического тракта.
- 21.2 Уравнение движения жидкости в ММ гидравлического тракта.
- 21.3 Упрощения в ММ и их последствия.
- 21.4 Уравнение движения жидкости в ММ гидравлического тракта в безразмерных переменных.
- 21.5 Общность ММ.
- 21.6 ММ элементов с распределенными параметрами.
- 21.7 Способы решения ММ элементов с распределенными параметрами.
- 21.8 Что необходимо сделать для формирования замкнутой системы уравнений ММ системы и почему?
- 21.9 Схема электрической цепи и ее пневмо-гидравлический аналог.
- 21.10 Использование уравнений Кирхгофа при описании ММ системы.
- 21.11 Уравнение сопротивлений элементов ветвей ММ системы.
- 21.12 Уравнения сохранения для узлов ММ системы.
- 21.13 Понятие матрицы соединений.
- 21.14 Уравнение, связывающее потенциалы узлов с падениями напряжений на пассивных элементах ветвей.
- 21.15 Понятие контура графа и матрицы контуров.
- 21.16 Понятие моделей неисправностей и особенность их учета в ММ систем.
- 21.17 Понятия простых и сложных неисправностей.
- 21.18 ММ неисправностей в случае, когда модель агрегата не содержит явного описания элементов.
- 21.19 Как моделируются неисправности, нарушающие структуру системы?
- 21.20 Соотношение времени развития неисправности с характерной постоянной времени системы и особенности их учета.
- 21.21 Какова природа (детерминированная или стохастическая) в действительности исходных данных при построении ММ и как ее учитывать?
- 21.22 Использование метода статистических испытаний при построении ММ.
- 21.23 Использование статистических методов при идентификации систем.
- 21.24 Понятие корреляционного, регрессионного методов, а также метода квазилинеаризации и их применение при построении ММ.

22 Таблица функций неисправностей

- 22.1. Понятие и свойства таблицы функций неисправностей.
- 22.2. Свойства обнаружения, различия и транспортировки неисправностей.
- 22.3. Понятия прямой и обратной задачи диагностирования.
- 22.4. Структурная и функциональная схемы непрерывного объекта. Понятие логической модели.

- 22.5. Порядок заполнения ТФН на примере входного устройства РЗ.
- 22.6. Двоичный дешифратор и его таблица истинности.
- 22.7. Понятия правильной логической сети, правильной неисправности.
- 22.8. Булева функция входных переменных дискретного комбинационного устройства, способы ее вычисления.
- 22.9. Наиболее часто встречающиеся неисправности дискретных устройств.
- 22.10. Понятие ТФН комбинационного устройства.
- 22.11. Понятие и схема конечного автомата.
- 22.12. Аналитическая форма задания функционирования конечного автомата.
- 22.13. RS - триггер и его таблица переходов - выходов.
- 22.14. Граф переходов - выходов RS – триггера, его назначение.
- 22.15. Основные причины большой размерности пространства состояний опоры.
- 22.16. Понятие несущего момента по длине опоры.
- 22.17. Загрузка кольцевого сечения опоры.
- 22.18. Нагрузка в поперечном сечении опоры по глубине залегания.
- 22.19. Потенциал грунта в месте установки опоры.
- 22.20. Учет в модели опоры пространственной протяженности.

23 Информационная энтропия и неопределенность состояния объекта

- 23.1. Зависимость степени неопределенности состояния объекта от числа возможных состояний и их вероятностей.
- 23.2. Вычисление энтропии объекта имеющего “n” возможных состояний.
- 23.3. Свойства энтропии.
- 23.4. Зависимость энтропии системы из двух элементов от вероятности их состояний (с примером расчета).
- 23.5. Энтропия объекта с непрерывным пространством состояний: рисунок и квантование.
- 23.6. Аналитическая запись энтропии для объекта с непрерывным пространством состояний.
- 23.7. Энтропия системы, если число состояний каждого элемента больше двух при их независимости.
- 23.8. Энтропия системы из элементов, состояния которых имеют взаимную зависимость.
- 23.9. Понятие меры внесенной информации в результате опыта.
- 23.10. Средняя величина информации о состоянии твердой изоляции А по наличию примесей в масле В.
- 23.11. Информация, содержащаяся в объекте В об единственном i -м - состоянии объекта А.
- 23.12. Вычисление информации о состоянии A_i , по единственному состоянию объекта B_j .

24 Статистические методы распознавания

- 24.1. Необходимость и возможности статистических методов распознавания.
- 24.2. Вероятность совместного появления у объекта состояния D_i и признака K_j .
- 24.3. Обобщенная формула Байеса, ее применение.
- 24.4. Возможности метода последовательного анализа.
- 24.5. Понятие отношения правдоподобия в методе последовательного анализа.
- 24.6. Нахождение границ в методе последовательного анализа.
- 24.7. Цель метода минимального риска.
- 24.8. Плотности распределений декремента колебаний исправной и протекторизованной опоры, их области применения.
- 24.9. Понятия вероятностей ошибок первого и второго рода в методе минимального риска.
- 24.10. Уравнение для среднего риска.
- 24.11. Нахождение граничного значения параметра в методе минимального риска.

25 Алгоритмы диагностирования

- 25.1. Понятия оптимальных и минимальных алгоритмов диагностирования, критериев их оптимизации.
- 25.2. Обобщенный вид таблицы покрытий, ее свойства.
- 25.3. Порядок заполнения таблицы покрытий.
- 25.4. Методы оптимизации таблицы покрытий.
- 25.5. Метод поэлементных проверок
 - а) $t_{cp1} = t_{cp2} = \dots t_{cpN}$, а $Q_1 \neq Q_2 \neq \dots Q_N$
 - б) $Q_1 = Q_2 = \dots Q_N$, а $t_{cp1} \neq t_{cp2} \neq \dots t_{cpN}$
- 25.6. Метод поэлементных проверок: зависимость $H(Q)$ и алгоритм $t_{cp1} \neq t_{cp2} \neq \dots t_{cpN}$ и $Q_1 \neq Q_2 \neq \dots Q_N$
- 25.7. Требования метода групповых проверок к объекту диагностирования.
- 25.8. Процедура нормирования вероятностей отказов в методе групповых проверок.
- 25.9. Поясните процедуру разбиения системы при методе групповых проверок.
- 25.10. Таблица симптомов отказов и ее применение.
- 25.11. Контроль схемы в рациональной диагностике.
- 25.12. Замена элементов на заведомо исправные и использование таблиц неисправностей.

26 Средства диагностирования

- 26.1. Три группы признаков технического состояния элементов системы электроснабжения.
- 26.2. Применение физических методов контроля. Определение датчиков.
- 26.3. Понятия визуального контроля и магнитной дефектоскопии.
- 26.4. Понятия люминесцентного и ультразвукового методов.
- 26.5. Понятия вихретокового метода и акустической эмиссии.
- 26.6. Понятия рентгеноскопии, спектрального и химического анализов.
- 26.7. Инфракрасные датчики и радиоизотопный метод.
- 26.8. Перечислите и охарактеризуйте параметры контактной сети, которые целесообразно контролировать.
- 26.9. Параметры, контролируемые ВИКС-76.
- 26.10. Оснащение ВИКС-76 и вагона НИИЭФА.
- 26.11. Электроконтактный датчик. Определение положения контактных проводов в плане.
- 26.12. Индуктивный датчик положения контактных проводов в плане.
- 26.13. Оптический датчик (на токоприемнике) положения контактных проводов в плане.
- 26.14. Оптический датчик положения контактных проводов в плане с зеркальной разверткой.
- 26.15. Видеокамера и электромагнитные датчики для контроля положения проводов в плане.
- 26.16. Определение высоты подвеса контактных проводов.
- 26.17. Датчики фиксации мест подхвата.
- 26.18. Датчики ударов и отрывов.
- 26.19. Тепловизор.
- 26.20. Датчики нажатия.
- 26.21. Датчики пути и отметчик опор.
- 26.22. Балльная оценка.
- 26.23. Погрешности измерений вагона-лаборатории.
- 26.24. Проблемы с автоматизацией измерения износа контактных проводов.
- 26.25. Классификация методов измерения износа контактных проводов.
- 26.26. Устройства измерения износа контактных проводов по оставшейся высоте (в том числе и АТ-1208).
- 26.27. Устройства измерения износа контактных проводов по высоте от базовой линии.
- 26.28. Электроконтактные датчики износа контактных проводов по ширине площадки трения.
- 26.29. Устройство с фотодиодной матрицей для измерения износа контактных проводов.
- 26.30. Телевизионное устройство для измерения износа контактных проводов.

- 26.31. Токовихревое устройство измерения износа контактных проводов.
- 26.32. Измерение натяжения проводов.
- 26.33. Пирометр ИКД, контроль питающих зажимов. Коэффициент дефектности.
- 26.34. Пирометры НРК и Термопоинт.
- 26.35. Диагностирование стыковок сталеалюминевых проводов.
Диагностирование струновых зажимов.
- 26.36. Дефектировка изоляторов измерительной штангой.
- 26.37. Дефектоскоп Филин 3.
- 26.38. Встроенная система диагностирования загрязнения изоляторов с РТЗ-50.
- 26.39. Методы контроля степени загрязнения изоляторов воздушных ЛЭП.
- 26.40. Потенциальные и электрокоррозионные диаграммы.
- 26.41. Диагностирование опор при помощи АДО-2М (два метода).
- 26.42. Диагностирование опор при помощи ДИАКОРа.
- 26.43. Диагностирование опор при помощи приборов ИЗС.
- 26.44. Диагностирование металлических конструкций при помощи МЭИТ-7.
- 26.45. Проверка цепей заземления при помощи прибора "Импульс".
- 26.46. Проверка искровых промежутков при помощи МС-06 и диодных заземлителей - М1101.
- 26.47. Дистанционные и топографические методы диагностирования кабельных линий (КЛ).
- 26.48. Процедура прожигания кабельных линий.
- 26.49. Импульсный метод диагностирования кабельных линий.
- 26.50. Метод колебательного разряда диагностирования кабельных линий.
- 26.51. Петлевой метод диагностирования кабельных линий.
- 26.52. Индуктивный метод диагностирования кабельных линий.
- 26.53. Акустический метод диагностирования кабельных линий.
- 26.54. Необходимость контроля масла и частичных разрядов в трансформаторах.
- 26.55. $\text{tg}\delta$ масла при увлажнении.
- 26.56. Извлечение газов для хроматографии масла трансформатора.
- 26.57. Хроматографическая установка.
- 26.58. Хроматограмма и ее анализ.
- 26.59. Сигнализатор водорода в масле трансформатора.
- 26.60. Оптический люминесцентный датчик нагрева обмотки трансформатора.
- 26.61. Контроль частичных разрядов в трансформаторах.
- 26.62. Контроль абсорбционных характеристик трансформатора.
- 26.63. Выявление деформации обмоток трансформатора.
- 26.64. Параметры для контроля состояния коммутационных аппаратов.
- 26.65. Виброграмма выключателя.
- 26.66. Контроль наработки высоковольтных выключателей.
- 26.67. Проверка КРУ и КРУН при помощи УПКА-1.

- 26.68. Измерение переходных сопротивлений контактов выключателей при помощи М-1.
- 26.69. Визуальный и слуховой контроль выключателей: масляных, элегазовых и вакуумных.
- 26.70. Диагностирование быстродействующих выключателей.
- 26.71. Диагностирование разъединителей, отделителей, короткозамыкателей.
- 26.72. Электронная установка контроля распределения тока между ветвями вентилей ЭУКРТ.
- 26.73. Трансформаторный датчик тока и датчик с разбалансом моста в преобразовательном агрегате.
- 26.74. Датчик коротких замыканий и контроль последовательного соединения вентилей в преобразовательном агрегате.
- 26.75. Датчики напряжения и тока в преобразовательном агрегате.
- 26.76. Превентивная защита инверторного агрегата И-ПТП.
- 26.77. Измеритель теплового сопротивления вентилей ИТСВ-1.
- 26.78. Термоиндикаторные краски для контроля нагрева вентилей.
- 26.79. Устройство контроля термоциклов УКТЦ.
- 26.80. Устройство для проверки исправности силовых вентилей.
- 26.81. Диагностирование вентильных разрядников.
- 26.82. Диагностирование ограничителей перенапряжений (ОПН).
- 26.83. Диагностирование трансформаторов тока и напряжения.
- 26.84. Испытания вторичных цепей.
- 26.85. Диагностирование изоляторов ОРУ при помощи ШИУ; ШИ-35, 110, 220.
- 26.86. Контроль температуры шин и соединений при помощи электротермометра, манометрического термометра и комплекта свеч.
- 26.87. Контроль температуры шин и соединений при помощи термокрасок и тепловизоров.
- 26.88. Методы диагностирования устройств релейной защиты и автоматики, ошибки первого и второго рода.
- 26.89. Тестовое диагностирование релейной защиты и автоматики без вывода их из работы. Мажоритарные защиты.
- 26.90. Запуск теста релейной защиты и автоматики по внешним КЗ.
- 26.91. Диагностирование токовых защит.
- 26.92. Диагностирование защит при помощи ЭУ5000 и ЭУ5001.
- 26.93. Проверка автоматического оборудования 0,4 кВ при помощи УП-04.
- 26.94. Проверка простых реле с помощью УПР-3.
- 26.95. Проверка и наладка телемеханических комплексов системы электроснабжения при помощи ПТУ и СТУ.
- 26.96. Подвижная диагностическая установка релейной защиты и автоматики.

Приложение 4

Вопросы для экзаменов

Основы теории надежности

1. Подходы к расчетам надежности.
2. Этапы формирования надежности объекта.
3. Непараметрические модели отказов невосстанавливаемых объектов.
4. Модель отказов нагрузка-прочность – случайные величины.
5. Модель отказов нагрузка-прочность – случайные процессы.
6. Модель отказов параметр-поле допуска.
7. Модель отказов с марковской аппроксимацией параметра.
8. Оценки показателей надежности невосстанавливаемых объектов.
9. Показатели надежности восстанавливаемых объектов с нулевым временем восстановления.
10. Показатели надежности восстанавливаемых объектов с конечным временем восстановления.
11. Оценки показателей надежности восстанавливаемых объектов.
12. Последовательное (по надежности) соединение.
13. Параллельное (по надежности) соединение.
14. Общее резервирование. Раздельное резервирование.
15. Активное резервирование с учетом надежности переключателей.
16. Пассивное резервирование с перераспределением нагрузки.
17. Нагруженный резерв при абсолютно надежных переключателях.
18. Скользящее резервирование. Резервирование по нагрузке.
19. Резервированные восстанавливаемые объекты.

Основы технической диагностики

1. Диагностика, основные понятия и определения.
2. Техническая диагностика и прогнозирование.
3. Связь технической диагностики с качеством продукции.
4. Тестовое диагностирование. Функциональное диагностирование.
5. Математическое моделирование при функциональном диагностировании аналоговых объектов.
6. Математические модели объектов с распределенными параметрами.
7. Математические модели систем с сосредоточенными параметрами.
8. Моделирование неисправностей.
9. Статистические методы при формировании математических моделей.
10. Таблица функций неисправностей.
11. Модели непрерывного и дискретного объектов.

12. Модель протяженного объекта.
13. Определение информационной энтропии.
14. Энтропия объекта с непрерывным пространством состояний. Энтропия системы.
15. Мера информации.
16. Метод, основанный на теореме Байеса. Метод последовательного анализа.
17. Метод минимального риска.
18. Алгоритмы диагностирования и критерии их оптимизации. Построение и оптимизация таблицы покрытий.
19. Методы поэлементных проверок и групповых проверок.
20. Метод логического анализа симптомов отказа. Рациональная диагностика.

Надежность и диагностика устройств электроснабжения

1. Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта
Отказы оборудования контактной сети. С. 162-170.
2. Отказы оборудования тяговых подстанций, линий электропередачи, применение результатов расчета риска отказов С. 171-181.
3. Процессы старения, разрегулировок, износов. Силовые трансформаторы и конденсаторы. С.214-221.
4. Железобетонные опоры Металлические конструкции, провода. С. 182-195.
5. Контактные провода. Износ и разрегулировка контактных проводов. Воздушные стрелки. С.195-204.
6. Электрическая изоляция. С. 204-213.
7. Силовые полупроводниковые приборы, коммутационная аппаратура. С.221-230.
8. Кабельные ЛЭП, аккумуляторы, микросхемы, компьютеры, программное обеспечение. С. 232-235.
9. Средства диагностирования контактной сети и линии электропередач.
10. Вагон-лаборатория для испытаний контактной сети.
11. Автоматизация измерения износа контактных проводов.
12. Средства диагностирования силового оборудования тяговых подстанций.
13. Средства диагностирования автоматики, телемеханики и релейной защиты.
14. Стратегии технического обслуживания. Строго периодическое восстановление.
15. Восстановление блоками. С.235-244.
16. Стратегия с оптимизацией по критерию максимума коэффициента оперативной готовности. Обслуживание по состоянию с контролем уровня надежности. С.244-251.
17. Стратегия обслуживания по состоянию с контролем монотонно изменяющегося параметра.

18. Стратегия технического обслуживания с контролем параметра марковского типа. С 252-262.
19. Стратегия технического обслуживания с марковской аппроксимацией процесса изменения параметра. Группировка управляющих воздействий в комплексы. С. 262-274.

Александр Васильевич Ефимов

Александр Геннадьевич Галкин

Андрей Олегович Грехов

НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Методические указания к практическим занятиям

Редактор

Лицензия на издательскую деятельность

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, УрГУПС

Редакционно – издательский отдел

Подписано в печать

Бумага писчая №1

Формат

Усл. п.л.

Уч. – изд. л.

Тираж 200

Цена договорная

Заказ