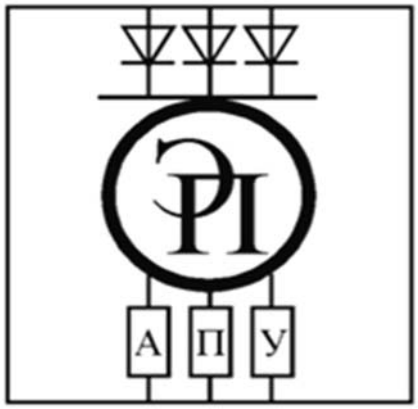
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» дневной формы обучения



Могилев 2024

УДК 62-83
ББК 31.291
Н17

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «14» декабря 2023 г., протокол № 5

Составитель А. С. Коваль

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены программа и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Надежность электрооборудования».

Учебное издание

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование показателей надежности невосстанавливаемых и неремонтируемых изделий ……..…….…. 4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование показателей надежности восстанавливаемых изделий…….……... 11
3 Лабораторная работа № 3. Оценка надежности элементов электронных изделий ……...…..... 16
4 Лабораторная работа № 4. Исследование надежности устройств автомобильной электроники ……... 20
5 Лабораторная работа № 5. Влияние температурного режима на надежность работы обмоточного узла автотракторного генератора .....…. 27
Список литературы …….……. 31

1 Лабораторная работа № 1. Исследование показателей надежности невосстанавливаемых и неремонтируемых изделий

Цель работы: изучить показатели надежности невосстанавливаемых изделий и методы определения их численных показателей надежности.

1.1 Общие сведения

Под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

При решении задач надежности сборочных единиц существенное значение имеет определение их как объектов восстанавливаемых или невосстанавливаемых, ремонтируемых или неремонтируемых.

Восстанавливаемым в некоторой конкретной ситуации является тот объект, работоспособность которого в данных условиях может быть восстановлена. Например, элементы электроники, полупроводниковые вентили, подшипники качения, лампы осветительные и сигнальные, поршневые кольца дизеля (по излому и износу), фильтрующие элементы, различные пружины (при потере упругости и появлении трещин) – суть невосстанавливаемые объекты в любой эксплуатационной ситуации.

Показатели надежности можно разбить на две группы, характеризующие невосстанавливаемые и восстанавливаемые объекты. Основные показатели надежности невосстанавливаемых объектов – это вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$, частота отказов $a(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, средняя наработка до отказа $T_{ср}$, а также гамма-процентная наработка до отказа.

Поскольку моменты отказов изделий заранее предсказать невозможно, т. е. они являются случайными событиями, то основным математическим аппаратом теории надежности является теория вероятностей и математическая статистика.

Если показатель надежности определяется с использованием аппарата математической статистики, над его обозначением ставят «*», если используется аппарат теории вероятностей, «*» не ставится.

Вероятность безотказной работы (ВБР) – это вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ при определенных условиях эксплуатации не произойдет ни одного отказа. Вероятность $P(t)$ – функция убывающая.

Причем, $0 \le P(t) \le 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$. Статическая оценка ВБР производится по формуле

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \qquad (1)$$

где N_0 – число изделий в начале испытаний ($t = 0$);

$n(t)$ – число отказавших изделий за время t.

При достаточно большом числе испытуемых изделий на основании закона больших чисел $P(t)$ совпадает с $P^*(t)$.

Вероятность отказа $Q(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ. Статистическая оценка вероятности отказа

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \tag{2}$$

Отказ и безотказная работа являются событиями противоположными и несовместимыми:

$$Q^*(t) = 1 - P^*(t). \tag{3}$$

Частота отказов $a(t)$ – это отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий:

$$a^*(t) = n(\Delta t) / (N_0 \Delta t), \tag{4}$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших изделий в интервале Δt.

Частота отказов эквивалентна плотности распределения вероятностей $f(t)$.

Частота отказов или плотность вероятности $f(t)$ определяется как производная вероятности отказов:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа, которая определяется по формуле

$$\lambda^*(t) = n(\Delta t) / (N_{ср} \Delta t), \tag{5}$$

где $N_{ср}$ – среднее число изделий, исправно работающих в интервале Δt, $N_{ср} = (N(t) + N(t+1)) / 2$;

$N(t)$, $N(t+1)$ – число изделий, исправно работающих в начале и в конце интервала Δt соответственно.

Функция плотности вероятности, интенсивности отказов и вероятности безотказной работы связаны простым соотношением:

$$\lambda^*(t) = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Средняя наработка до отказа $T_{ср}$ – математическое ожидание наработки до первого отказа:

$$T_{cp}^{*} = \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N_0} t_i, \tag{6}$$

где t_i – время безотказной работы i-го образца.

Для определения T_{cp}^{*} необходимо знать время безотказной работы всех испытуемых изделий. Если же информация об отказах не полная (не все машины отказали), зная количество отказавших изделий n_i в каждом i-м интервале, можно найти:

$$T_{cp}^{*} = \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{m} n_i t_{cp_i}, \tag{7}$$

где m – число интервалов длительностью Δt.

Значение t_{cp_i} и m находятся из следующих соотношений:

$$t_{cp_i} = (t_{i-1} + t_i)/2; \quad m = t_k / \Delta t,$$

где t_{i-1}, t_i – время начала и окончания i-го интервала;

t_k – время выхода из строя всех учтенных изделий.

Гамма-процентная наработка до отказа T_γ – это наработка, в течение которой отказ не произойдет с наперед заданной вероятностью γ, выраженной в процентах. Для изделий АТЭ, не влияющих на безопасность, $\gamma = 80\ \%...90\ \%$, а для изделий, влияющих на безопасность, $\gamma = 95\ \%...99\ \%$. Гамма-процентная наработка до отказа T_γ соответствует порядковой статистике $T_\gamma = t_i$ наблюдений об отказах с номером i, определяемым по формуле

$$i = \left[\left(1 - \frac{\gamma}{100}\right)\cdot N(0)\right] + 1. \tag{8}$$

В формуле (8) квадратные скобки означают целую часть.

Наработка до отказа изделий АТЭ как случайная величина подчиняется различным законам. Наиболее часто используемые на практике: экспоненциальный, нормальный и закон Вейбулла. Для наиболее часто применимого в автоэлектронике экспоненциального закона справедливы следующие равенства:

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

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t};$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t};$$

$$T_\gamma = -\frac{\mathrm{Ln}(\gamma/100)}{\lambda};$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}. \qquad (9)$$

Таким образом, для экспоненциального закона распределения наработки до отказа любой из параметров надежности определяется по известной величине λ.

Рассмотрим примеры расчета показателей надежности.

Пример 1 – Проводятся ресурсные испытания 400 машин. Через 3000 ч работы отказали 200 машин. Испытания продолжались и через 100 ч отказали еще 100 машин.

Определить $P^*(3000)$, $Q^*(3000)$, $P^*(3100)$, $Q^*(3100)$, $P^*(3050)$, $\lambda^*(3050)$, $a^*(3050)$.

Решение

В соответствии с (1) и (2)

$$P^*(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5;$$

$$Q^*(3000) = 200 / 400 = 0,5;$$

$$P^*(3100) = (400 - 300) / 400 = 0,25;$$

$$Q^*(3100) = 0,75.$$

Среднее число исправно работающих машин в интервале от 3000 до 3100 ч:

$$N_{ср} = (N_i - N_{i+1}) / 2 = (200 + 100) / 2 = 150.$$

Число отказавших машин за 3050 ч равно

$$n(3050) = N_0 - N_{ср} = 400 - 150 = 250,$$

откуда

$$P^*(3050) = (400 - 250) / 400 = 0,375.$$

Частота и интенсивность отказов в интервале (3000, 3100) определяется согласно (4) и (5):

$$a^*(3050) = 100 / (100 \cdot 400) = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda^*(3050) = 100 / (100 \cdot 150) = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Пример 2 – Определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку до отказа электрического двигателя малой мощности типа ДС-1 для времени t_i, равном 8000, 10000 и 12000 ч, если интенсивность отказов $\lambda = 0,15 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Закон распределения отказов экспоненциальный.

Решение

При экспоненциальном законе распределения справедливы соотношения:

$$\begin{cases} P(t) = e^{-\lambda t}; \ f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \\ T_{cp} = 1/\lambda; \ \lambda = \text{const}. \end{cases}$$

Отсюда

$$T_{cp} = 1/\lambda = 10^4 / 0{,}15 = 6{,}66 \cdot 10^4 \text{ ч};$$

$$P(8000) = \exp\left[-\frac{8000}{6{,}66 \cdot 10^4} \right] = e^{-0{,}12} = 0{,}89;$$

$$P(10000) = \exp\left[-\frac{10000}{6{,}66 \cdot 10^4} \right] = e^{-0{,}15} = 0{,}86;$$

$$P(12000) = \exp\left[-\frac{12000}{6{,}66 \cdot 10^4} \right] = e^{-0{,}18} = 0{,}84.$$

Пример 3 – Отказы гироскопического устройства на шарикоподшипниках подчинены закону распределения Вейбулла с параметрами $k = 1{,}5$ и $\lambda_0 = 10^{-4}$ ч$^{-1}$, а время его работы $t = 100$ ч. Определить показатели надежности такого устройства.

Решение

При законе распределения Вейбулла, справедливы следующие отношения:

$$\begin{cases} P(t) = e^{-\lambda_0 t^k}; \\ a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}; \\ Q(t) = 1 - P(t); \\ \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1}; \\ T_{cp} = \dfrac{\Gamma(1/k + 1)}{\lambda_0^{1/k}}, \end{cases} \qquad (10)$$

где $\Gamma(1/k + 1)$ – гамма-функция, приведенная в [2] для значений $(1/k + 1)$.

В соответствии с (10):

$$P(100) = e^{-10^{-4} \cdot 100^{1{,}5}} = 0{,}9;$$

$$a(100) = 10^{-4} \cdot 1{,}5 \cdot 100^{1{,}5-1} \cdot 0{,}9 = 1{,}35 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda(100) = a(100) / P(100) = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$T_{ср} = \frac{\Gamma(1/k+1)}{\lambda_0^{1/k}}.$$

Найдем $x = (1/k + 1) = 1{,}67$, тогда $\Gamma(x) = 0{,}9033$. Отсюда $T_{ср} = 0{,}9033 / (10^{-4})^{1/1{,}5} = 418$ ч.

1.2 Порядок выполнения работы

1 Определить вероятность безотказной работы $P^*(t)$ и вероятность отказов $Q^*(t)$ регуляторов напряжения по результатам испытания партии с количеством изделий, поставленных на испытание $N(0)$, через 2000 ч испытания (t = 2000 ч) вышло из строя $m(t)$ регуляторов. Величины $N(0)$ и $m(t)$ для различных вариантов выполнения принять из таблицы 1.

Таблица 1

Данные, шт.	Номер варианта											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N(0)$	50	60	70	80	90	100	55	65	75	85	95	105
$m(t)$	2	4	6	8	10	12	3	5	7	9	11	13

Продолжение таблицы 1

Данные, шт.	Номер варианта											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$N(0)$	110	120	130	140	150	115	125	135	145	155	160	170
$m(t)$	14	16	18	20	22	15	17	19	21	23	25	26

2 Определить плотность вероятностей (частоту) $f^*(t)$ и интенсивность $\lambda^*(t)$ отказов электронных спидометров в интервале времени 3000…4000 ч, если на испытание было поставлено $N(0)$ спидометров. За первые t = 3000 ч вышло из строя $m(t)$ изделий; в интервале времени 3000…4000 ч вышло из строя $m(\Delta t)$ спидометров.

Величины $N(t)$, $m(t)$, $m(\Delta t)$ принять по таблице 2.

3 Определить функциональные характеристики надежности датчиков температуры $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ и построить их зависимости от времени, если испытания ведутся до полного выхода из строя всех датчиков. Число отказов $m(\Delta t)$ фиксируется через каждые 100 ч в соответствии с таблицей 3. Найти 90-процентную наработку до отказа аналитически. Сравнить ее значения по кривой убыли.

4 Определить вероятность безотказной работы $P(t)$, плотность вероятностей отказов $f(t)$ для моментов времени t, равном 1000 ч, 2000 ч и 3000 ч, а также гамма-процентную T_γ (γ = 90 %) и среднюю наработки до отказа T_0 контроллеров

системы зажигания. Время работы до отказа контроллеров подчиняется экспоненциальному закону, а интенсивность отказов для различных вариантов представлена в таблице 4.

Таблица 2

Данные, шт.	Номер варианта											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N(0)$	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
$m(t)$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$m(\Delta t)$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Продолжение таблицы 2

Данные, шт.	Номер варианта											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$N(0)$	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124
$m(t)$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$m(\Delta t)$	16	17	18	19	2o	21	22	23	24	25	26	27

Таблица 3

Интервал времени Δt, ч	Номер варианта для величин $m(\Delta t)$													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0…100	10	0	0	0	2	0	12	2	90	3	20	1	12	3
100…200	13	1	0	0	1	0	11	2	75	2	18	0	11	2
200…300	14	1	3	1	1	0	8	2	55	4	17	0	11	4
300…400	15	2	5	1	2	2	7	3	50	3	16	1	10	5
400…500	16	2	7	1	4	2	5	5	40	2	15	3	10	7
500…600	16	4	9	2	5	3	4	5	35	2	13	5	9	9
600…700	17	6	12	2	5	5	4	10	30	3	12	6	9	13
700…800	20	7	15	3	7	7	4	12	28	5	12	7	9	18
800…900	25	10	19	4	8	10	4	15	28	3	11	9	8	25
900…1000	32	15	26	6	8	15	3	14	27	2	10	9	8	35
1000…1100	40	20	32	8	8	20	3	12	25	3	10	12	7	20
1100…1200	50	16	20	11	6	13	3	12	20	2	8	8	7	16
1200…1300	42	12	15	7	6	10	2	8	15	4	7	6	6	14
1300…1400	40	8	12	7	5	7	2	8	11	2	7	6	3	10
1400…1500	30	7	10	5	4	5	2	5	8	2	5	4	4	7
1500…1600	25	5	8	5	3	3	1	4	6	3	6	2	3	4
1600…1700	20	4	6	3	2	3	0	2	4	1	4	2	2	4
1700…1800	15	3	4	2	1	1	1	2	2	3	4	1	1	2
1800…1900	8	2	2	1	1	1	0	1	1	3	2	0	1	0
1900…2000	4	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1

Таблица 4

Обозначение	Значение интенсивности отказов по вариантам λ, 10^{-5} ч$^{-1}$													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
λ(*t*)	4	4,5	5	1,5	8	1	2,5	2	6	3,5	7	8,5	3	0,5

Содержание отчета

1 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 1.
2 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 2.
3 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 3.
4 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 4.

Контрольные вопросы

1 Что такое вероятность безотказной работы?
2 Каким выражением определяется вероятность безотказной работы?
3 Как по известной величине вероятности безотказной работы определить вероятность отказа?
4 Каким выражением определяется интенсивность отказов?

2 Лабораторная работа № 2. Исследование показателей надежности восстанавливаемых изделий

Цель работы: изучить показатели и функциональные характеристики надежности восстанавливаемых объектов.

2.1 Общие сведения

Восстанавливаемым в некоторой конкретной ситуации является тот объект, работоспособность которого в данных условиях может быть восстановлена.

Например, элементы электроники, полупроводниковые вентили, подшипники качения, лампы осветительные и сигнальные, поршневые кольца дизеля (по излому и износу), фильтрующие элементы, различные пружины (при потере упругости и появлении трещин) – суть невосстанавливаемые или неремонтируемые объекты в любой эксплуатационной ситуации.

При испытаниях *N* ремонтируемых изделий каждое из них после отказа может быть приведено в работоспособное состояние путем проведения текущего ремонта или замены отказавшего узла. Испытания заканчиваются, если изделие достигает предельного состояния, либо суммарное число отказов достигает заранее оговоренной величины, достаточное для оценки безотказности с достаточной степенью точности.

Последовательность наступления отказов восстанавливаемого оборудования в процессе функционирования, например автомобиля, можно представить в

виде следующей модели. Наблюдение за новым (отремонтированным) оборудованием начинается в момент времени $t = 0$ (рисунок 1).

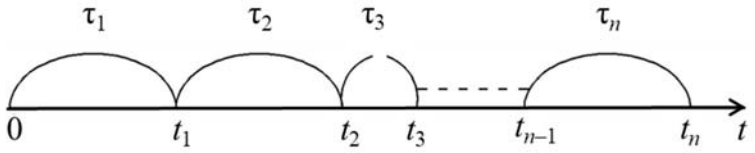


Рисунок 1

После функционирования в течение времени (наработки) τ_1 возникает отказ, затем происходит восстановление или оборудование заменяют новым за время, несоизмеримо меньшее, чем наработка до отказа τ_1. После наработки τ_2 оборудование опять отказывает и снова его ремонтируют или заменяют однотипным работоспособным. Далее процесс развивается аналогично. Поскольку все отказы возникают под действием одних и тех же факторов, естественно предположить, что наработки между отказами τ_1, τ_2, …, τ_i, …, τ_n имеют один и тот же закон распределения $F(t)=P\{\tau<t\}$.

Моменты отказов $t_1 = \tau_1$, $t_2 = \tau_1 + \tau_2$, …, $t_n = \tau_1 + \tau_2 + \ldots + \tau_n$ образуют случайный поток отказов, называемый **процессом восстановления**.

Характеристики вероятности безотказной работы $P(t)$, вероятности отказа $Q(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ могут быть распространены на ремонтируемые объекты, но только на период до первого отказа или до предельного состояния, однако существуют и специфические показатели ремонтируемых изделий.

Функциональными характеристиками безотказности ремонтируемого изделия служат функция потока отказов (функция восстановления) и функция параметра потока отказов, определяемые по данным испытаний, а также наработка на отказ.

Ведущая функция потока отказов $H(t)$ представляет собой среднее количество отказов за наработку t:

$$H^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i(t)}{N}, \tag{11}$$

где $m_i(t)$ – количество отказов i-го изделия за время t;

N – количество изделий, установленных на испытания.

Здесь и дальше параметр с «*» – параметр, определяемый на основании статистических данных.

Параметр потока отказов $\omega^*(t)$ – это отношение суммарного числа отказов в небольшом промежутке времени Δt к количеству испытуемых изделий N и ширине этого интервала Δt:

$$\omega^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i(t+\Delta t) - m_i(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta m_i(t)}{N \cdot \Delta t}, \tag{12}$$

где $m_i(t+\Delta t)$ – количество отказов *i*-го изделия за время $(t+\Delta t)$;

Δt – ширина интервала времени.

Числитель приведенного выражения представляет собой суммарное количество отказов по всем *N* изделиям в интервале времени Δt.

Средняя наработка на отказ (*наработка на отказ*) – это среднее время между соседними отказами за сравнительно небольшой промежуток времени:

$$T_{cp}^{*}(t)=\frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}, \qquad (13)$$

где m_i – количество отказов *i*-го изделия за время *t*;

t_i – время исправной работы изделия между $(i-1)$ и *i*-м отказами.

Восстановление работоспособности требует порой значительного времени, поэтому, чтобы учесть это время, ввели комплексный показатель надежности – коэффициент готовности $K_Г$, определяемый как отношение суммарного времени работы изделий к суммарному времени восстановления:

$$K_{Г}^{*}=\frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{\sum_{i=1}^{N} t_i+\sum_{i=1}^{N} \tau_i},$$

где τ_i – суммарное время восстановления работоспособности *i*-го изделия.

Коэффициент готовности представляет собой вероятность застать изделие в произвольно выбранный момент времени в работоспособном состоянии и может быть посчитан как отношение средней наработки на отказ к сумме средней наработки на отказ и среднего времени восстановления:

$$K_{Г}=\frac{T_{cp}}{T_{cp}+T_{в}}.$$

2.2 Порядок выполнения работы

1 Определить среднюю наработку на отказ T_{cp} при проведении ускоренных испытаний четырех генераторов. Наработка генераторов составила соответственно t_1, t_2, t_3, t_4 часов. За период испытаний у генераторов наблюдались соответственно m_1, m_2, m_3, m_4 отказов. Числовые значения *t* и *m* приведены в таблице 5.

2 Определить коэффициент готовности $K_Г$ аппаратуры, имеющей среднюю наработку на отказ T_{cp} и среднее время восстановления $T_{в}$.

Величины T_{cp} и $T_{в}$ заданы в таблице 6.

3 Определить значения на концах интервалов наработок и построить графики ведущей функции потока отказов $H(t)$ и функции параметра потока отказов $\omega(t)$ для электродвигателей вентиляторов. Испытаниям подвергалась

партия из пяти ($N = 5$) электродвигателей вентилятора автомобиля. Наработки электродвигателей t_i ($1 \le i \le 5$) и им соответствующие суммарные количества отказов в партии $\sum m_i(t_i)$ для вариантов 1–22 приведены в таблице 7.

Таблица 5

Номер варианта	Исходные данные испытаний							
	m_1, шт.	m_2, шт.	m_3, шт.	m_4, шт.	t_1, ч	t_2, ч	t_3, ч	t_4, ч
1	6	10	11	4	980	1020	1050	1200
2	3	5	6	2	2000	2100	2200	2500
3	2	1	3	4	1500	1600	1400	1600
4	0	5	7	4	1800	1700	1300	1000
5	1	7	4	2	2200	2500	2300	2800
6	2	1	3	4	3000	3100	3200	3600
7	3	3	4	1	1100	1150	900	700
8	1	1	2	2	900	950	1100	1200
9	3	0	2	3	880	950	1000	1300
10	1	2	1	5	3000	3300	3600	4000
11	2	2	2	2	1700	1900	1850	1950
12	3	1	2	4	2500	2700	2700	3000
13	2	0	3	0	1550	1300	1770	1000
14	4	3	2	1	1990	2000	1890	1700
15	3	2	4	6	5000	6000	7000	8000
16	4	4	5	2	4000	4500	4800	5000
17	3	3	2	1	2500	2700	2200	2000
18	4	4	2	0	3100	3500	3000	2800
19	0	1	0	2	800	800	900	1000

Таблица 6

Номер варианта	Исходные данные	
	$T_{ср}$, ч	$T_в$, ч
1	1000	50
2	1050	60
3	1100	70
4	1150	80
5	1200	90
6	1250	100
7	1300	110
8	1350	120
9	1400	130
10	1450	140
11	1500	150

Окончание таблицы 6

Номер варианта	Исходные данные	
	$T_{ср}$, ч	$T_{в}$, ч
12	1550	160
13	1600	170
14	1650	180
15	1700	190
16	1750	200
17	1800	210
18	1850	220
19	1900	230

Таблица 7

Номер варианта	Исходные данные									
	t_1	$\sum m(t_1)$	t_2	$\sum m(t_2)$	t_3	$\sum m(t_3)$	t_4	$\sum m(t_4)$	t_5	$\sum m(t_5)$
1	500	2	600	3	700	5	800	8	900	10
2	600	1	700	2	800	3	900	4	1000	5
3	400	2	500	3	600	4	700	5	800	7
4	300	1	350	2	400	3	450	4	500	6
5	200	1	300	2	400	3	500	5	600	7
6	100	2	200	3	300	4	400	5	500	7
7	50	0	100	1	150	2	200	2	250	3
8	100	1	150	2	200	2	250	3	300	4
9	200	1	250	2	300	2	350	-1	400	5
10	200	1	400	2	600	3	800	5	1000	8
11	500	3	600	4	700	5	800	7	900	9
12	500	3	550	4	600	5	650	6	700	7
13	300	2	400	3	500	4	600	6	700	8
14	400	3	450	3	500	4	550	5	600	7
15	100	2	300	4	500	6	700	8	900	11
16	300	2	500	3	700	4	900	6	1100	9
17	300	5	600	5	900	7	1200	10	1500	14
18	400	3	600	4	800	6	1000	8	1200	12
19	500	4	650	5	800	7	950	9	1100	12
20	500	4	700	5	900	6	1100	8	1300	11
21	600	5	700	6	800	7	900	9	1100	11
22	600	5	750	6	900	7	1050	9	1200	12

Содержание отчета

1 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 5.
2 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 6.
3 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 7.

Контрольные вопросы

1 Что такое ведущая функция потока отказов и параметр потока отказов? как они определяются?
2 Как определяется средняя наработка на отказ?
3 Что характеризует коэффициент готовности?

3 Лабораторная работа № 3. Оценка надежности элементов электронных изделий

Цель работы: изучение методов оценки надежности элементов электронных изделий на определение интенсивности отказов элементов изделия (резисторов, конденсаторов, транзисторов, диодов, стабилитронов) в эксплуатации с учетом их температурного и нагрузочного режимов.

3.1 Общие сведения

Одним из показателей безотказности является интенсивность отказов. Физически интенсивность отказов – вероятность отказа за час работы. Типичная зависимость интенсивности отказов от времени работы показана на рисунке 2.

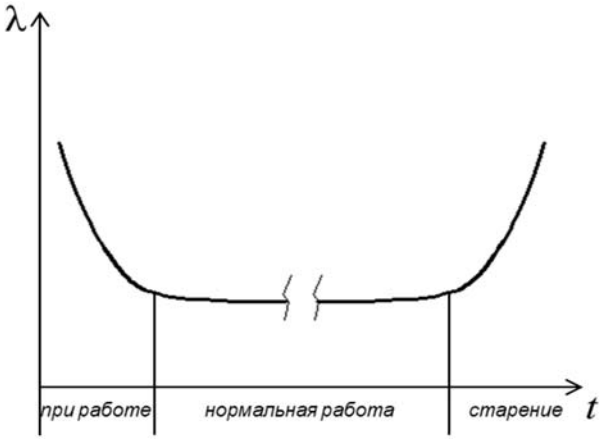


Рисунок 2

В период нормальной эксплуатации электронных изделий АТЭ их отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и потому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от времени эксплуатации изделия: $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

Интенсивность отказов элементов электронных изделий АТЭ в эксплуатации $\lambda_э$, в основном, зависит от интенсивности нагрузки элементов и окружающей их температуры $T_э$.

$$\lambda_э = \lambda_н \cdot \varphi(K_н) \cdot \varphi(T_э),$$

где $\lambda_э$ – интенсивность отказа изделия, определенная при стендовых испытаниях в нормальных условиях (температура окружающей среды $t_н$ = (20 ± 5) °С, нормальная нагрузка);

$\varphi(K_н)$ – функция, учитывающая влияние нагрузки на интенсивность эксплуатации;

$\varphi(T_э)$ – функция, учитывающая влияние температуры на интенсивность отказов в эксплуатации.

В первом приближении можно принять следующее выражение для функции $\varphi(K_н)$:

$$\varphi(K_н) = 10^{(1,3K_н - 1)}.$$

Коэффициент $K_н$ определяется следующим образом:

– для транзисторов, стабилизаторов, диодов

$$K_н = \frac{I_э}{I_н},$$

где $I_э$ – среднее эксплуатационное значение тока через силовой переход полупроводника;

$I_н$ – номинальное значение тока через переход;

– для резисторов

$$K_н = \frac{P_э}{P_н},$$

где $P_э$ – среднее эксплуатационное значение мощности, выделяемой в резисторе;

$P_н$ – номинальная мощность резистора;

– для конденсаторов

$$K_н = \frac{U_э}{U_н},$$

где $U_э$ – среднее эксплуатационное значение напряжения на конденсаторе;

$U_н$ – номинальное напряжение на конденсаторе.

Скорость химических реакций, от которых зависит старение и износ элементов, определяется уравнением Аррениуса:

$$V = C \cdot e^{-E_A/R \cdot T_э},$$

где C – коэффициент, зависящий от типа элемента;

E_A – энергия активации;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 1{,}986$ кал/(моль · град);

$T_э$ – средняя эксплуатационная температура элементов, К; $T_э = t + 273$.

Если от скорости химических реакций перейти к интенсивности отказов $\lambda_н$, получается аналогичное выражение:

$$\lambda = A \cdot e^{-E_A/R \cdot T_э},$$

где A – коэффициент, зависящий от типа элемента.

Если известна интенсивность отказов $\lambda_н$ при нормальной температуре $T_н$, то из этого выражения можно получить интенсивность отказов при температуре $T_э$:

$$\lambda_э = \lambda_н \cdot e^{\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_н} - \frac{1}{T_э}\right)};$$

$$T_н = 20 + 273 = 293 \text{ К}.$$

Таким образом,

$$\varphi(T_э) = e^{\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_н} - \frac{1}{T_э}\right)}.$$

Значение энергии активации:

– для кремниевых транзисторов, диодов, стабилитронов

$$E_A = 7 \cdot 10^3 \text{ кал/моль};$$

– для резисторов

$$E_A = 4{,}6 \cdot 10^3 \text{ кал/моль};$$

– для конденсаторов

$$E_A = 8 \cdot 10^3 \text{ кал/моль}.$$

Значение интенсивности отказов изделия, определенное при стендовых испытаниях элементов автомобильной электроники в нормальных условиях, можно принять:

– для кремниевых транзисторов, диодов и стабилитронов

$$\lambda_н = 1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1};$$

– для резисторов

$$\lambda_н = 1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1};$$

– для конденсаторов

$$\lambda_н = 9 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1};$$

– для печатной платы

$$\lambda_н = 14 \cdot 10^{-11} \text{ ч}^{-1};$$

– для паяного соединения

$$\lambda_н = 10 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}.$$

3.2 Порядок выполнения работы

1 Зарисовать схему испытуемого электронного устройства согласно заданного преподавателем варианта.

2 Произвести исследования надежности элементов схемы, оформить результаты исследований в графах таблицы 8.

В графе 1 таблицы 8 указаны обозначения элементов по схемам в соответствии с вариантами, в графе 2 – средние величины нагрузки элементов в эксплуатации. Величины принимаются в соответствии с вариантом задания. В графу 3 таблицы заносятся данные по номинальным нагрузкам элементов, в заданных в соответствии с вариантом схемах.

Необходимо рассчитать коэффициент нагрузки и занести полученную величину в графу 4 таблицы 8, затем рассчитать значение $\varphi(K_н)$ для всех элементов схемы и занести результат в графу 5 таблицы.

Для заданной преподавателем из ряда $t_э$, равной 60°, 70°, 80°, 100°, окружающей элементы электронного устройства температуры определить $\varphi(T_э)$ и заполнить значениями $\varphi(T_э)$ графу 6 таблицы 8.

Рассчитать значение интенсивности отказов в эксплуатации $\lambda_э$ и заполнить значениями $\lambda_э$ графу 7 таблицы 8.

Таблица 8

Элемент схемы	Средняя эксплуатационная величина нагрузки, А	Номинальные величины нагрузки	$K_н$	$\varphi(K_н)$	$\varphi(T_э)$	$\lambda_э$, ч^{-1}
1	2	3	4	5	6	7

Содержание отчета

1 Схема электронного устройства.

2 Выражения для расчета величин, необходимых для оценки надежности элементов.

3 Таблица 8 с исходными данными и результатами расчетов.

Контрольные вопросы

1 Что такое интенсивность отказов?

2 От чего зависит интенсивность отказов?

3 Влияет ли температура на интенсивность отказов элементов электронных устройств АТЭ? Как и почему?

4 Как влияет на интенсивность отказов элементов нагрузка?

5 Как определяется коэффициент нагрузки для полупроводников?

6 Как определяется коэффициент нагрузки для резисторов и конденсаторов?

4 Лабораторная работа № 4. Исследование надежности устройств автомобильной электроники

Цель работы: определение надежности схем электрооборудования автомобилей и тракторов путем определения показателей безотказности систем с учетом соединения их элементов, а также схемной надежности посредством структурного резервирования.

4.1 Общие сведения

При определении надёжности электрооборудования необходимо учитывать сложность их устройства. При этом различные узлы и детали обладают разной надежностью. Поэтому для конкретизации показателей надежности таких сложных устройств, какими являются автомобили и тракторы, их условно разделяют на элементы и системы. Такое разделение позволяет рассчитать показатели надежности системы в целом для выбора оптимальных вариантов конструкции уже на стадии проектирования.

Благодаря условному делению на элементы и системы можно достаточно просто и с приемлемой для практики точностью построить методику расчета сложных систем. Для этого используют понятие функционального или логически последовательного, параллельного и смешанного соединений элементов в схеме (таблицы 9 и 10).

Рассмотрим пример расчета надежности системы, состоящей из двух параллельно включенных элементов (рисунок 3). Вероятность безотказной работы первого элемента обозначим p_1, второго p_2 (здесь для сокращения записи опущены символы аргумента времени t).

Работоспособность всей системы обеспечивают следующие сочетания состояний элементов:

1) первый элемент работает, а второй отказал. Тогда вероятность этого сочетания равна $p_1(1 - p_2)$;

2) первый элемент отказал, а второй работает. Тогда вероятность этого сочетания равна $p_2(1 - p_1)$;

3) оба элемента работают. Тогда вероятность этого сочетания равна $p_1 p_2$.

Таблица 9

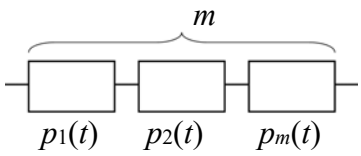
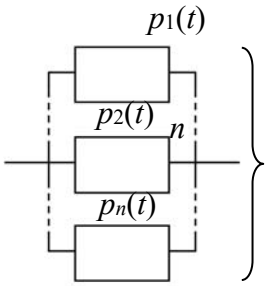
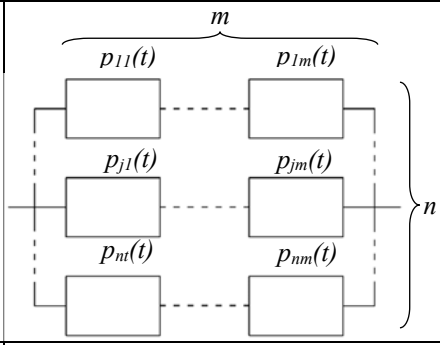
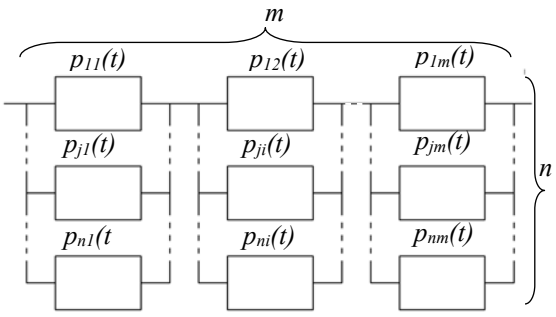
Логическое соединение элементов	Последовательное	Параллельное
Структура логического соединения элементов		
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при вероятности безотказной работы i-го элемента, равной $p_i(t) = p(t)$	$P(t)=\prod_1^m p_i(t)$	$P(t)=1-\prod_1^m\left[1-p_i(t)\right]$
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при равнонадежных элементах $p_i(t) = p(t)$	$P\left(t\right)=\left[p(t)\right]^m$	$P\left(t\right)=1-\left[1-p(t)\right]^n$

Таблица 10

Логическое соединение элементов	Смешанное при резервировании	
	общем	раздельном
Структура логического соединения элементов		
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при вероятности безотказной работы i-го элемента, равной $p_1(t)$	$P(t)=1-\left[1-\prod_1^m p_{ij}(t)\right]^n$	$P(t)=\prod_1^m\left\{1-\left[1-p_{ij}(t)\right]^n\right\}$
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при равнонадежных элементах $p_i(t) = p(t)$	$P(t)=1-\left[1-p^m(t)\right]^n$	$P(t)=\left\{1-\left[1-p(t)\right]^n\right\}^m$

Вероятность безотказной работы системы равна сумме вероятностей тех сочетаний состояний элементов, при которых обеспечивается работоспособное состояние системы

$$P_c = p_1(1-p_2) + (1-p_1)p_2 + p_1p_2 = p_1 + p_2 - p_1p_2.$$

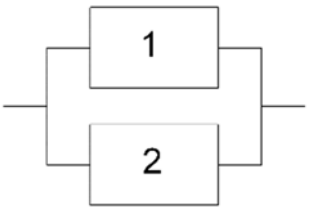


Рисунок 3

Для расчета вероятности безотказной работы (далее для краткости – надежности) сложной системы достаточно рассмотреть все возможные сочетания состояний элементов системы; выбрать те сочетания, которые обеспечивают работоспособное состояние системы; записать вероятности каждого из этих сочетаний в виде произведения вероятностей состояний всех элементов в данном сочетании, причем вероятность работоспособного состояния элемента равна вероятности его безотказной работы p_i, а вероятность неработоспособного состояния – вероятности отказа $(1 - p_i)$. Полученное произведение называется элементарным. Для записи выражения вероятности безотказной работы системы складываются все элементарные произведения.

Чтобы избежать ошибок при большом числе элементов и сложной структуре системы, описанную процедуру формализуют с помощью математического аппарата алгебры логики – булевой алгебры, в которой любая переменная или функция имеет только два значения: 0 или 1.

При анализе надежности системы ее элементы могут рассматриваться как логические переменные x_i, а сама система – как логическая функция $y_k = f(x_i)$.

Соответственно:

1) $x_i = 1$, если элемент работоспособен;

2) $x_i = 0$, если элемент отказал;

3) $y = 1$, если система работоспособна;

4) $y = 1$, если система отказала.

Если система состоит из n элементов, то общее число различных сочетаний состояний элементов (наборов значений переменных x_i) равно 2^n.

Перебор всех наборов значений переменных x_i осуществляется путем построения таблицы состояний, которая для системы, показанной на рисунке 3, имеет следующий вид (таблица 11).

Таблица 11

Номер набора	Значение переменных		
	x_1	x_2	y
0	0	0	0
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	1

Поскольку в рассматриваемой системе число элементов $n = 2$, то число разных наборов значений переменных x, равно $2^2 = 4$.

Перебор всех наборов начинают с набора с номером 0, в котором все переменные x_i принимают нулевые значения.

Перебирая все наборы переменных x_i, определяем значение переменной y, соответствующее каждому из них. В рассмотренном примере нулевому набору соответствует $y = 0$, а наборам 1, 2 и 3 – $y = 1$.

Для каждого набора, на котором $y = 1$, записывают элементарные произведения вероятностей состояний элементов, причем если x_i входит в набор как 1, то в элементарном произведении записывается вероятность безотказной работы этого элемента p_i, а если значение переменной $x_i = 0$, то в элементарное произведение входит вероятность отказа элемента $(1 – p_i)$.

Для получения вероятности безотказной работы системы складывают (логическая операция ИЛИ) элементарные произведения вероятностей состоянии элементов.

В рассматриваемом примере выходная переменная $y = 1$ на наборах 1, 2 и 3, которым соответствуют элементарные произведения $(1 – p_1)\,p_2$, $p_1(1 – p_2)$ и $p_1\,p_2$.

Вероятность безотказной работы системы

$$P_c = p_1(1 - p_2) + (1 - p_1)p_2 + p_1p_2 = p_1 + p_2 - p_1p_2.$$

Несмотря на некоторую громоздкость, логико-вероятные методы оказываются единственно возможными при расчете надежности систем, структуру которых нельзя представить в виде сочетания групп последовательно и параллельно соединенных элементов.

В общем случае в зависимости от числа элементов и способа их соединения число работоспособных состояний системы может быть различным. При этом всегда существует два предельных случая: минимальной вероятности безотказной работы – последовательное соединение, имеющее лишь одно работоспособное состояние; максимальной вероятности безотказной работы – параллельное соединение, обеспечивающее $(n – 1)$ работоспособных состояний (лишь одно неработоспособное состояние). Остальные случаи, промежуточные, соответствуют смешанному способу соединения элементов (см. таблицу 10).

Число работоспособных состояний системы можно повышать путем параллельного включения элементов, и этот метод называется методом структурного резервирования. На рисунках 22 и 23 показано резервирование изделия в целом (см. рисунок 22) и поэлементное резервирование (см. рисунок 23).

4.2 Порядок выполнения работы

1 Рассчитать возможные значения вероятностей работоспособности состояния для схем, представленных на рисунках 4–21. Исходные данные взять из таблицы 4, учитывая свой вариант. Расчеты произвести для двух случаев: $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5$ и $p_1 > p_2 > p_3 > p_4 > p_5$. По результатам расчетов выбрать

оптимальный вариант расположения элементов в схеме и сделать вывод о надежности системы в зависимости от расположения элементов в системе.

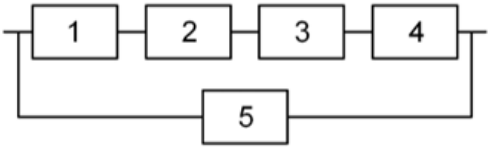


Рисунок 4 – Вариант 1

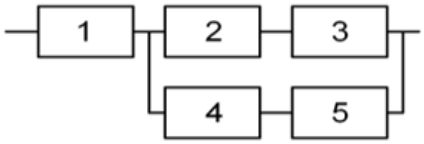


Рисунок 5 – Вариант 2

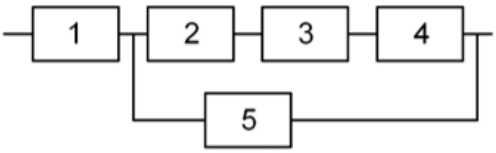


Рисунок 6 – Вариант 3

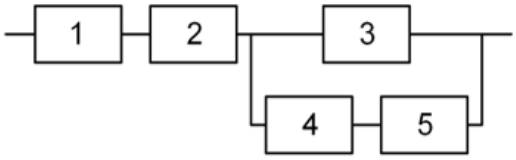


Рисунок 7 – Вариант 4

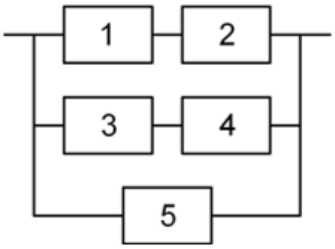


Рисунок 8 – Вариант 5

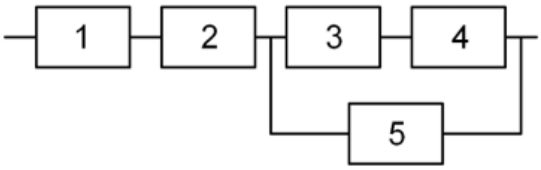
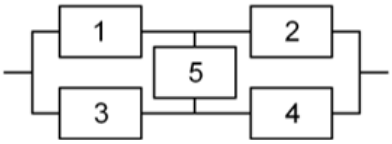


Рисунок 9 – Вариант 6



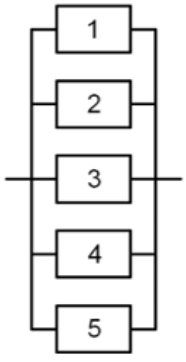
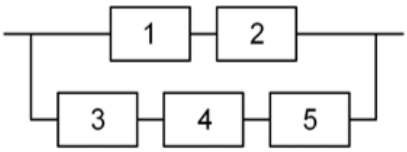


Рисунок 10 – Вариант 7



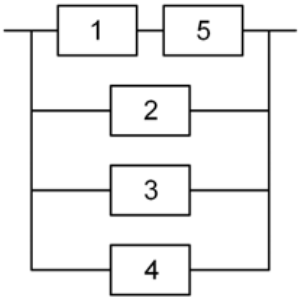


Рисунок 11 – Вариант 8

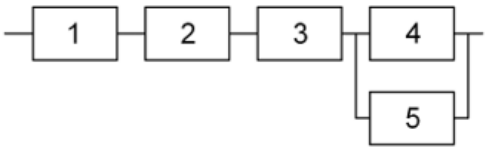


Рисунок 12 – Вариант 9

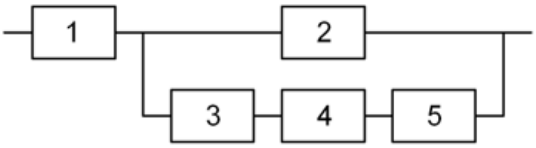


Рисунок 13 – Вариант 10

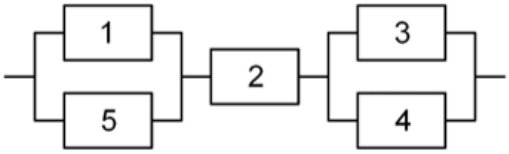


Рисунок 14 – Вариант 11

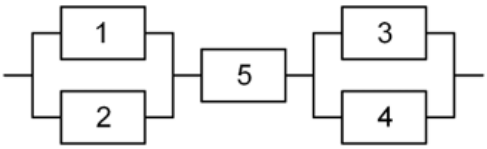


Рисунок 15 – Вариант 12

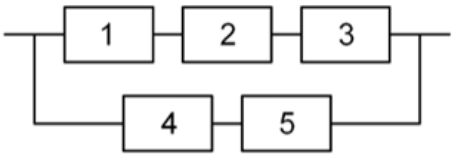


Рисунок 16 – Вариант 13

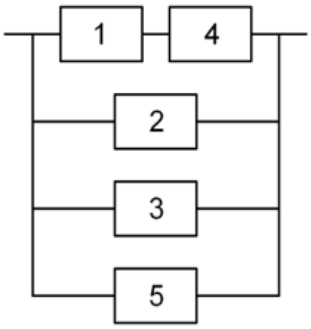


Рисунок 17 – Вариант 14

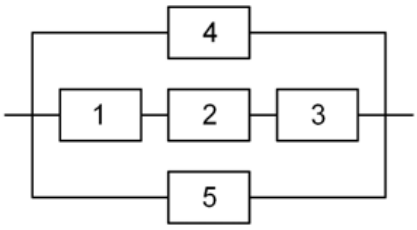


Рисунок 18 – Вариант 15

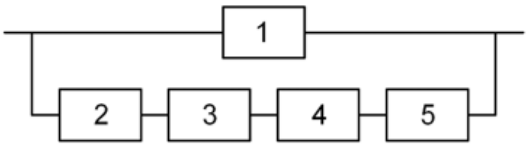


Рисунок 19 – Вариант 16

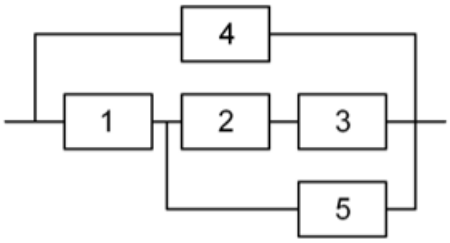


Рисунок 20 – Вариант 17

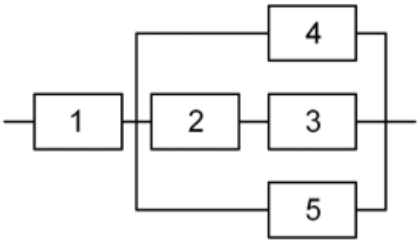


Рисунок 21 – Вариант 18

Таблица 12

Номер варианта	$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5$	$p_1 > p_2 > p_3 > p_4 > p_5$
1	0,8	0,99 > 0,95 > 0,8 > 0,76 > 0,7
2	0,79	0,98 > 0,96 > 0,79 > 0,78 > 0,69
3	0,78	0,97 > 0,81 > 0,78 > 0,76 > 0,68
4	0,77	0,96 > 0,94 > 0,77 > 0,75 > 0,67
5	0,76	0,95 > 0,92 > 0,76 > 0,72 > 0,66
6	0,75	0,94 > 0,82 > 0,75 > 0,68 > 0,65
7	0,74	0,93 > 0,89 > 0,74 > 0,71 > 0,64
8	0,73	0,92 > 0,91 > 0,73 > 0,71 > 0,63
9	0,72	0,91 > 0,89 > 0,72 > 0,68 > 0,62
10	0,71	0,9 > 0,89 > 0,71 > 0,69 > 0,61
11	0,7	0,89 > 0,88 > 0,7 > 0,65 > 0,6
12	0,69	0,88 > 0,86 > 0,69 > 0,68 > 0,59
13	0,68	0,87 > 0,86 > 0,68 > 0,64 > 0,58
14	0,67	0,86 > 0,82 > 0,67 > 0,64 > 0,57
15	0,66	0,85 > 0,83 > 0,66 > 0,62 > 0,56
16	0,65	0,84 > 0,82 > 0,65 > 0,61 > 0,55
17	0,64	0,83 > 0,73 > 0,64 > 0,58 > 0,54
18	0,63	0,82 > 0,78 > 0,63 > 0,58 > 0,53
19	0,62	0,81 > 0,78 > 0,62 > 0,58 > 0,52
20	0,61	0,8 > 0,75 > 0,61 > 0,58 > 0,51
21	0,6	0,79 > 0,75 > 0,6 > 0,56 > 0,5
22	0,59	0,78 > 0,76 > 0,59 > 0,53 > 0,49
23	0,58	0,77 > 0,68 > 0,58 > 0,52 > 0,48
24	0,57	0,76 > 0,72 > 0,57 > 0,53 > 0,47
25	0,56	0,75 > 0,72 > 0,56 > 0,48 > 0,46
26	0,55	0,74 > 0,68 > 0,55 > 0,52 > 0,45
27	0,54	0,73 > 0,63 > 0,54 > 0,48 > 0,44
28	0,53	0,72 > 0,68 > 0,53 > 0,51 > 0,43
29	0,52	0,71 > 0,69 > 0,52 > 0,49 > 0,42
30	0,51	0,7 > 0,68 > 0,51 > 0,48 > 0,41

2 Рассчитать и сравнить значения вероятностей работоспособного состояния для двух схем (см. рисунки 22 и 23). Исходные данные для расчета из таблицы 12 в соответствии с вариантом. Расчеты по вариантам провести для случая $p_1 = p_2 = p_3$ и сделать вывод об эффективности резервирования.

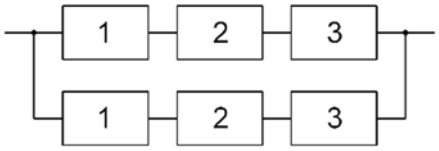


Рисунок 22

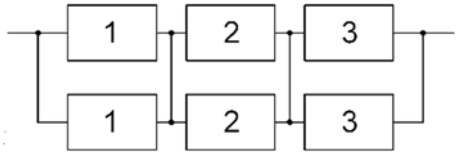


Рисунок 23

Содержание отчета

Результаты расчета схем в соответствии с рисунком и выбранным вариантом задания по исходным данным (см. таблицу 12).

Контрольные вопросы

1 Понятие «последовательное соединение» в теории надежности.
2 Понятие «параллельное соединение» в теории надежности.
3 В чем смысл применения понятий алгебры логики к определению надежности при последовательном и параллельном соединении элементов?
4 Как понимаете понятие «структурное резервирование»?

5 Лабораторная работа № 5. Влияние температурного режима на надежность работы обмоточного узла автотракторного генератора

Цель работы: исследование влияния температурного режима на надежность обмоточного узла автотракторных генераторов.

5.1 Общие сведения

Генераторы (постоянного тока) являются одним из основных элементов в схеме электрооборудования любого подвижного средства и их надежная работа имеет решающее значение.

Статические исследования выделяют как один из конструктивных элементов, определяющих долгосрочную работу генераторов его изоляцию, которая в процессе эксплуатации из-за потерь электрической энергии, в первую очередь в токоведущих деталях, подвергается тепловому воздействию. Существуют и другие факторы, влияющие на срок службы изоляции (воздействие электрических полей, механические повреждения, влияние влаги и т. д.), но доминирующим является температура и, как следствие, тепловое старение изоляции, что приводит к разрушению изоляции и ее пробою.

Допустимые температуры нагрева изоляции определяются ее классом (таблица 13). Соответственно, под нагревостойкостью понимают способность материала без существенного изменения характеристик выдерживать воздейст-

вие предельно допустимой для данного класса изоляции температуры в течение периода времени, соответствующего сроку службы машины. Нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур.

Таблица 13

Класс изоляции	A	E	B	F	H	C
$\Theta_{пред}$	105	120	130	155	180	Более 180
$\Delta\Theta$	8	9,14	9,9	11,8	13,7	–

Первые работы по определению срока службы изоляции в зависимости от рабочей температуры относились в основном к изоляции класса А.

Существует правило «восьми градусов», согласно которому превышение температуры $\Delta\Theta$ на каждые восемь градусов сокращает срок службы изоляции вдвое. Это правило записывается в виде уравнения

$$\tau = T_0 \cdot 2^{-\Theta/\Delta\Theta}, \tag{14}$$

где τ – срок службы изоляции при температуре Θ, лет;

Θ – температура изоляции, °С;

T_0 – условный срок службы изоляции при $\Theta = 0$, $T_0 = 6{,}225 \cdot 10^4$ лет.

Чем выше класс изоляции, тем медленнее происходит ее старение, что отражается на изменении коэффициента $\Delta\Theta$. В таблице 13 приведены значения коэффициента $\Delta\Theta$ для различных классов изоляции.

Более удобная модификация уравнения (14):

– для изоляции класса А:

$$\tau = T_0 \exp\left[-0{,}08664\Theta\right]; \tag{15}$$

– для изоляции класса Е:

$$\tau = T_0 \exp\left[-0{,}07584\Theta\right]; \tag{16}$$

– для изоляции класса В:

$$\tau = T_0 \exp\left[-0{,}07001\Theta\right]; \tag{17}$$

– для изоляции класса F:

$$\tau = T_0 \exp\left[-0{,}05874\Theta\right]; \tag{18}$$

– для изоляции класса Н:

$$\tau = T_0 \exp\left[-0{,}05059\Theta\right]. \tag{19}$$

Рассмотрим примеры расчета срока службы изоляции при разных температурных режимах работы.

Пример 1 – Рассчитать срок службы изоляции класса B при температуре 130 °C и срок службы изоляции класса F при температуре 155 °C.

Решение

$$\tau_{\text{B}} = 6,225 \cdot 2^{-130/9,9} = 6,97 \text{ лет};$$

$$\tau_{\text{F}} = 6,225 \cdot 2^{-155/11,8} = 6,97 \text{ лет}.$$

Пример 2 – Асинхронный двигатель с изоляцией класса F работал при температуре 145 °C. После четырех лет работы температурный режим изменился и двигатель стал работать при Θ = 175 °C. Сколько лет будет работать двигатель?

Решение

1 При Θ = 145 °C двигатель будет работать

$$\tau_{145} = 6,225 \cdot 2^{-145/11,8} = 12,447 \text{ лет}.$$

2 Двигатель отработал четыре года, значит, условный тепловой запас нагревостойкости снизился. Остаточный срок службы

$$\tau_{ост} = 12,447 - 4 = 8,447 \text{ лет}.$$

3 Условный остаточный срок службы изоляции $T_{усл}$ определяется из пропорции

$$\frac{62250}{T_{усл}} = \frac{12,447}{8,447};$$

$$T_{усл} = \frac{62250 \cdot 8,447}{12,447} = 42\ 245 \text{ лет}.$$

4 При $T_{усл}$ = 42245 и температуре Θ = 175 °C двигатель будет работать

$$\tau_{175} = 42245 \cdot 2^{-175/11,8} = 1,45 \text{ года}.$$

5 Суммарное время работы двигателя составит

$$\tau_{\Sigma} = 4 + 1,45 = 5,45 \text{ лет}.$$

5.2 Порядок выполнения работы

1 Экспериментально снята кривая нагрева автогенератора (изоляция класса F) (рисунки 24–26). Определить срок службы генератора по каждому рисунку.

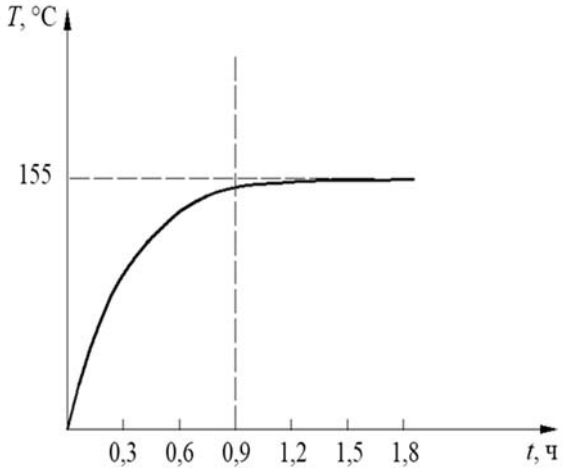


Рисунок 24

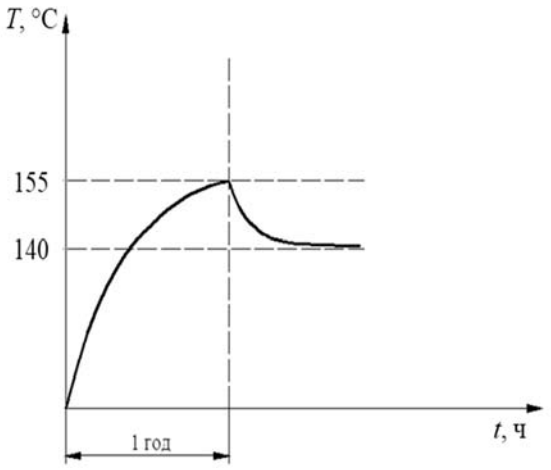


Рисунок 25

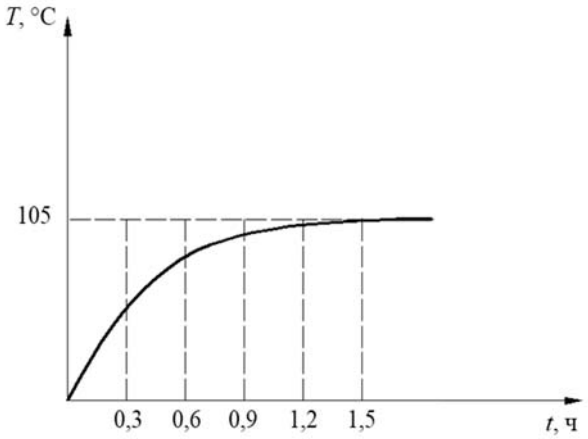


Рисунок 26

2 По этим же экспериментально снятым кривым нагрева генератора, но с изоляцией класса (выбирается в соответствии с вариантом), повторить расчеты и сделать выводы. Классы изоляции взять из таблицы 14.

Таблица 14

Вариант	Класс изоляции
1	E
2	B
3	F
4	H

Содержание отчета

1 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с рисунками 24–26.
2 Результаты расчета по исходным данным в соответствии с таблицей 14.

Контрольные вопросы

1 Назовите основные классы изоляции и допустимые для них температуры нагрева.

2 Сформулируйте правило «восьми градусов».

3 Как понимаете «условный остаточный срок службы изоляции»?

4 Как влияет на надежность работы электрооборудования длительное превышение температуры относительно номинальной?

Список литературы

1 **Хорольский, В. Я.** Надежность электроснабжения / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – Москва: Форум, 2022. – 127 с.

2 **Тимошенков, С. П.** Основы теории надежности / С. П. Тимошенков, Е. М. Симонов, В. Н. Горшко. – Москва: Юрайт, 2015. – 445 с.