

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович  
Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Дата подписания: 01.03.2023 15:41:49  
Уникальный программный ключ:  
528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и  
инженерии имени Н.И. Вавилова»**

**О.В. ЛОГАЧЁВА  
С.М. БАКИРОВ**

**НАДЕЖНОСТЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**методические указания для выполнения курсового проекта**

**Направление подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Профиль  
Электроснабжение**

**Саратов 2022**

УДК 631.173

ББК 31.261

**Р е ц е н з е н т ы:**

профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» ФГБОУ ВО Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, доктор технических наук С.Ф.Степанов;

заведующий кафедрой «ТО АПК» ФГБОУ ВО Вавиловский университет, доктор технических наук, профессор В.В. Сафонов

**Надежность электрических систем:** методические указания для выполнения курсового проекта для обучающихся направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / Сост.: О. В. Логачёва, С. М. Бакиров, // ФГБОУ ВО Вавиловский университет – Саратов: Амирит, 2022. – 26 с.

УДК 631.173  
ББК 31.261

© О. В. Логачёва, С. М. Бакиров, 2022  
© ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Расчет показателей надежности электрических систем .....	6
1.1 Ориентировочный расчет показателей надежности систем .....	6
1.2 Расчет показателей надежности системы с учетом условий эксплуатации .....	8
2. Расчет критериев надежности электрических систем .....	17
Выводы .....	22
Список литературы.....	23
Приложения.....	24

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность любого электрооборудования и аппаратуры автоматики существенным образом зависит от условий эксплуатации. Условия эксплуатации в производственных помещениях характеризуются климатическими и электромеханическими воздействиями, режимами работы и уровнем рационального технического обслуживания.

К климатическим воздействиям относятся температура, влажность, запыленность и загазованность окружающего воздуха, атмосферное давление, интенсивность дождя, выпадение росы и инея, скорость движения воздушной струи, ночные и дневные перепады температуры.

К электромеханическим воздействиям относятся вибрационные и ударные нагрузки при работе и перемещениях, колебаниях частоты и напряжения питания.

Повышенная температура вызывает перегрев электрооборудования, ускоряет старение изоляции, смазочных материалов и уплотнителей. Наоборот, пониженная температура снижает прочности пластмасс, резины, металла. Колебания температуры приводят к деформациям и заклиниванию подвижных элементов, нарушению теплообмена, снижению прочности паяных соединений.

Повышенная влажность вызывает коррозию металлов, рост плесневых грибов, снижает диэлектрические свойства изоляции.

Повышенная запыленность и наличие агрессивных газов приводят к загрязнению смазки, снижают поверхностное сопротивление и вызывают коррозию изоляционных материалов. Наличие в атмосфере углекислого газа, окислов серы и азота, а также высокая влажность приводят к образованию кислотных вод и капель конденсата, что также увеличивает скорость коррозии материалов, является одной из причин короткого замыкания токоведущих частей.

Ориентировочный расчет надежности проводят в простейших предположениях и не учитывают эксплуатационных режимов использования элементов изделия.

Уточненный расчет надежности отличается от ориентировочного тем, что в нем учитывают электрические, тепловые и прочие эксплуатационные режимы элементов изделия.

Как ориентировочный, так и уточненный расчет приводят в предположении экспоненциальной надежности всех элементов и независимости отказов. Расчеты неизмеримо возрастают, когда модели надежности элементов, блоков и узлов отличны от экспоненциальной. В этих условиях, особенно для сложных и ответственных систем, используют методы статистического моделирования с применением ЭВМ.

Определим надежность всей системы с учетом условий эксплуатации и без них.

# 1. Расчет показателей надежности электрических систем

## 1.1 Ориентировочный расчет показателей надежности системы

При проведении ориентированных расчетов надежности без учета условий эксплуатации необходимо считать, что анализируемый блок управления и защиты (БУ и З) структурно является последовательным, отказы элементов независимы и отказ одного элемента приводит к отказу всего БУ и З в целом.

В этом случае математическая модель отказов будет иметь экспоненциальный вид.

Определяем интенсивность отказа  $\lambda_i$  каждого элемента по таблице 1.

Таблица 1 – Интенсивности отказов элементов при температуре окружающей среды 20° С и относительной влажности 50-70 %

Наименование элемента	$\lambda_i \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	Наименование элемента	$\lambda_i \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
Диоды: кремниевые	0,2	Трансформаторы: силовые	1,0
Контакты (на один контакт)	2,5	Дроссели	0,35
Разъемы штепсельные: на один штырек	0,3	Интегральные микросхемы	0,25
Реле (на одну контактную группу):	0,3	Конденсаторы: слюдяные	0,25
		электролитические	0,35
Электромагнитные времени	1,2	Резисторы: металлопленочные	0,04
Транзисторы: германиевые кремниевые	0,3 0,5		

Для каждой группы, определяем групповое значение интенсивности отказов:

$$\text{для силового трансформатора: } \lambda_{j1} = n_{j1} \cdot \lambda_{i1} = 3 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 3,0 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

$$\text{для штепсельного разъема: } \lambda_{j2} = n_{j2} \cdot \lambda_{i2} = 3 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 0,9 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

$$\text{для контактора трехполюсного: } \lambda_{j3} = n_{j3} \cdot \lambda_{i3} = 3 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 22,5 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

для реле электромагнитного (три контактные группы):

$$\lambda_{j4} = n_{j4} \cdot \lambda_{i4} = 3 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 2,7 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

для реле пневматического (две контактные группы):

$$\lambda_{j5} = n_{j5} \cdot \lambda_{i5} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 2,4 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

для конденсатора электролитического:

$$\lambda_{j6} = n_{j6} \cdot \lambda_{i6} = 2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-6} = 0,7 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$$

для конденсатора слюдяного:  $\lambda_{j7} = n_{j7} \cdot \lambda_{i7} = 6 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для резистора металлопленочного:  $\lambda_{j8} = n_{j8} \cdot \lambda_{i8} = 40 \cdot 0,04 \cdot 10^{-6} = 1,6 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для резистора проволочного:  $\lambda_{j9} = n_{j9} \cdot \lambda_{i9} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,2 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для транзистора германиевого:  $\lambda_{j10} = n_{j10} \cdot \lambda_{i10} = 16 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 4,8 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для транзистора кремниевого:  $\lambda_{j11} = n_{j11} \cdot \lambda_{i11} = 8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 4,0 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для диода кремниевого:  $\lambda_{j12} = n_{j12} \cdot \lambda_{i12} = 4 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 0,8 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для интегральной микросхемы:  $\lambda_{j13} = n_{j13} \cdot \lambda_{i13} = 6 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для интегральной микросхемы:  $\lambda_{j13} = n_{j13} \cdot \lambda_{i13} = 6 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

для дросселя:  $\lambda_{j14} = n_{j14} \cdot \lambda_{i14} = 3 \cdot 0,35 \cdot 10^{-6} = 1,05 \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$

Интенсивность отказов БУ и З в целом определяется суммой интенсивностей отказов всех групп составляющих элементов:

$$\lambda_S = \Sigma(\lambda_{i1} \div \lambda_{i14}) = 47,65 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Результирующая вероятность безотказной работы без учета условий эксплуатации определяется по формуле:

$$P_S(t) = e^{-\lambda_S \cdot t} = \exp(-47,65 \cdot 10^{-6} \cdot 6000) = 0,751$$

Среднее время безотказной работы БУ и З ( $T_{cp}$ ) без учета условий эксплуатации определяется по формуле:

$$T_{cp} = 1 / \lambda_S = 1 / 47,65 \cdot 10^{-6} \cdot \text{ч}^{-1} = 21 \cdot 10^3, \text{ ч}$$

Расчет надежности анализируемого блока управления и защиты без учета условий эксплуатации показал, что результирующая вероятность безотказной работы всей системы равна 0,751, что является низкой величиной. Это является следствием высокого значения интенсивности отказа некоторых элементов системы (например, контактор, реле времени). Для увеличения вероятности безотказной работы рекомендуется, либо заменить эти элементы более надежными (например, контактор заменить пускателем), либо зарезервировать их элементами с более большей

вероятностью безотказной работы. Но на практике данные рекомендации выполнить не всегда является возможным.

## **1.2 Расчет показателей надежности системы с учетом условий эксплуатации**

При проведении уточненного расчета надежности с учетом условий эксплуатации необходимо учитывать воздействия внешней среды, в которой функционирует БУ и З (температура, влажность, давление, вибрация, запыленность и т.п.), а также особенности энергетического режима работы самого БУ и З (выделяемой элементами БУ и З тепловой энергии, величин электромагнитных нагрузок, механических напряжений и т.п.). Степень влияния различных факторов условий эксплуатации на показатели надежности различна. При приближенных расчетах учет влияния условий эксплуатации на надежность работы БУ и З производят путем введения следующих показателей:

температура поверхности элемента  $t^\circ$ ;

коэффициент внешних условий  $k_э$ , суммарно учитывающий остальные внешние условия эксплуатации;

коэффициент нагрузки элемента  $k_n$ , представляющий отношение фактических значений нагрузки к номинальным.

Параметры электрических нагрузок для различных элементов БУ и З различны. Так, для резисторов параметром нагрузки является мощность рассеивания; для конденсаторов – рабочее напряжение; для полупроводниковых диодов - выпрямленный ток и обратное напряжение; для транзисторов – суммарная мощность рассеивания на переходах в непрерывном и импульсном режимах; для трансформаторов – мощность первичной обмотки; для дросселей – плотность тока в обмотках; для электрических машин – рабочая мощность; для пускателей, переключателей, штепсельных разъемов – ток, протекающий через контакты; для реле – ток

через контакты и время нахождения обмотки под напряжением. Поэтому при расчете показателей надежности БУ и З с учетом условий эксплуатации следует различать коэффициент нагрузки по току  $k_{ii}=I/I_i$ , коэффициент нагрузки по напряжению  $k_{iu}=U/U_i$  и коэффициент нагрузки по мощности  $k_{ip}=P/P_i$

Таблица 2 – Коэффициенты нагрузки электротехнических устройств

Наименование элемента	Коэффициент нагрузки	Рекомендуемое значение
Диоды	$k_{ni}, k_{nv}$	0,7
Дроссели	$k_{ni}$	0,9
Конденсаторы	$k_{nv}$	0,85
Коммутационные элементы	$k_{ni}$	0,9
Резисторы	$k_{nw}$	0,8
Реле, контакторов, магнитные пускатели	$k_{ni}$	0,8
Транзисторы, интегральные микросхемы	$k_{nw}$	0,85
Трансформаторы силовые	$k_{nw}$	0,9
Трансформаторы вращающиеся	$k_{nv}$	0,95
Электрические машины	$k_{nw}$	0,9

Результирующее значение интенсивности отказов элементов БУ и З с учетом условий эксплуатации  $\lambda_{jэ}$  можно определить по формуле:

$$\lambda_{jэ} = \lambda_i \cdot n_j \cdot a(t, k_n)$$

При температуре  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  внутри блока управления и защиты:

для силового трансформатора:

$$\lambda_{jэ1}^{40^\circ\text{C}} = \lambda_{i1} \cdot n_{j1} \cdot a(t, k_n)_1 = 3 \cdot 1,0 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 21,0 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

для штепсельного разъёма:

$$\lambda_{jэ2}^{40^\circ\text{C}} = \lambda_{i2} \cdot n_{j2} \cdot a(t, k_n)_2 = 0,3 \cdot 3 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} = 0,495 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

для контактора трехполюсного:

$$\lambda_{jэ3}^{40^\circ\text{C}} = \lambda_{i3} \cdot n_{j3} \cdot a(t, k_n)_3 = 3 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 2,05 \cdot 10^{-6} = 46,125 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

для реле электромагнитного (три контактные группы):

$$\lambda_{jэ4}^{40^\circ\text{C}} = \lambda_{i4} \cdot n_{j4} \cdot a(t, k_n)_4 = 3 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 2,05 \cdot 10^{-6} = 5,535 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

для реле пневматического (две контактные группы):

$$\lambda_{j\text{э}5}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i52} \cdot n_{j5} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_5 = 2 \cdot 1,2 \cdot 2,05 \cdot 10^{-6} = 4,92 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора электролитического:

$$\lambda_{j\text{э}6}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i6} \cdot n_{j6} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_6 = 2 \cdot 0,35 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 0,84 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора слюдяного:

$$\lambda_{j\text{э}7}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i7} \cdot n_{j7} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_7 = 6 \cdot 0,25 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора металлопленочного:

$$\lambda_{j\text{э}8}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i8} \cdot n_{j8} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_8 = 40 \cdot 0,04 \cdot 0,82 \cdot 10^{-6} = 1,312 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора проволочного:

$$\lambda_{j\text{э}9}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i9} \cdot n_{j9} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_9 = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора германиевого:

$$\lambda_{j\text{э}10}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i10} \cdot n_{j10} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{10} = 16 \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}11}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i11} \cdot n_{j11} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{11} = 8 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для диода кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}12}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i12} \cdot n_{j12} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{12} = 4 \cdot 0,2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для интегральной микросхемы:

$$\lambda_{j\text{э}13}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i13} \cdot n_{j13} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{13} = 6 \cdot 0,25 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для дросселя:

$$\lambda_{j\text{э}14}^{40^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i14} \cdot n_{j14} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{14} = 3 \cdot 0,35 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 7,35 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

при температуре  $t_2^{\circ} = 50^{\circ}\text{C}$  внутри блока управления и защиты:

для силового трансформатора :

$$\lambda_{j\text{э}1}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i1} \cdot n_{j1} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_1 = 3 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для штепсельного разъема:

$$\lambda_{j\text{э}2}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i2} \cdot n_{j2} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_2 = 0,3 \cdot 3 \cdot 0,65 \cdot 10^{-6} = 0,585 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для контактора трехполюсного:

$$\lambda_{j\text{э}3}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i3} \cdot n_{j3} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_3 = 3 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} = 74,25 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для реле электромагнитного (три контактные группы):

$$\lambda_{j\text{э}4}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i4} \cdot n_{j4} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_4 = 3 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} = 8,91 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для реле пневматического (две контактные группы):

$$\lambda_{j\text{э}5}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i5} \cdot n_{j5} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_5 = 2 \cdot 1,2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} = 7,92 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора электролитического:

$$\lambda_{j\text{э}6}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i6} \cdot n_{j6} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_6 = 2 \cdot 0,35 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора слюдяного:

$$\lambda_{j\text{э}7}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i7} \cdot n_{j7} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_7 = 6 \cdot 0,25 \cdot 0,62 \cdot 10^{-6} = 0,93 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора металлопленочного:

$$\lambda_{j\text{э}8}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i8} \cdot n_{j8} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_8 = 40 \cdot 0,04 \cdot 0,99 \cdot 10^{-6} = 1,584 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора проволочного:

$$\lambda_{j\text{э}9}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i9} \cdot n_{j9} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_9 = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора германиевого:

$$\lambda_{j\text{э}10}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i10} \cdot n_{j10} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{10} = 16 \cdot 0,3 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}11}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i11} \cdot n_{j11} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{11} = 8 \cdot 0,5 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для диода кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}12}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i12} \cdot n_{j12} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{12} = 4 \cdot 0,2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для интегральной микросхемы:

$$\lambda_{j\text{э}13}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i13} \cdot n_{j13} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{13} = 6 \cdot 0,25 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для дросселя:

$$\lambda_{j\text{э}14}^{50^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i14} \cdot n_{j14} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_{14} = 3 \cdot 0,35 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

при температуре  $t_3^{\circ} = 60^{\circ}\text{C}$  внутри блока управления и защиты:

для силового трансформатора :

$$\lambda_{j\text{э}1}^{60^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i1} \cdot n_{j1} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_1 = 3 \cdot 1,0 \cdot 14,5 \cdot 10^{-6} = 43,5 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для штепсельного разъема:

$$\lambda_{j\text{э}2}^{60^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i2} \cdot n_{j2} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_2 = 0,3 \cdot 3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} = 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для контактора трехполюсного:

$$\lambda_{j\text{э}3}^{60^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i3} \cdot n_{j3} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_3 = 3 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 123,75 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для реле электромагнитного (три контактные группы):

$$\lambda_{j\text{э}4}^{60^{\circ}\text{C}} = \lambda_{i4} \cdot n_{j4} \cdot a(t^{\circ}, k_n)_4 = 3 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 14,85 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для реле пневматического (две контактные группы):

$$\lambda_{j\text{э}5}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i5} \cdot n_{j5} \cdot a(t^\circ, k_n)_5 = 2 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 13,2 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора электролитического:

$$\lambda_{j\text{э}6}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i6} \cdot n_{j6} \cdot a(t^\circ, k_n)_6 = 2 \cdot 0,35 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} = 2,45 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для конденсатора слюдяного:

$$\lambda_{j\text{э}7}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i7} \cdot n_{j7} \cdot a(t^\circ, k_n)_7 = 6 \cdot 0,25 \cdot 0,82 \cdot 10^{-6} = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора металлопленочного:

$$\lambda_{j\text{э}8}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i8} \cdot n_{j8} \cdot a(t^\circ, k_n)_8 = 40 \cdot 0,04 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 1,92 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для резистора проволочного:

$$\lambda_{j\text{э}9}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i9} \cdot n_{j9} \cdot a(t^\circ, k_n)_9 = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,91 \cdot 10^{-6} = 0,182 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора германиевого:

$$\lambda_{j\text{э}10}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i10} \cdot n_{j10} \cdot a(t^\circ, k_n)_{10} = 16 \cdot 0,3 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} = 11,52 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для транзистора кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}11}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i11} \cdot n_{j11} \cdot a(t^\circ, k_n)_{11} = 8 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для диода кремниевого:

$$\lambda_{j\text{э}12}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i12} \cdot n_{j12} \cdot a(t^\circ, k_n)_{12} = 4 \cdot 0,2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для интегральной микросхемы:

$$\lambda_{j\text{э}13}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i13} \cdot n_{j13} \cdot a(t^\circ, k_n)_{13} = 6 \cdot 0,25 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

для дросселя:

$$\lambda_{j\text{э}14}^{60^\circ\text{C}} = \lambda_{i14} \cdot n_{j14} \cdot a(t^\circ, k_n)_{14} = 3 \cdot 0,35 \cdot 14,5 \cdot 10^{-6} = 15,225 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

Значения коэффициента, учитывающего условия эксплуатации  $a(t^\circ, k_n)$  для элементов БУ и З в зависимости от коэффициента нагрузки и температуры элементов определены по зависимостям представленным на рисунке 2.

Суммарная интенсивность отказов  $\Sigma\lambda_{j\text{э}}$  и интенсивность отказов всего БУ и З, с учетом условий эксплуатации  $\lambda_{s\text{э}}$  определяется по формуле:

$$\lambda_{s\text{э}} = k_{\text{э}} \cdot \Sigma\lambda_{j\text{э}}$$

$$\text{для } 40^\circ\text{C}: \lambda_{s\text{э}}^{40^\circ\text{C}} = k_{\text{э}} \cdot \Sigma(\lambda_{j\text{э}1}^{40^\circ\text{C}} \div \lambda_{j\text{э}14}^{40^\circ\text{C}}) = 2 \cdot 101 \cdot 10^{-6} = 202 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

$$\text{для } 50^\circ\text{C}: \lambda_{s\text{э}}^{50^\circ\text{C}} = k_{\text{э}} \cdot \Sigma(\lambda_{j\text{э}1}^{50^\circ\text{C}} \div \lambda_{j\text{э}14}^{50^\circ\text{C}}) = 2 \cdot 152,4 \cdot 10^{-6} = 304,7 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

$$\text{для } 60^\circ\text{C}: \lambda_{s\text{э}}^{60^\circ\text{C}} = k_{\text{э}} \cdot \Sigma(\lambda_{j\text{э}1}^{60^\circ\text{C}} \div \lambda_{j\text{э}14}^{60^\circ\text{C}}) = 2 \cdot 236,2 \cdot 10^{-6} = 472,4 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$$

Рассчитываем результирующую вероятность безотказной работы  $P_3(t)$  и среднее время безотказной работы для  $T_{cp,3}$  БУ и З по формулам:

$$P_{\Sigma}(t) = \exp(-\lambda_{s3} \cdot t)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{s3}}$$

для 40°C:

$$P_{\Sigma}(t)^{40^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{40^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-202 \cdot 10^{-6} \cdot 6000) = 0,298 \text{ ч}^{-1}$$

$$T_{cp}^{40^{\circ}\text{C}} = 1/\lambda_{s3}^{40^{\circ}\text{C}} = 1/202 \cdot 10^{-6} = 4952,6 \text{ ч}$$

для 50°C:

$$P_{\Sigma}(t)^{50^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{50^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-304,7 \cdot 10^{-6} \cdot 6000) = 0,161 \text{ ч}^{-1}$$

$$T_{cp}^{50^{\circ}\text{C}} = 1/\lambda_{s3}^{50^{\circ}\text{C}} = 1/304,7 \cdot 10^{-6} = 3281,5 \text{ ч}$$

для 60°C:

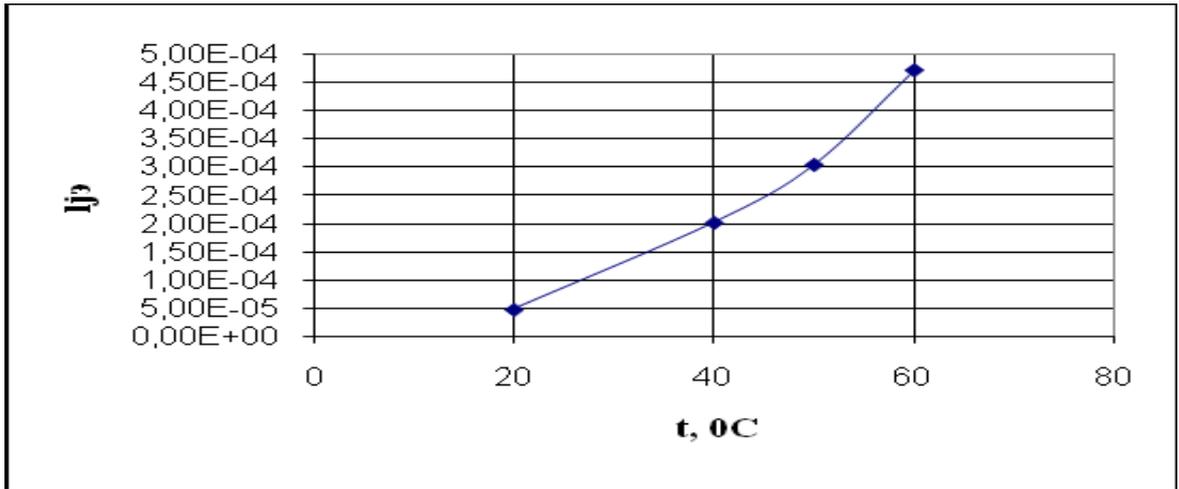
$$P_{\Sigma}(t)^{60^{\circ}\text{C}} = \exp(-\lambda_{s3}^{60^{\circ}\text{C}} \cdot t) = \exp(-472,4 \cdot 10^{-6} \cdot 6000) = 0,059 \text{ ч}^{-1}$$

$$T_{cp}^{60^{\circ}\text{C}} = 1/\lambda_{s3}^{60^{\circ}\text{C}} = 1/472,4 \cdot 10^{-6} = 2116,7 \text{ ч}$$

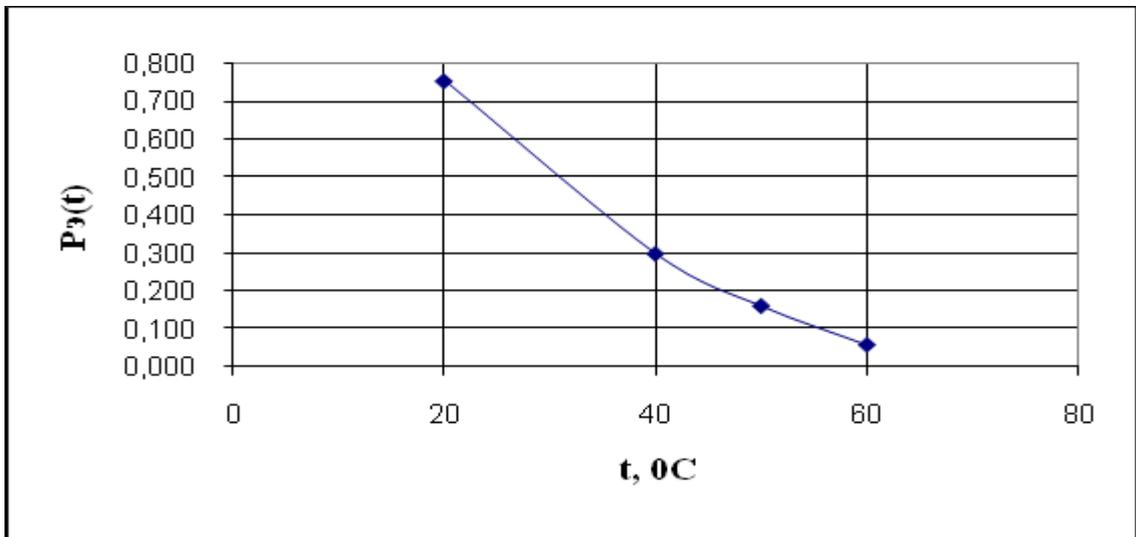
Результаты расчета всех параметров элементов блока управления и защиты приведены в таблице 2.

Температурные зависимости  $P(t)=f(t)$  и  $\lambda_s = f(t^{\circ})$  представлены на рисунке 1.

Расчет надежности анализируемого блока управления и защиты с учетом условий эксплуатации показал, что результирующая вероятность безотказной работы всей системы уменьшается при увеличении температуры элементов и вследствие влияния условий окружающей среды. Для увеличения вероятности безотказной работы системы рекомендуется уменьшить влияние окружающей среды на элементы системы, увеличив герметичность оболочек элементов, а также недопущение перегрева элементов путем применения более лучших систем охлаждения.

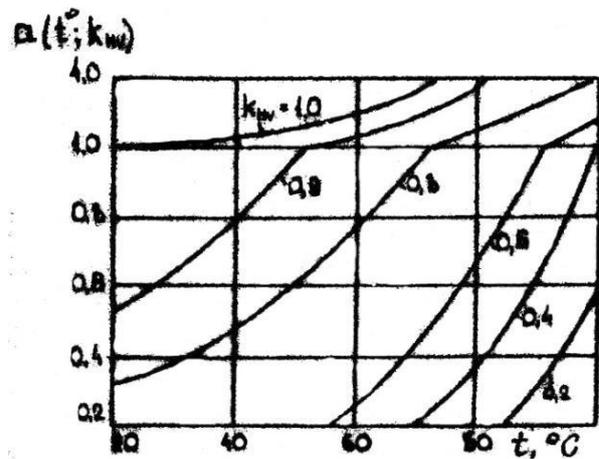
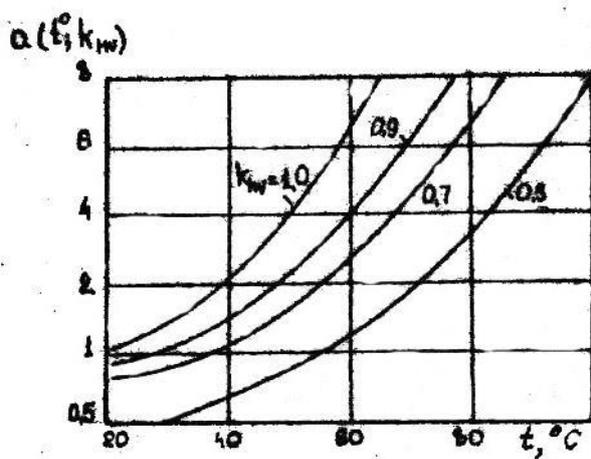


а)

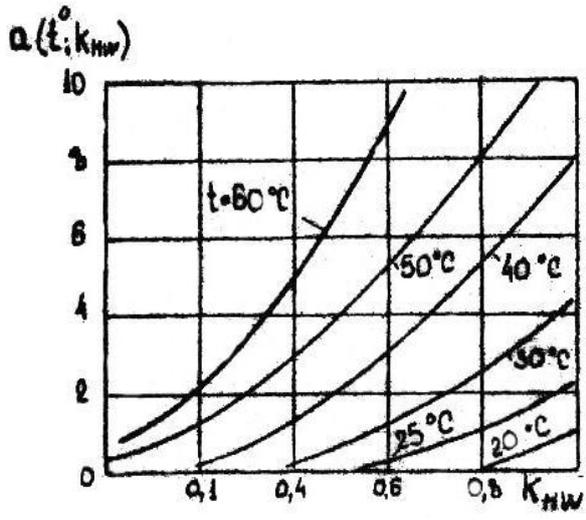


б)

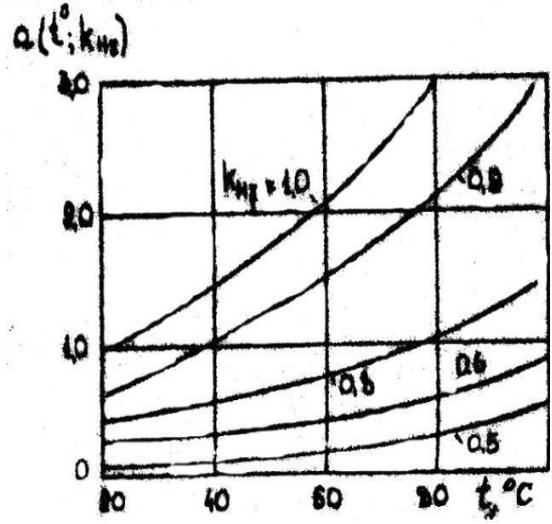
Рисунок 1 - Зависимость результирующей интенсивности отказа а) и результирующей вероятности безотказной работы б) БУ и З от температуры



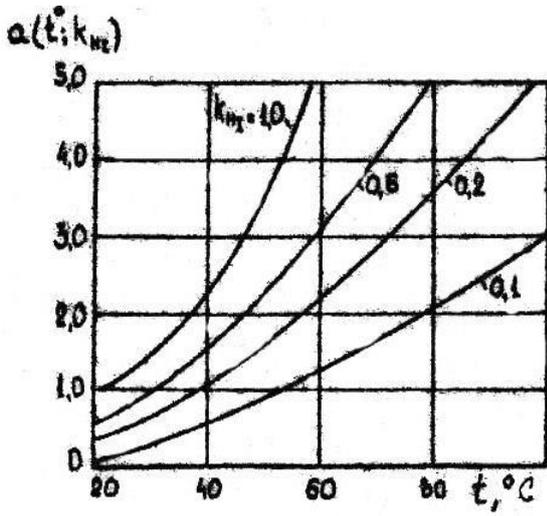
a)



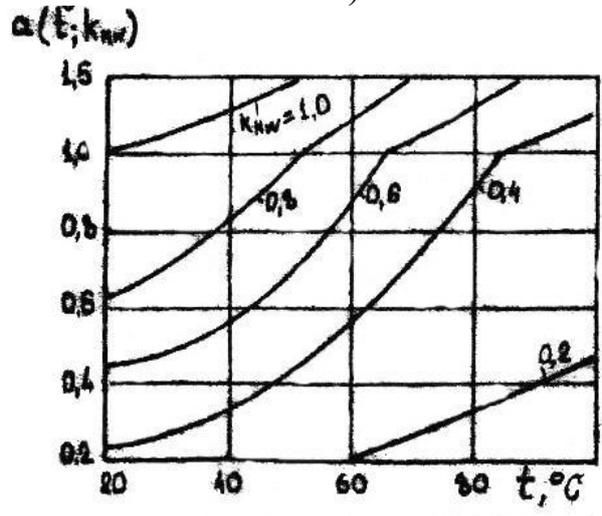
b)



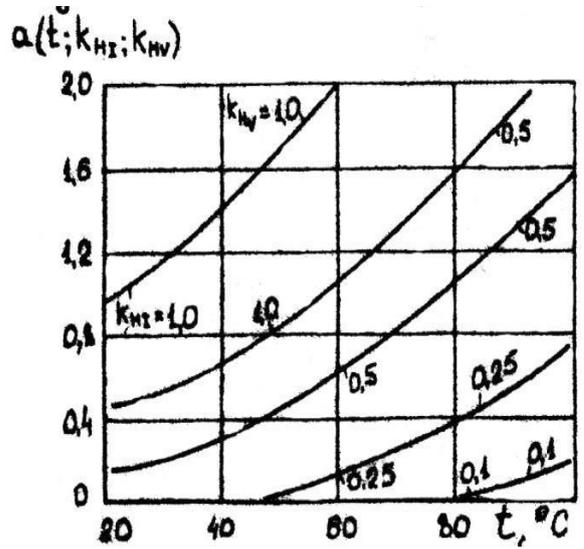
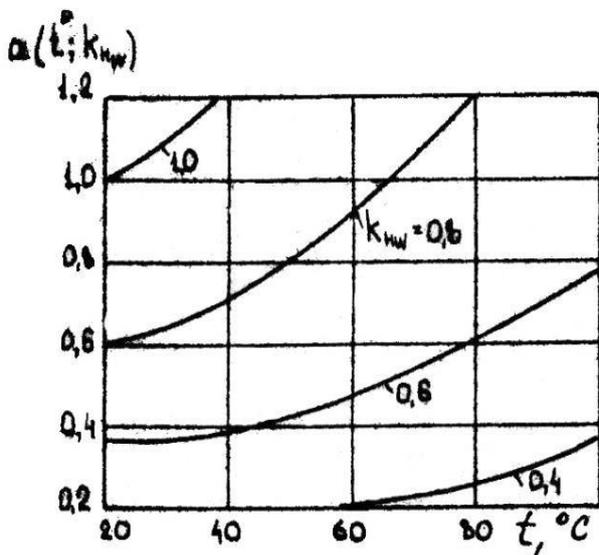
B)



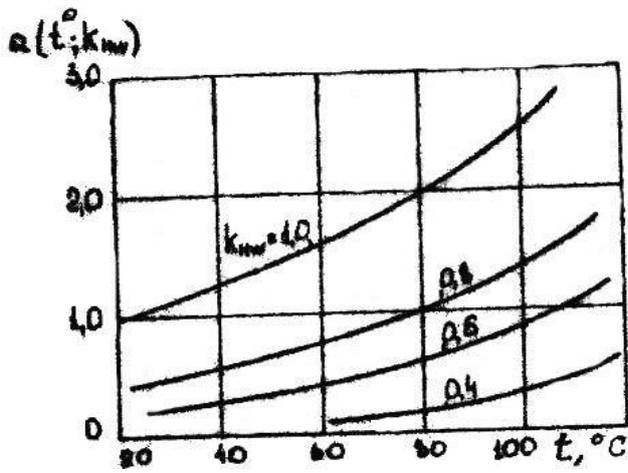
Д)



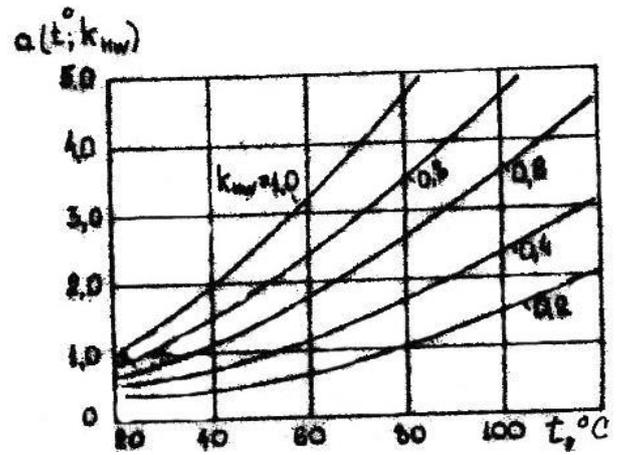
e)



ж)



з)



и)

к)

Рисунок 2 - Семейство кривых  $\square a(t^\circ; k_{i,u})$  для а) электролитических и б) слюдяных конденсаторов; в) трансформаторов и дросселя; г) штепсельных разъемов; д) магнитных пускателей, контакторов, мощных реле; е) металлопленочных резисторов; ж) проволочных резисторов; з) кремниевых диодов; и) кремниевых транзисторов; к) интегральных микросхем и германиевых транзисторов.

## 2. Расчет критериев надежности электрических систем

Исходные данные об отказах защитного устройства для заданного варианта курсового проекта приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Исходные данные для расчета

$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$						
0-200	13	600-800	8	1200-1400	7	1800-2000	8
200-400	11	800-1000	7	1400-1600	7	2000-2200	7
400-600	10	1000-1200	7	1600-1800	7	2200-2400	6

Статистически  $P(t)$  оценивается выражением:

$$P^*(t) = N_0 - n(t) / N_0,$$

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

$N_0$  – количество изделий в начале испытаний.

$$P(200) = 160 - (13 + 11) / 160$$

Результаты занесем в таблицу 4.

Таблица 4

$\Delta t_i$	$P^*(t)$						
200	0,92	800	0,73	1400	0,60	2000	0,46
400	0,85	1000	0,69	1600	0,56	2200	0,42
600	0,78	1200	0,65	1800	0,52	2400	0,38

Вероятность отказа  $Q^*(t)$ :

$$Q^*(t) = n(t) / N_0$$

Отказ и безотказная работа являются событиями противоположными и несовместимыми, поэтому  $Q^*(t) = 1 - P(t)$

Занесем результаты в таблицу 5.

Таблица 5

$\Delta t_i$	$Q^*(t)$						
200	0,08	800	0,27	1400	0,40	2000	0,54
400	0,15	1000	0,31	1600	0,44	2200	0,58
600	0,22	1200	0,35	1800	0,48	2400	0,62

Частота отказов  $f^*(t)$ :

$$f^*(t) = n(\Delta t) / N_0 \cdot \Delta t$$

где  $n(\Delta t)$  – число отказавших изделий в интервале времени от  $t - \Delta t/2$  до  $t + \Delta t/2$

$$f^*(200) = 13 / 160 \cdot 200$$

$$f^*(400) = 11 / 160 \cdot 200$$

Занесем результаты в таблицу 6.

Таблица 6

$\Delta t_i$	$f^*(t) \cdot 10^{-3}$						
200	0,40	800	0,25	1400	0,21	2000	0,25
400	0,34	1000	0,21	1600	0,21	2200	0,21
600	0,31	1200	0,21	1800	0,21	2400	0,18

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda^*(t_i) = n(\Delta t_i) / N_{срi} \cdot \Delta t_i$$

где  $N_{срi}$  – среднее число исправно работающих изделий в интервале  $\Delta t_i$ :  $N_{срi} = (N_i + N_{i+1})/2$ , где  $N_i$  – число изделий, исправно работающих в момент времени  $t_i$ ;  $N_{i+1}$  – число изделий, исправно работающих в конце интервала  $t_i$ .

$$\lambda^*(150) = 13 / ((160+147)/2) \cdot 200$$

$$\lambda^*(300) = 11 / ((147+136)/2) \cdot 200$$

Занесем результаты в таблицу 7.

Таблица 7

$\Delta t_i$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3}$						
200	0,423	800	0,327	1400	0,331	2000	0,506
400	0,262	1000	0,305	1600	0,374	2200	0,489
600	0,382	1200	0,325	1800	0,404	2400	0,461

По данным таблиц 4, 5, 6, 7 построим графики изменения вероятности безотказной работы  $P(t)$  – рисунок 3, вероятности отказа  $Q(t)$  – рисунок 4, интенсивности отказов  $\lambda(t)$  – рисунок 5 и частоты отказов  $f(t)$  защитных устройств от времени их работы – рисунок 6.

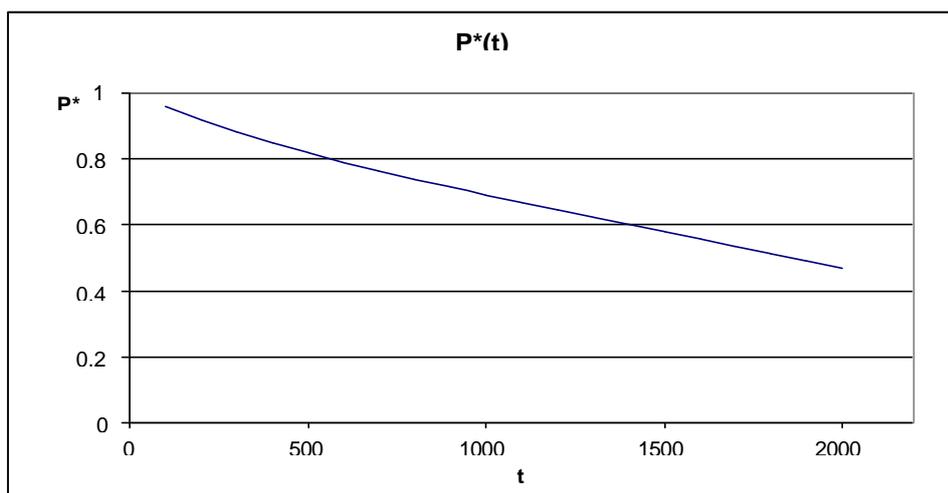


Рисунок 3 - Зависимость вероятности безотказной работы от времени

По полученным данным рисунка 3 можно заключить, что надежность работы защитных устройств зависит от времени их работы, с увеличением продолжительности работы надежность устройств снижается. Так, через 2000 ч работы вероятность безотказной работы уменьшится до 50%. Таким образом, вероятность безотказной работы является основным количественным критерием надежности, так как наиболее полно охватывает многообразие факторов, влияющих на надежность работы устройств. Быстрое снижение вероятности безотказной работы указывает на то, что надежность устройств снижается за счет отрицательного влияния условий эксплуатации, главным образом, за счет тяжелых условий работы в условиях сельского хозяйства.

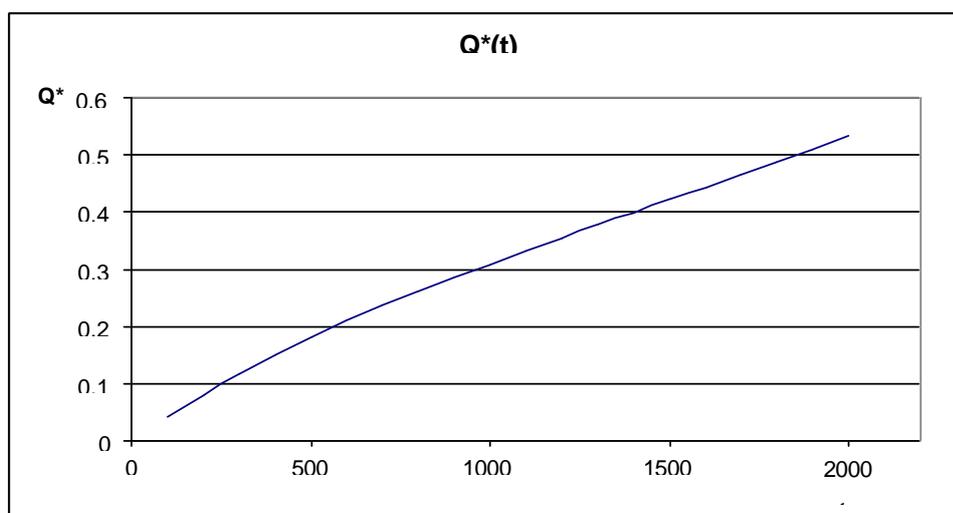


Рисунок 4 - Зависимость изменения вероятности отказа от времени работы устройств защиты

Вероятность отказа  $Q(t)$  это противоположное событие вероятности безотказной работы  $P(t)$ . С увеличением продолжительности работы устройства вероятность отказа увеличивается, при работе устройства защиты до 2000 ч вероятность отказа составляет более 50%.

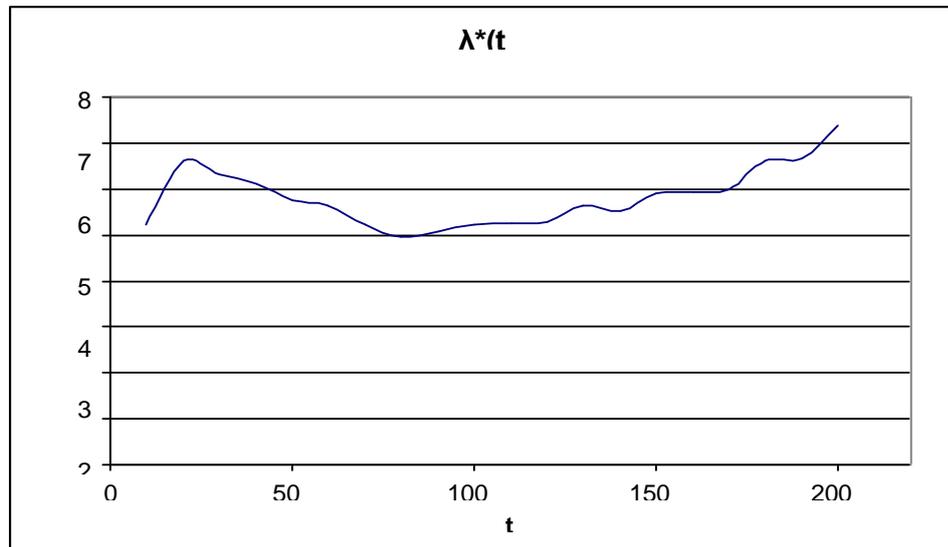


Рисунок 5 - Зависимость интенсивности отказов от времени работы устройства

Интенсивность отказов характеризует степень надежности устройства в данный момент времени его работы и измеряется числом отказов в час, и является более полной характеристикой надежности по сравнению с вероятностью безотказной работы. На рисунке 5 можно выделить три характерных участка изменения вероятности отказов. Первый участок (в пределах до 500 час.) – участок приработки. Он характеризуется высокой интенсивностью отказов. В этот период частые появления отказов связаны появлением неисправностей конструктивно – технологического характера устройства. После устранения выявленных неисправностей отказы стабилизируются (второй участок) и начинается нормальная эксплуатация устройства практически постоянным средним значением  $\lambda(t)$ . В третьем периоде (после 1750 ч.) интенсивность отказов увеличивается из-за старения и износа отдельных элементов устройства.

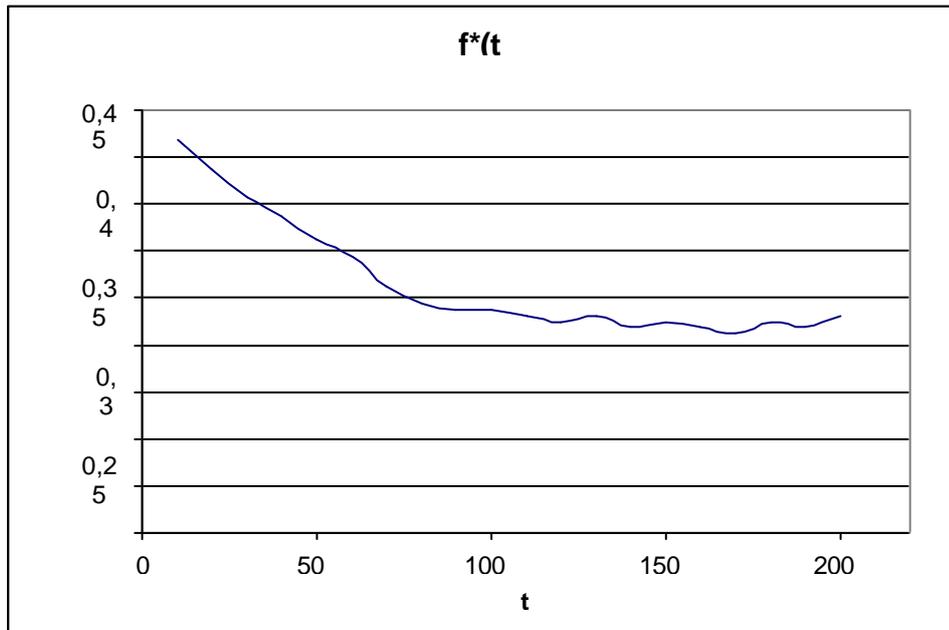


Рисунок 6 - График изменения частоты отказов от времени работы устройства защиты

Как видно из рисунка 6, частота отказов с увеличением продолжительности эксплуатации снижается и представляет с собой число отказов за единицу времени. Она указывает на скорость падения надежности устройства. В пределе частота отказов стремится к нулю.

Среднее время безотказной работы:

$$T^*_{cp} = \frac{\sum t_{cp} \cdot n(\Delta t) + t_i (N_0 \cdot n(t_i))}{N_0}$$

$$T^*_{cp} = 430 \text{ часов}$$

## ВЫВОДЫ

Уточненный расчет показал, что значения результирующей вероятности безотказной работы и интенсивности отказов системы с учетом эксплуатации и без них различны в несколько раз. Это является следствием сделанных при ориентировочном расчете допущений: анализируемое изделие структурно является последовательным; условия эксплуатации не учитываются; отказы элементов независимы; модели отказов любых элементов изделия полагаются экспоненциальными. Надежность всех объектов также зависит от коэффициента нагрузки, чем он больше, тем надежность объекта меньше. Решить эту проблему можно либо путем уменьшения коэффициента нагрузки для этого же объекта, либо заменой этого объекта объектом большей мощности при том же коэффициенте нагрузки, но это сопряжено с увеличением экономических затрат, объемов, веса, габаритов, затрат электроэнергии. Поэтому находят такую структуру, которая в условиях экономических ограничений обладает наибольшей надежностью, или находят такой вариант структуры, для которого при ограничении на надежность стоимость затрат наименьшая.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишмаров В.Ю. Надежность технических систем.- М.: Издательство Академия, 2010. -240 с.
2. Калявин В.Ю. Основы теории надежности и диагностики. Учебник СПб.: Эльмор.2009.-142 с.
3. Липай, Б.П. Электромеханические системы [Текст] : учеб. пособие / Б.П. Липай, А.Н. Соломин, П.А. Тырчев. – М.: изд. Дом МЭИ, 2011. – 248 с.: ил. – 500 экз. – ISBN 978-5-383-00243.
4. Разгильдяев, Г.И. Надежность электромеханических систем [Текст] : учеб. пособие / Г.И. Разгильдяев. – Кемерово: Куз ГТУ, 2011. – 157с.: ил. – 150 экз. – ISBN 5-285-04387-8.
5. Кузнецов, Н.Л. Сборник задач по надежности электрических систем [Текст] :учеб. пособие / Н.Л. Кузнецов. – изд. Дом МЭИ, 2012. – 408с.: ил. – 500 экз. – ISBN 978-5-383-00261-2.
6. Рябинин, И. А. Надежность, живучесть и безопасность корабельных энергетических систем / И. А. Рябинин, Ю. М. Парфенов // Типография ВМА. – Санкт-Петербург. – 1997. – 430 с.
7. Острейковский, В. А. Эксплуатация атомных электростанций: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат. – 1999. – 928 с. ISBN 5-283-03628-6.
8. Ростик, Г. В. Поддержание живучести турбогенераторов. – М.: НТФ «Энергопрогресс». – 2012. – 112 с.: [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 7 (163)]. ISSN 0013-7278.
9. Система повышения надежности и живучести ЕЭС России / Под редакцией Е. Ф. Дьякова. – М.: Издательство МЭИ. – 1996. – 112 с. ISBN 5-7046-0170-7.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

В электрической системе по управлению технологической машиной входит устройство защиты электродвигателей, содержащий  $n$  элементов. Отказ одного из элементов приводит к отказу устройства и в целом к остановке технологической машины.

Требуется определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  и среднее время безотказной работы  $T_{cp}$  устройства защиты без учета и с учётом условий эксплуатации. Во втором случае произвести расчет показателей надежности для трех значений температуры внутри устройства защиты:  $t_1=40^\circ\text{C}$ ;  $t_2=50^\circ\text{C}$ ;  $t_3=60^\circ\text{C}$ , считая, что все элементы его нагреты до указанных температур. Построить температурные зависимости вероятности безотказной работы  $P(t)=f(t)$  – интенсивности отказов в целом устройства защиты. Исходные данные приведены в таблице.

Таблица 1 - Элементы устройства защиты электродвигателя

Наименование элементов	Кол-во элементов в устройствах защиты								
	Варианты								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	БЗ-03	БЗ-031	БЗ-03М	БЗ-041	УЗ-15	УЗД	УЗД 3-8	УЗД	УЗ-20
Трансформатор	1	1	1	2	2	3	3	4	4
Штепсельный разъем	1	2	2	2	2	3	3	4	5
Контактор трехполюсный	1	1	2	2	2	3	3	4	4
Реле электромагнитное	1	1	1	2	2	2	3	3	4
Реле пневматическое	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Конденсатор электролитический	2	1	1	1	1	1	2	3	3
Конденсатор слюдяной	2	3	3	4	5	5	6	7	9

Резистор металлоплёночный	8	12	16	20	28	35	40	43	52
Резистор проволочный	1	1	1	1	1	2	2	3	3
Транзистор германиевый	4	6	9	12	13	14	16	18	22
Транзистор кремневый	3	4	4	5	6	7	8	10	12
Диод кремневый	2	3	3	3	3	3	4	5	7
Интегральная микросхема	1	2	3	3	4	5	6	6	8
Дроссель	1	2	2	2	3	3	3	4	5
Число часов работы	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
Коэффициент Кэ, учитывающий условия эксплуатации	2	2	2	2	2	2	2	2	2

## Приложение 2

Таблица 2 - Исходные данные для расчета п.2

$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0-200	1	1	2	3	4	5	11	13	15
200-400	2	2	2	2	5	5	11	5	18
400-600	1	2	3	1	6	5	5	11	5
600-800	2	1	1	1	3	7	5	10	9
800-1000	1	1	1	2	3	8	5	8	7
1000-1500	1	1	1	3	2	9	7	8	9
1500-2000	1	2	2	3	3	8	8	7	9
2000-2500	1	2	2	2	4	8	7	7	8
2500-3000	1	1	3	1	7	8	8	5	7
3000-3500	-	1	2	1	5	7	9	5	7
3500-4000	-	-	1	2	4	5	9	6	7
4000-4500	-	-	-	3	2	4	9	7	5
4500-5000	-	-	-	-	1	10	11	3	5
5000-5500	-	-	-	-	-	10	11	3	5
5500-6000	-	-	-	-	-	-	15	2	8
6000-6500	-	-	-	-	-	-	-	2	7
6500-7000	-	-	-	-	-	-	-	-	6