



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Вычислительные системы и информационная
безопасность»

**Учебно-методическое пособие
для ВКР и курсового проектирования
по дисциплинам**

**«Надежность автоматизиро-
ванных систем»,
«Надежность информацио-
нных систем»**

Авторы
Зотов А. И.,
Панасенко Н. Д.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Пример решения задач надежностного анализа и синтеза распределенной информационной системы» предназначен для обучающихся по направлению 10.03.01 «Информационная безопасность» очной формы обучения и для обучающихся по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии» заочной формы обучения.

Указания содержат краткие сведения из теории и некоторые статистические сведения, относящиеся к расчету надежности технических систем, проводимому на этапе принятия технического решения и эскизного проектирования.

Рассматриваются этапы расчета и особенности реализации поставленных задач.

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность»
Зотов А.И.,
ассистент Панасенко Н.Д.





Оглавление

1. ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (пример решения задачи анализа и синтеза)	4
2.ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ	10
3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....	12
3.1. Определение критериев и видов отказа, состава рассчитываемых показателей надежности	12
3.2. Состояние структурной схемы расчета надежности.....	13
3.3. Выбор методов расчета надежности.....	18
3.4. Математические модели расчета надежности	24
3.5. Расчет надежности систем защиты технического оборудования	28
3.6. Оценка надежности восстанавливаемых устройств	32
4.РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ.....	35
Список литературы	40

1. ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА)

Основными целями функционирования рассматриваемой в статье информационной системы являются:

- сбор, передача, хранение и представление в электронном виде обработанных данных;
- автоматизация оперативных расчётных операций на предприятии.

Задачами, решаемыми информационной системой, являются:

- беспрерывное обеспечение предприятия информацией о потреблении энергоресурса распределёнными взаимодействующими организациями региона;
- участие в управлении финансовыми операциями на предприятии;
- участие в решении задач оперативного планирования.

Состав информационной системы:

- Сервер Active Directory;
- Сервер баз данных;
- Сервер 1С (Предприятие);
- Сервер виртуализации;
- Система хранения данных (СХД);
- Файл-сервер;
- Терминальный сервер.
- Четыре сервера, отвечающие за VPN соединение и Web соединение для 1С (Предприятие);
- Интернет- шлюз.

Структура распределённой информационной системы изображена на рис1 и включает в себя:

- централизованные элементы, отвечающие за процессы хранения и обработки данных (5,7,9,12);
- элементы, информационный обмен между элементами системы (1,2,3);
- дополнительные элементы, необходимые для обеспечения непрерывности функционирования в условиях появления отказов и проводимых внеплановых восстановлений ((4,6,8,10,11).

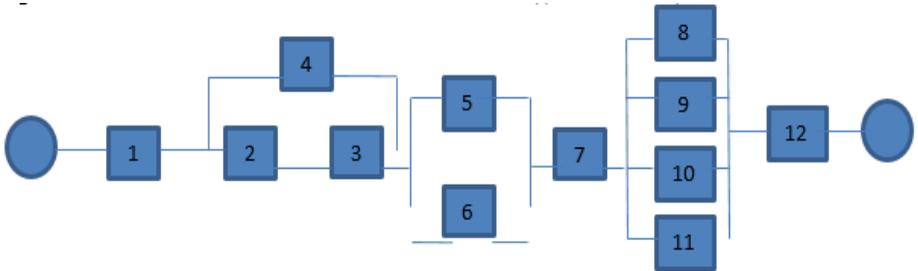


Рис. 1 – Структура распределённой ИС

Для проведения надёжных расчётов необходимо знать среднюю наработку на отказ каждого элемента системы. Этот показатель содержится в технической документации предоставляемой производителем оборудования (MTBF).

Имея в своём распоряжении показатель средней наработки на отказ $T_{ср}$, можно рассчитать интенсивность отказов λ , приняв экспоненциальный закон надёжности [9].

$$\lambda = 1/ T_{ср},$$

Можно также рассчитать вероятность безотказной работы $P(t)$ каждого элемента распределённой информационной системы. При проведении расчётов в классическом варианте теория надёжности рекомендует показатели безотказности выражать функциями времени, представленного в часах. т. е. для вероятности безотказной работы это будет функция вида

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

где $t_{\text{день}} = 24 \text{ ч.}$, $t_{\text{нед}} = 168 \text{ ч.}$, $t_{\text{мес}} = 720 \text{ ч.}$, $t_{\text{год}} = 35040 \text{ ч.}$

При известных интенсивностях отказов и временах функционирования (в календарном разделении) можно расчётным путём получить значения вероятностей безотказной работы за каждый выделенный срок (сутки, неделю,...) Результаты расчётов сводим в таблицу. (табл. 1).

Таблица 1

№ элемента	среднее время между отказами МТBF	Интенсивность отказов λ 1/час	Вероятность безотказной работы			
			P(24)	P(168)	P(720)	P(35040)
1	506700	0,000001973554371	0,99995	0,99967	0,99858	0,93318
2	1506700	0,000000663702130	0,99998	0,99989	0,99952	0,97701
3	856700	0,000001167269756	0,99997	0,99980	0,99916	0,95992
4	1806700	0,000000553495323	0,99999	0,99991	0,99960	0,98079
5	360700	0,000002772387025	0,99993	0,99953	0,99801	0,90742
6	336700	0,000002970002970	0,99993	0,99950	0,99786	0,90116
7	566700	0,000001764602082	0,99996	0,99970	0,99873	0,94004
8	756700	0,000001321527686	0,99997	0,99978	0,99905	0,95475
9	1256700	0,000000795734861	0,99998	0,99987	0,99943	0,97250
10	1556500	0,000000642467074	0,99998	0,99989	0,99954	0,97774
11	506700	0,000001973554371	0,99995	0,99967	0,99858	0,93318
12	596400	0,000001676727029	0,99996	0,99972	0,99879	0,94294

Предполагается, что отказы в системе независимые тогда расчёт вероятности безотказной работы всей системы P(t) проводится с учётом структурных особенностей [10]:

$$P(t) = P1 * [1 - [1 - P2 * P3] * [1 - P4]] * [1 - [1 - P5] * [1 - P6]] * P7 * [1 - [1 - P8] * [1 - P9] * [1 - P10] * [1 - P11]] * P12.$$

Предполагается, что отказы в системе независимые. Подставляя приведенные в Табл.1 значения, получаем:

$$P(24) = 0,999952636 * [1 - [1 - 0,999984071 * 0,999971986] * [1 - 0,999986716]] * [1 - [1 - 0,999933465] * [1 - 0,999928722]] * 0,99995765 * [1 - [1 - 0,999968284] * [1 - 0,999980903] * [1 - 0,999984581] * [1 - 0,999952636]] * 0,999959759 = 0,999870046$$

$$P(168) = 0,9996685 * [1 - [1 - 0,9998885 * 0,99980392] * [1 - 0,99990702]] * [1 - [1 - 0,99953435] * [1 - 0,99950116]] * 0,99970359 * [1 - [1 - 0,99977801] * [1 - 0,99986633] * [1 - 0,99989207] * [1 - 0,9996685]] * 0,99971835 = 0,999090453$$

$$P(720) = 0,99858005 * [1 - [1 - 0,999522249 * 0,999159919] * [1 - 0,999601563]] * [1 - [1 - 0,998005872] * [1 - 0,997863883]] * 0,998730293 * [1 - [1 - 0,999048953] * [1 - 0,999427235]] * [1 - 0,999537531] * [1 - 0,99858005] * 0,998793485 = 0,996104108$$

$$P(35040) = 0,93318357 * [1 - [1 - 0,977012217 * 0,959924031] * [1 - 0,980792387]] * [1 - [1 - 0,907424927] * [1 - 0,901163201]] * 0,940041123 * [1 - [1 - 0,954749449] * [1 - 0,972502581]] * [1 - 0,977739459] * [1 - 0,93318357] * 0,942940104 = 0,818627902$$

Полученные значения показывают возможность с вероятностью $P(35040) \approx 0,2$ возникновения отказа в системе, в то время, как по функциональным условиям останов системы из-за появления в ней отказов не предусмотрен. Таким образом, возникает задача синтеза более надёжной системы либо уточнения данных расчёта за счёт корректировки принятых для проведения расчётов допущений. Последнее возможно, если принять во внимание тот факт, что нагрузка элементов системы несколько облегчается в режимах ожидания («спящих») по сравнению с режимами обеспечения трафика.

Рассмотрим вариант, когда в качестве аргумента при расчётах наработки на отказ используется не время, а объём трафика, проходящего через систему и ее элементы. Как видно из рис.1, система имеет три области резервирования с разной кратностью. При этом введена программно-аппаратурная избыточность, позволяющая функции резервирования выполнять работающим по своему назначению элементам системы за счёт их «дозагрузки». Это один из способов функционального резервирования элементов;

Так как резервное оборудование находится во включённом и работающем состоянии при обеспечении трафика, можно считать, что оценить более точно надёжность через наработку на отказ можно, если заменить непрерывное время работы (то есть без учёта об-

служивается трафик или нет) на объём трафика, проходящего через систему и элементы.

В расчётах не учитываются другие нагрузочные внешние воздействия на элементы в связи с тем, что система работает в условиях, определённых техническими документами по эксплуатации.

Сущность задачи заключается в том, чтобы, сохраняя неизменным общий объём трафика, распределить функции элементов и определить структурные особенности системы, обеспечивающие наилучшие показатели надёжности. Это одна из задач надёжностного синтеза [11].

Существуют два способа решения названной задачи. Первый заключается в синтезе информационной системы из элементов с различными надёжностными характеристиками. При этом структура системы формируется так, чтобы получить заданные надёжностные показатели путём подбора соответствующего состава обеспечивающих функционирование элементов. Ограничения могут накладываться на стоимость или другие показатели. Выбирается лучший вариант.

Другим способом решения задачи формирования оптимальной структуры является такой, когда лучших показателей надёжности необходимо достигнуть, не прибегая к изменению состава входящих в систему элементов, то есть выбором наилучшего структурного взаимодействия.

Так как рассматривается существующая информационная система с известным составом и надёжностными характеристиками элементов, определяется второй способ. За единицу измерения объёма информации принимается мегабайт. Средняя наработка на отказ задаётся соответствующим объёмом трафика. Учитывается, что в системе имеется работающее в облегчённом режиме резервное оборудование, которое испытывает на порядок меньше влияющие на надёжность нагрузки, чем в режиме резервной активации.

Средняя пропускная способность рассматриваемой системы характеризуется показателем прошедшего трафика за единицу времени. При этом каждый отдельный элемент вносит свой «вклад» в обслуживание общего объёма трафика. (табл. 2). Используя структуру (рис.1.) и зная функциональные возможности входящих в систему элементов, были рассмотрены несколько работоспособных композиций с различными резервными включениями. Выбраны два наиболее приемлемых варианта для проведения сравнительных расчётов. Расчёт проводился с учётом участия элементов в обслуживании трафика

(для каждой композиции участие элементов своё). Суммарный трафик был определён в объёме 44417,6 часа. .

Расчёты показали, что у одной из рассмотренных структур вероятность безотказной работы за срок реализации полного объёма трафика равна 0,999, в то время, как у второй-0,998. Учтём, что расчёт, когда учитывалось время, а не трафик, определил этот же параметр как 0,818. Это может свидетельствовать о том, что учёт трафика вместо «чистого» времени может приводить к некоторому изменению расчётных показателей безотказности.

Таблица 2.

№ элемента	Объём трафика в час	Интенсивность отказов	P(24)	P(168)	P(720)	P(35040)
1	900	0,000000017752498	0,99999	0,99999	0,99998	0,99937
2	9216	0,000000001272794	0,99999	0,99999	0,99999	0,99995
3	7168	0,000000002119359	0,99999	0,99999	0,99999	0,99992
4	0,62	0,000028317413284	0,99932	0,99525	0,97981	0,37074
5	9563	0,000000001075200	0,99999	0,99999	0,99999	0,99996
6	7568	0,000000001599837	0,99999	0,99999	0,99999	0,99994
7	1714	0,000000008880492	0,99999	0,99999	0,99999	0,99968
8	492	0,000000030324809	0,99999	0,99999	0,99997	0,99893
9	1369	0,000000011193248	0,99999	0,99999	0,99999	0,99960
10	1850	0,000000007398786	0,99999	0,99999	0,99999	0,99974
11	862	0,000000013293907	0,99999	0,99999	0,99999	0,99953
12	3715	0,000000004674383	0,99999	0,99999	0,99999	0,99983

Другой вывод, который просматривается в результатах расчётов, заключается в том, что в системах, построенных из высоконадежных элементов, способы функционального резервирования могут не оказывать существенного влияния на надёжностные свойства при заданном объёме выполняемой работы. Следует понимать, что стоимость затрат на модернизацию программных и аппаратных средств в таких системах всегда значительная.

2.ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

В процессе выполнения курсовых работ и выпускной квалификационной работы (ВКР) уровень разработок и принятия технических решений чаще всего соответствует этапу технического конструирования, называемому эскизным проектированием. На этом этапе проводится ориентировочный расчет надежности. Такой расчет учитывает влияние на надежность только количества и типов применения элементов и основывается на следующих допущениях:

- все элементы одного типа равнонадежны, т.е. величины интенсивности отказов (λ_i) для этих элементов одинаковы;
- все элементы работают в номинальном (нормальном) режиме, предусмотренном техническими условиями;
- интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, т.е. в течение срока службы у элементов, входящих в изделие, отсутствуют старение и износ, следовательно, $\lambda_i(t) = \text{const}$;
- отказы элементов изделия являются событиями случайными и независимыми;
- все элементы устройства (изделия, системы) работают одновременно.

Для определения надежности в этом виде расчета необходимо знать:

- способ соединения (взаимосвязи) элементов системы;
- типы элементов, входящих в устройство (изделие, систему) и число элементов каждого типа;
- величины интенсивностей отказов элементов λ_i .

Таким образом, для выполнения ориентировочного расчета надежности достаточно знать структуру системы (включая резервирование, количество и номенклатуру примененных элементов, статистические данные, относящиеся к их надежности).

Ориентировочный метод расчета надежности применяется после разработки схем, элементами которых являются устройства с известными показателями надежности. Это могут быть принципиальные электрические (гидравлические, пневматические, кинематические и т.п.) схемы или структурные схемы, отображающие функциональное взаимодействие входящих в них элементов.

Расчет позволяет определить рациональный состав элементов схем (по надежностным критериям), наметить пути их совершенство-

вания, получить исходную информацию для решения последующих задач, относящихся к проектированию, изготовлению и эксплуатации.

Если объектом проектирования является комплекс аппаратуры (одна из систем робота, робототехнический комплекс и т.п.), то поступают следующим образом. В качестве элементов рассматриваются в первую очередь устройства, которые обладают конструктивной и функциональной автономией. Это могут быть блоки питания, соединительные шкафы, пульты управления, ЭВМ и др. При этом показатели надежности этих элементов должны быть известны. Затем выделяет элементы системы, обладавшие только функциональной автономией (например, система управления, электропривод, система сопряжения и др.). Если надежностные показатели выделенных систем неизвестны, то для каждой из них должен быть проведен отдельный ориентировочный расчет надежности. Затем выделенные устройства и системы объединяются в единую структуру, где становятся сами элементами более крупной системы. При этом важно исключить повторы за счет того, что объединения происходят как по конструкционному, так и по функциональному признакам. Полученная схема становится объектом дальнейшего ориентировочного расчета надежности.

3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Задачей расчета надежности отдельных устройств и систем является определение показателей, характеризуют их безотказность. Расчет складывается из следующих этапов:

- определение критериев и видов отказов и состава рассчитываемых показателей надежности;
- составление структурной схемы расчета надежности, основанной на анализе функционирования системы, учете резервирования, восстановления, контроля исправности и т.д.;
- выборе метода расчета надежности с учетом принятых моделей описания процессов функционирования и восстановления;
- получение математической модели, связывающей определяемые показатели надежности с характеристиками элементов;
- подбор данных по показателям надежности элементов;
- выполнение расчета и анализ полученных результатов.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ И ВИДОВ ОТКАЗА, СОСТАВА РАСЧИТЫВАЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

При проведении ориентировочного расчета чаще всего принимается допущение, согласно которому отказ любого элемента системы приводит к отказу всей системы. Исключения составляют:

- случаи заложенного в конструкцию резервирования;
- случаи многофункциональных систем, когда отказ элемента приводит к частичной потере работоспособности.

Ниже эти случаи будут рассмотрены.

Если проектируются системы формирования управляющих сигналов (в управлении, защите, блокировках), важное значение приобретает не только факт, но и вид отказа, т.к. от этого могут зависеть последствия его возникновения. В этом случае все разнообразие отказов сводят к двум видам: короткое замыкание (появление ложной цепи) или обрыв (отсутствие цепи). Аналогично рассматриваются и логические сигналы (ложный "0" или ложная "1").

Для ориентировочного расчета надежности предусмотрена следующая номенклатура показателей, характеризующая безотказность:

- вероятность безотказной работы - $P(t)$;

- интенсивность отказов - $\lambda(t)$;
- средняя наработка на отказ - T_{cp} .

Другие показатели надежности используются в тех случаях, когда они непосредственно вытекают из названных (например, вероятность отказа $Q(t) = 1 - P(t)$). При этом для сложных систем (если другое специально не оговорено) принимается экспоненциальный закон изменения надежности, что позволяет фиксировать на расчетное время значения интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const.}$$

В зависимости от целей оценок и вида технических устройств показатели надежности $P(t)$ или $Q(t)$ могут определяться:

- для одного цикла функционирования системы ($t = T_{ц}$);
- на период изготовления одной партии изделий ($t = T_{п}$);
- на время выполнения установленного объема работ ($t = T_{у}$);
- на определенный календарный период времени (смена, квартал, год и т.п.).

При проектировании отдельных устройств выбирают календарный период.

Если расчет надежности относится к сложным техническим системам, включающим в свой состав комплекс оборудования (робототехнические комплексы или линии, обрабатывающие центры и т.п.), то понятие критерия отказа усложняется, становится комплексным и, как правило, связывается с параметрами технического процесса (например, снижение ритма выпуска продукции ниже уровня, установленного в нормативно - технической документации). В этом же случае расширяется номенклатура показателей надежности, характеризующих безотказность (например, добавляется параметр потока отказов $\omega(t)$), и все расчеты усложняются. В таком случае следует пользоваться специальной литературой, помнящей подходы и методики. Заинтересованные могут найти много полезного в [1].

3.2. СОСТОЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Структурная схема для расчета надежности в общем случае существенно отличается от функциональной схемы. Структурная схема расчета надежности - это графическое отображение элементов си-

стемы, позволяющее однозначно определить состояние системы (работоспособное или неработоспособное) по состоянию (работоспособное или не работоспособное) ее элементов. При составлении схемы элементы системы могут соединяться последовательно или параллельно в зависимости от их влияния на работоспособное состояние системы. Если отказ элемента выбывает отказ системы, то элемент соединяют последовательно. Если отказ системы возникает при отказе всех или части однотипных элементов, то такие элементы соединяют параллельно. Последовательное соединение элементов называют основным, а параллельное – резервным. Для иллюстрации представим схему расчета надежности систем управления осязательного робота, структурная схема функционирования которого имеет вид, изображенный на рис. 2.

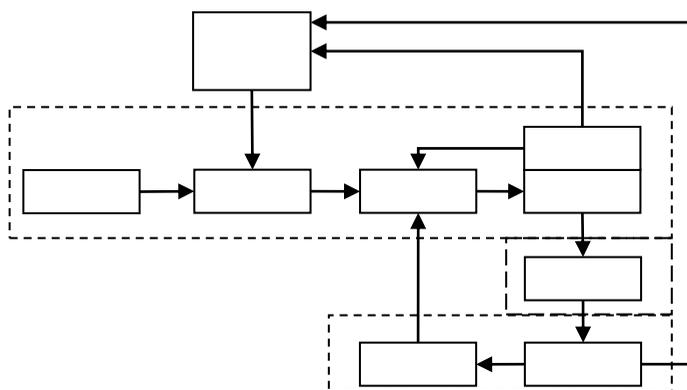


Рис. 2.

1 - блок адаптации; 2 - устройство программного управления; 3 - промежуточное запоминающее устройство; 4 - устройство реализации текущей программы; 5 - датчики манипулятора; 6 - манипулятор; 7 - датчики среды адаптации; 8 - преобразователи информации; 9 - корректор текущей программы

Если робот, структура системы управления которого представлена на рисунке, может использоваться лишь с условием обязательной адаптации к рабочей среде, то структурная схема расчета надежности будет представлять последовательное соединение всех девяти устройств, входящих в состав схемы (рис. 3).

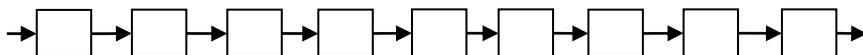


Рис. 3.

В случае, когда рассматриваемый робот может выполнять свои функции без адаптации (допустимо снижение качества работы), его следует рассматривать как многофункциональное устройство. Для таких устройств структурные схемы расчета надежности составляют отдельно по каждой функции. В рассматриваемом примере число функций равно двум (работа с адаптацией и без адаптации). Поэтому оценку надежности следует проводить по двум схемам. Первая приведена на рис. 3. вторая - на рис. 4.

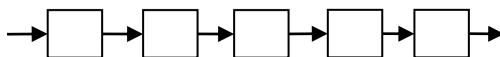


Рис. 4.

Следует заметить, что рассмотренный подход к составлению структурной схемы расчета надежности построен на допущенных, существенно влияющих на его точность. Так, в схемах не учтены источники питания, которые обязательно имеют место в реальных системах. Добавление их (последовательным включением) в расчетные схемы повысило бы точность расчетов, а значит и эффективность использования их результатов. Вместе с тем увлекаться детализацией схем при данном методе расчетов не целесообразно, так как повышение точности будет в пределах погрешности метода. Часто в устройствах непрерывного или длительного циклов использования (к последним относятся и промышленные роботы) источники питания дублируются (резервируются) поканально (горячий резерв с немедленным переходом с одного канала на другой). Для такого случая расчетная схема надежности, изображенная на рис. 4. примет вид, показанный на рис. 5.

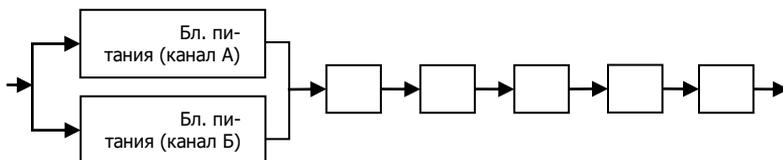


Рис. 5.

При всем многообразии существующих методов расчета надежности систем последние можно разбить на три группы, отличающиеся структурой расчетных схем:

а) с простой структурой, сводящейся к последовательно - параллельному соединению элементов без учета их восстановления;

б) со сложной структурой, не сводящейся только к последовательно - параллельному соединению элементов без учета их восстановления (допустим, мостиковая структура);

в) с восстанавливаемыми элементами, как при нулевом, так и при конечном времени замены (восстановления) отказавшего элемента исправным.

В случаях, а) и б) проводится оценка надежности по показателям безотказности. Для случая в) производится оценка показателей безотказности, ремонтпригодности и комплексных показателей. Поэтому при составлении структурных схем расчета надежности все восстанавливаемые элементы выделяются отдельно и группируются по времени восстановления. Так как ориентировочный расчет надежности не предусматривает учет эксплуатационных факторов (к которым относится и восстановление), то схемы в) являются предметом отдельного рассмотрения и в настоящем руководстве не рассматриваются.

При расчетах, связанных с оценкой безотказности, учитываются количественные и качественные показатели резервирования, если оно имеет место или предполагается в проектируемом устройстве. В структурных схемах расчета надежности различные способы резервирования обозначается условными изображениями, приведенными на рис. 6. На этом рисунке изображены следующие виды резервирования:

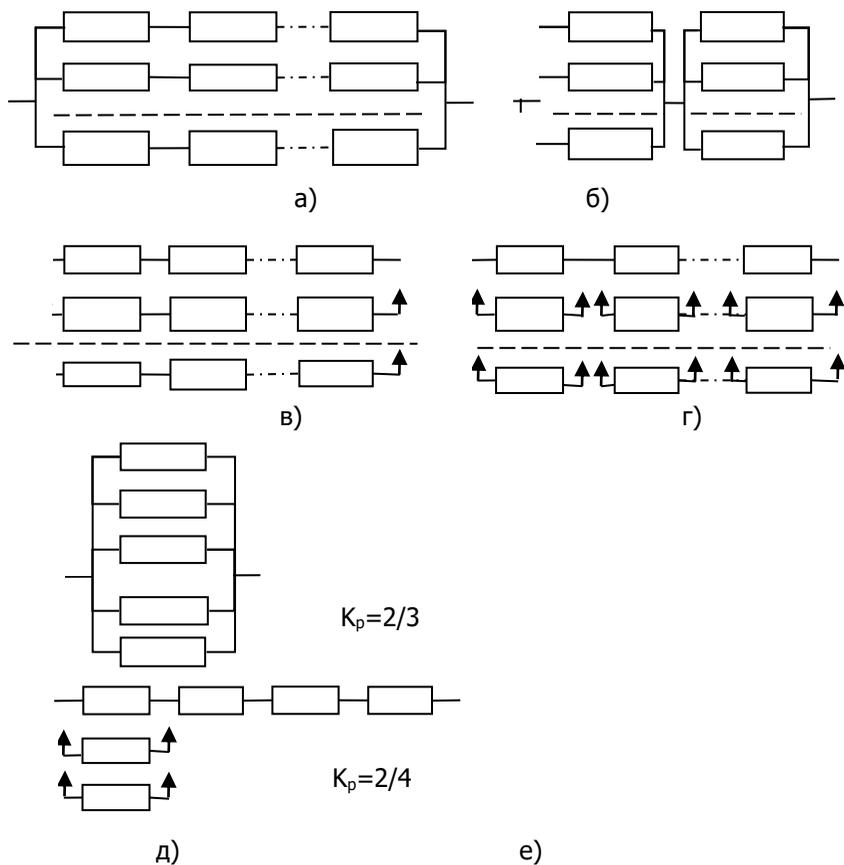


Рис. 6.

- а) общее постоянное с целой кратностью;
- б) раздельное постоянное с целой кратностью;
- в) общее замещением с целой кратностью;
- г) раздельное замещением с целой кратностью;
- д) общее постоянное с дробной кратностью ($K_p = 2/3$);
- г) раздельное замещением с дробной кратностью ($K_p = 2/4$),

Основным количественным параметром резервирования является его кратность. Под кратностью резервирования K_p понимают отношение числа резервных изделий к числу резервируемых (основных).

Обозначение на схеме значения K_p указывает на дробную кратность, что позволяет различать одинаковые начертания с постоянно включенным резервом или с отдельным замещением и целой кратностью.

3.3. ВЫБОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Ранее уже определено, что рассматривается подробно проведение ориентировочного расчета надежности для оценки безотказности по параметрам $P(t)$, λ и T_{cp} . При этом для элементов системы принимается экспоненциальный закон изменения надежности. Система задается структурной схемой расчета надежности. Значение времени для $P(t)$ выбирается календарным. Именно такой расчет чаще других отвечает требованиям разработок, проводимых в рамках дипломного или курсового проектирования.

Одной из задач реализации такого подхода является получение информации о значении интенсивностей отказов для элементов системы. Информация об этих значениях может быть получена из технической документации на элементы, узлы, устройства, рассматриваемые в качестве таких элементов. Однако по многим причинам доступ к такой информации затруднен или невозможен. В таких случаях используют усредненные данные об интенсивности отказов элементов [1]. В робототехнике чаще, всего это элементы электроники, автоматики и точной механики. Данные об усредненных значениях интенсивностей отказов некоторых элементов приводятся в табл. 3. При этом приведены минимальные, средние и максимальные значения интенсивностей отказов. При проведении ориентировочных расчетов надежности для производственных машиностроительных систем допустимо пользоваться средними значениями интенсивностей отказов. Если система проектируется для особых условий (атомная промышленность, военное использование и т.п.), то значения сдвигаются в поле допуска в сторону их уменьшения. Для изделий массового потребления с широким спектром пользователей значения λ сдвигаются в сторону увеличения.

Аналогичные данные, но уже для некоторых устройств, приведены в табл.3. Во многих случаях при проведении ориентировочных расчетов можно пользоваться принципом аналогии.

Таблица 3

/п	Наименование Элементов	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1/час		
		М акси- мальная	Средняя	М ини- мальная
1	2	3	4	5
1	Аккумуляторы	19.3	7.2	0.35
2	Батареи (гальванич.)	300	30	10
3	Выводы электричesk.	0.08	0.045	0.02
4	Выключатели автомат.	0.4	0.14	0.05
5	Выключатели (тум- блеры)	0.12	0.06	0.015
6	Двигатели:			
	- асинхронные	11.2	8.6	4.49
	- синхронные	0.25	0.34	0.16
	- шаговые	0.71	0.37	0.22
	- пост. Тока	-	8.0	-
7	Диоды:			
	- выпрямительные	5.0	2.5	0.12
	- точные импульсн.	5.5	3	0.15
	- стабилитроны	6.7	5	0.25
	- микромоделльные	6.0	4.2	0.17
8	Дроссели	0.280	0.175	0.07
9	Конденсаторы:			
	- бумажные	0.04	0.025	0.01
	- керамические	0.213	0.1	0.063
	- слюдяные	0.13	0.075	0.005
	- электролитические	2.0	0.6	0.1
10	Лампы:			
	- накаливания (индик.)	150	50	10
	- газонаполненные	6.50	3.90	2.70
11	Переключатели:			
	- кнопочные	0.11	0.7	0.042
	- миниатюрные	0.213	0.1	0.006
	- блокировочные	1.0	0.5	0.25

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
12	Подшипники (шарик.)	1.72	0.875	0.035
13	Предохранители	0.83	0.5	0.38
14	Разъемы штепсельн.	15.1	0.06	0.03
15	Резисторы:			
	- угольные (композиц.)	0.29	0.043	0.005
	- металлопленочные	0.4	0.040	0.004
	- проволочные	0.165	0.09	0.046
	- проволочные перем.	0.807	0.095	0.02
16	Реле:			
	- электромагнитные	0.50	0.3	0.11
	- герконовые	0.19	0.04	0.02
	- миниатюрные	0.25	0.06	0.030
	- термические	1.00	0.4	0.12
17	Соединения:			
	- гибкие	1.34	0.69	0.027
	- механические	1.96	0.02	0.011
	- паяные	0.005	0.004	0.0002
18	Транзисторы:			
	- германиевые	1.91	0.30	0.04
	- кремниевые	1.44	0.50	0.27
19	Трансформаторы (силовые)	2.08	1.04	0.46

Таблица 4

№ п/п	Наименование элементов	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1/час		
		Максималь- ная	средняя	Мини- мальная
1	2	3	4	5
.	Выпрямители (разн.)	0.75	0.6	0.20
1	2	3	4	5
.	Датчики: - угловых переме- щен. - линейн. переме- чен.	- 2.5	5.5 1.8	- 0.9
.	Дисководы (магн.)	7.0	0.4	0.16
.	Дисплеи (на ЭЛТ)	13.5	10.0	5.8
.	Кабели управления	2.2	0.48	0.002
.	Коробки соединит.	0.58	0.4	0.23
.	Приводы: - следящих систем - малогабаритные	33.6 9.6	12.5 3.6	0.86 0.7
.	Тахогенераторы	-	8.0	-
.	Таймеры (элек- тронные)	1.8	1.2	0.24

Например, если в схеме применены термовыключатели (на них значения λ в табл. 1 не приведены), то возможно использовать значения λ , относящиеся к термореле ($\lambda_{cp} = 0.4 \cdot 10^{-6}$ 1/ч). Разница в значениях будет в пределах ошибки метода.

Для определения значений интенсивностей отказов интегральных схем лучше использовать паспортные данные на эти схемы. Это объясняется не только широким спектром функционального назначения различных модулей интегрального использования, но и большим раз-

бросом показателей надежности однотипных схем, изготовленных различными предприятиями. Вместе с тем возможно произвести ориентировочный расчет, если воспользоваться методикой, сущность которой заключается в следующем.

Для электронных схем модульного исполнения (куда относятся и интегральные микросхемы), независимо от наименований и типов, уставлен диапазон уровней надежности по интенсивности отказов от $5 \cdot 10^{-6}$ 1/час до $7 \cdot 10^{-5}$ 1/час. Для расчетов выбирается "среднее" значение $\lambda_{cp} = 6 \cdot 10^{-6}$ 1/час. Затем это значение изменяется путем умножения на коэффициенты, зависящие от конструктивного исполнения, внутреннего содержания и серийности производства микросхемы. Знания этих коэффициентов определяется следующим образом.

K_B - коэффициент, зависящий от числа электрических выводов из корпуса микросхемы. Если число выводов $n < 10$, то K_B принимается равным 0.7. Если $10 > n > 25$, то $K_B = 1$. Если $n > 25$, то $K_B = 1.4$.

K_C - коэффициент, зависящий от серийности производства микросхемы. Для микросхем многосерийного производства (применение во многих отраслях промышленности) $K_C = 0.5$. Если среднесерийное производство (в пределах одной отрасли), то $K_C = 1$. Для малосерийного производства (целенаправленно на определенный тип изделий) $K_C = 2$.

K_{II} - коэффициент, зависящий от степени интеграции элементов в микросхеме (сложности схемы). При плотности интеграции превышающей 100000 элементов на один прибор (корпус), $K_{II} = 1.5$. Если $10 < \gamma < 10^6$, то $K_{II} = 1.3$. При значении $10^6 < \gamma < 10^7$ принимают $K_{II} = 1$. В случаях, когда $\gamma < 10^6$ коэффициент K_{II} принимают равным 0,8.

K_K - коэффициент, зависящий от конструкции интегральной микросхемы. Если у схемы выводы жесткие, то значение $K_K = 1$. В случае гибких (не предназначенных для механических нагрузок) выводов $K_K = 1.2$.

Расчетное значение интенсивности отказов для одной микросхемы принимается равным: $\lambda_{p1} = \lambda_{cp} \cdot K_B \cdot K_C \cdot K_{II} \cdot K_K \cdot K_v$.

Для интегральных микросхем (ИМС) памяти значение интенсивности зависит от информационной емкости прибора и принимает следующие значения (табл. 5).

Таблица 5

Информационная	Интенсивность отказов, час ⁻¹	
	перемещающихся (сбоев)	окончательных
1	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$
4	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$
16	$1 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$
64	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Более 64	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$

Так как расчеты ведутся для нерезервированных и невозстанавливаемых устройств, то интенсивность отказов по сбоям и окончательным отказам суммируются.

Следует заметить, что ориентировочный расчет надежности не позволяет получать результаты, на основании которых можно делать выводы, относящиеся к организации эксплуатации, построению систем контроля и диагностирования. Точность расчета может быть повышена за счет дополнительных факторов, влияющих на надежность. К ним относятся дополнения в расчет, связанные с монтажом (количество паек, учет надежности элементов конструкции, особенности температурного режима и др.). Несколько повысить точность можно за счет введения поправочного коэффициента, который учитывает как особенности (неполноту) проведенного расчета значений интенсивностей отказов, так и особенности условий эксплуатации. Для стационарного оборудования, работающего в цеховых условиях машиностроительного производства, такой коэффициент $K_{попр} = 1.1$. Суммарное значение интенсивности отказа, полученное в результате использования приведенных в настоящем руководстве данных, умножается на этот коэффициент.

При проведении расчетов стремятся исключить (где это возможно) из расчетной схемы элементы, заведомо выделяющиеся по значению интенсивности отказов в большую сторону. Обычно условия эксплуатации таких устройств отличаются или их отказ считать отказом всей системы можно лишь очень условно. К таким элементам относятся, например, индикаторные лампы накаливания, гидро- и пневмофильтры и т.п.

Для расчет интенсивности отказов проектируемого устройства используются определенные формы таблиц. Для ориентировочного расчета надежности она может иметь форму, приведенную ниже (табл. 6).

Допускается в таблицу ввести дополнительные столбцы. В одном из них по строкам указывается значение поправочного коэффициента $K_{попр}$, в другом - источник, из которого взяты использованные значения интенсивностей отказов.

Для схем расчета надежности, имеющих резервированные участки таблицы составляются для каждого основного и резервного участка раздельно.

Таблица 6

/п	Наименование и типы элементов	Обозначения по схеме	Количество элементов N_1 , шт.	Интенсивность отказов $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ 1/ час	$\lambda_1 \cdot N_1 \cdot 10^{-6}$ 1/ час
	2	3	4	5	6
			$\sum_{i=1}^m N_1$		$\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot N_1$

3.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Вычисление показателей надежности системы становится возможным после определения интенсивностей отказов всех участков расчетной структурной схемы.

Математические модели расчета надежности можно разделить на три группы:

- для основного соединения элементов;
- для схем с резервированием;
- для схем с известными эксплуатационными показателями.

При основном (последовательном) соединении N элементов в расчетной схеме используются приведенные ниже математические зависимости.

Интенсивность отказов системы λ_c связана с интенсивностями отказов элементов соотношением: $\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i$

Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ равна:

$$P_c(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_N(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t}.$$

Вероятность отказа за время t представляется величиной:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t).$$

Средняя наработка системы на отказ вычисляется по формуле:

$$T_{cp_c} = \frac{1}{\lambda_c}.$$

На практике при проектировании систем резервируют те элементы, которые отличаются следующими свойствами:

- влияние отказов в таких элементах на эффективность или безотказность работы всей системы значительно больше, чем в других;
- надежностные характеристики резервируемых элементов значительно выше остальных.

Чаще других резервируются блоки питания, датчики, устройства защиты, индикации, коммутации, обмена информацией. Иногда резервируется вся система в целом.

Применяют различные способы резервирования. Выбор способа зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются:

- технические возможности реализации схем резервирования в конкретной системе;
- значения выигравшей надежности по конкретным показателям от способа резервирования;
- экономические соображения.

В робототехнических системах применяется как постоянное резервирование, так и резервирование замещением. При этом кратность резервирования (отношение числа резервных к числу резервируемых устройств) может быть целой (резервируемое устройство одно) или дробной (резервируемых устройств несколько).

Для общего резервирования с постоянно включенным резервом и с целой кратностью можно рассчитать вероятность безотказной рабо-

ты системы за время $t - P_c(t)$ и среднюю наработку на отказ по следующим формулам:

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}]^{m+1}$$

$$T_{cp_c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{cp_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^m$ - интенсивность отказов нерезервированной системы (или любой из m резервных систем); T_{cp_0} - среднее время безотказной работы нерезервированной систем или любой из m резервных систем.

Если резервированная система состоит из неравнонадежных изделий (допустим генератор резервируется аккумулятором), то

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m q_i(t) = 1 - \prod_{i=0}^m [1 - p_i(t)].$$

где $q_i(t)$, $p_i(t)$ - вероятность отказов и вероятность безотказной работы в течение времени t i -го изделия соответственно.

Для отдельного резервирования с постоянно включенным резервом с целой кратностью

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - [1 - p_i(t)]^{m_i+1}).$$

где $p(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента; m_i - кратность резервирования i -го элемента; n - число элементов основной системы.

При общем резервировании замещением с целой кратностью, экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_c(t) = 1 - \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$$

$$T_{cp_c} = T_{cp_0} (m + 1) = \frac{1}{\lambda_0} (m + 1).$$

где λ_0 , T_{cp_0} - интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного (нерезервированного) устройства.

Если применено отдельное резервирование замещением с целой кратностью, то вероятность безотказной работы

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

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы системы из-за отказов элементов i -го типа, резервированных по способу замещения. Для экспоненциального закона надежности формула расчета $P_i(t)$ приведена выше, так как каждый отдельный элемент можно рассматривать как системы с общим резервированием.

В случае необходимости проведения расчетов для скользящего резервирования (резервные элементы жестко не закрепляются за идентичными резервируемыми элементами система) можно использо-

вать формулы:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}.$$

$$T_{cp} = T_{cp0}(m_0 + 1).$$

где $\lambda_0 = n\lambda$ - интенсивность отказов нерезервированной системы;

n – число элементов основной системы; T_{cp0} - среднее время безотказной работы нерезервированной системы; m_0 - число резервных элементов. Заметим, что в отличие от общего резервирования замещением с целью кратностью в последних приведенных формулах в общем случае ($m_0 \neq n$).

Целесообразность применения того или другого способа резервирования, как и вообще резервирования, устанавливается отношением надежности устройства с резервом и без него. Такие отношения называются выигрышами надежности и различаются показателями, лежащими в основе вычислений. Так, выигрыш надежности по вероятности безотказной работы B_p рассчитывается как

$$B_p = \frac{P_p(t)}{P_c(t)}.$$

где $P_p(t)$ - вероятность безотказной работы резервированной системы за время t , а $P_c(t)$ - аналогичный показатель нерезервированной системы. Выигрыш в надежности может быть по показателям

средней наработки на отказ B_τ и вероятность отказа B_Q :

$$B_\tau = \frac{T_{cp}, P}{T_{cp}, c}; B_Q = \frac{Q_c(t)}{Q_p(t)}.$$

где индексы "р" и "с" относятся к значениям резервированной и нерезервированной систем соответственно. Резервирование эффективно, если значение показателей B_p, B_τ, B_Q больше единицы.

3.5. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В процессе дипломного проектирования часто разрабатываются системы защиты и блокировки, относящиеся к комплексам аппаратуры. Назначения таких систем связано с автоматическими операциями включения, переключения, выключения, пуска, останова и т.д. Обычно последствия отказов таких систем (подсистем) носят аварийный характер и к их надежности предъявляются жесткие требования.

Системы защиты строятся с соблюдением общих принципов, определяемых правилами технической эксплуатации:

1. Правила отключения завитой агрегата его включения может производиться только оператором после устранения причин, вызвавших срабатывание защиты.

2. При одновременном срабатывании защит приоритет имеет защита, вызывающая больший ущерб.

3. Защита должна иметь одностороннюю направленность, осуществляя только включение (отключение) либо закрытие (открытие) и т.д.

4. Защита должна работать до завершения самой длительной операции.

5. Защита должна иметь сигнализацию ее срабатывания (в особо опасных системах регистрации первопричины срабатывания).

6. Должна быть исключена возможность автоматического и ручного отключения защиты при пуске агрегата.

В технической структуре защит выделяют три группы элементов:

а) информационные (датчики, измерители и другие источники информации и ее преобразователи);

б) управляющие (коммутационные и другие устройства, реализующие алгоритмы управления защитой);

в) исполнительные (осуществляющие непосредственную защиту).

Наименее надежной является группа элементов а), в состав которой входят первичные преобразователи и устройства, обеспечивающие передачу информации для ее дальнейшего использования в управлении. Отказы таких приборов делят на две группы: ложная тревога и пропуск срабатывания. Это соответствует принятым в теории надежности разделением отказов по видам на короткое замыкание ("к.з.") и обрыв ("об."). При этом элементы системы защиты условно изображаются контактами (хотя схемы могут быть и логическими и структурными без изменения сущности подхода).

Рассматривают пять вариантов (рис. 7), отличающихся структурно и производят их анализ с целью выбора наиболее эффективной в зависимости от надежностных характеристик устройств-источников информации. Возможны три варианта соотношения этих надежностных характеристик:

-вероятность отказа типа "ложная тревога" (для контактов-аналогов это будет вероятность "к.з.") больше вероятности отказа типа "пропуск срабатывания" (для контакто-аналогов это будет вероятность обрыва);

-вероятность отказа типа "пропуск срабатывания" ("об.") больше вероятности отказа типа "ложная тревога" "к.з.");

-рассматриваемые виды отказов равновероятны.

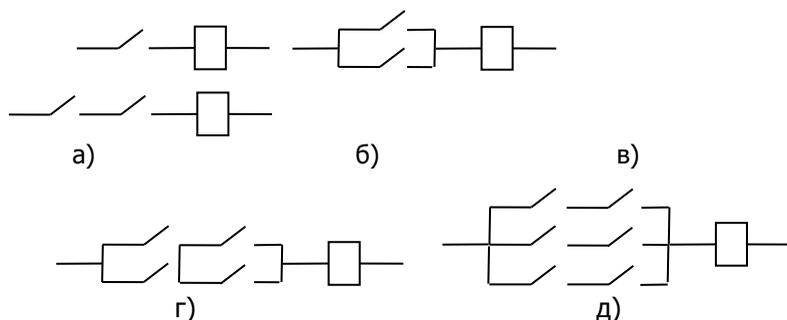


Рис. 7.

Для схем на рис.6 вероятность отказов типа "к.з." и типа "об." определяются через коэффициенты:

$\rho_{к.з.}$ - коэффициент, представляющий условную вероятность того, что произошедший отказ будет отказом типа "к.з.";

$\rho_{0.6}$ - коэффициент, представляющий условную вероятность того, что произошедший отказ будет отказом типа "к.з."

Значения $\rho_{к.з}$ и $\rho_{0.6}$ находятся в технической документации или связаны между собой соотношением: $\rho_{к.з} + \rho_{0.6} = 1$

Если $\rho_{к.з} < \rho_{0.6}$, то включение элементов производится по схеме, изображенной на рис. 6.б). Для этой схемы, представляющей группу из двух параллельно соединенных элементов, вероятность безотказной работы $P_p(t)$ и среднее время безотказной работы T_p находятся по формулам:

$$P_p(t) = 2(1 - \rho_{к.з}) \exp(-\lambda t) - (1 - 2\rho_{к.з}) \exp(-2\lambda t);$$

$$T_p = \left(\frac{3}{2} - \rho_{к.з}\right) T$$

Здесь λ и T - интенсивность отказов и средняя наработка на отказ одного элемента.

Если $\rho_{к.з} < \rho_{0.6}$, то включение элементов производится по схеме, изображенной на рис. 6. в). Расчет надежности для этой схемы производится с использованием выражений:

$$P_p(t) = (1 - \rho_{к.з}^2 [1 - \exp(-\lambda t)]^2) - (1 - \{1 - (1 - \rho_{к.з}) [1 - \exp(-\lambda t)]\}^2)^2;$$

$$T_p = \left[\frac{11}{12} + \frac{1(4\rho_{к.з} - 3\rho_{к.з}^2 - 1)}{6} + (1 - \rho_{к.з})^3 \right] T$$

Во многих случаях данные о значениях $\rho_{к.з}$ и $\rho_{0.6}$ у проектировщика отсутствуют, а ущерб от видов отказов схемы неравноценный. В этом случае принимается, что $\rho_{к.з} = \rho_{0.6} = 0.5$, а значения вероятности отказов всей резервированной системы считается отдельно для каждого вида отказа. Обозначим через q вероятность отказа любого одного элемента приведенных на рис. 6 схем. Тогда для схемы на рис. 6. б) расчетными будут следующие соотношения:

$$Q_{к.з.} = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) = 2q - q^2; B_{к.з.} = q / Q_{к.з.} = \frac{1}{2 - q} < 1;$$

$$Q_{об.} = q_1 q_2 = q^2; B_{об.} = q / Q_{об.} = \frac{1}{q} > 1.$$

Для схемы, изображенной на рис. 6. в), эти же величины находят по формулам:

$$Q_{к.з.} = q^2; B_{Q_{к.з.}} \frac{1}{q} > 1; Q_{об.} = 2 - q^2; B_{Q_{об.}} = \frac{1}{2 - q} < 1.$$

Для схемы на рис. 6. г) расчетными являются соотношения:

$$Q_{к.з.} = 2q^2 - q^4; B_{Q_{к.з.}} = \frac{1}{2q - q^3}; Q_{об.} = 4q^2 - 4q^3 + q^4;$$

$$B_{Q_{об.}} = q / Q_{об.} = \frac{1}{4q - 4q^2 + q^3}.$$

Схема мажоритарного резервирования (рис. 6. д) равнозначна по видам отказов и расчеты для нее проводится с использованием вы-

ражений: $Q_{к.з.} = Q_{об.} = 3q^2 - 2q^3; B_Q = \frac{1}{(3q - 2q^2)}.$

Полезными могут оказаться результаты расчетов значений выигрышей надежности по вероятности отказов с учетом их видов в зависимости от значений вероятностей отказов элементов для схем, приведенных на рис. 7. Результаты расчетов сведены в табл. 7.

Таблица 7

Схема	Выигрыш B_{Qi}	Значение вероятности отказа элемента q				
		0.01	0.05	0.1	0.5	0.75
Рис.6. б)	$B_{Q_{к.з}}$	0.502	0.513	0.526	0.667	0.80
	$B_{Q_{об}}$	100	20	10	2	1.33
Рис.6. в)	$B_{Q_{к.з}}$	100	20	10	2	1.33
	$B_{Q_{об}}$	0.502	0.513	0,526	0.667	0.80
Рис.6. г)	$B_{Q_{к.з}}$	50	10	5.02	1.14	0.928
	$B_{Q_{об}}$	25	5.26	2,77	0.889	0.853
Рис.6. д)	$B_{Q_{к.з}}$	33.6	6.90	3.57	1	0.889
	$B_{Q_{об}}$					

При проектировании следует помнить, что отказы типа к.з. и об. неравноценны не только по критериям ущерба. Так, например, контроль отказов типа "к.з.", как правило, значительно проще контроля отказов типа "об."

При проведениях ориентировочного расчета надежности считают, что вероятности отказов типа "обрыв" и "короткое замыкание" равны, но если при разных отказах ущерба неоднозначны, то расчет проводят с учетом вида отказа.

3.6. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВ

Задачи расчета надежности восстанавливаемых устройств отличаются большим разнообразием, как в постановочном плане, так и в методологии их решения. Чаще всего методы решения этих задач связаны с проведением различных видов моделирования. Однако при определенных условиях, когда статистические показатели можно свести к их средним значениям (математическим ожиданиям), а законы распределения случайных величин считать экспоненциальными, для расчетов используются относительно простые аналитические выражения.

Исходными данными для рассматриваемых задач считаются следующие:

- параметры потока отказов;
- параметры потока восстановления;
- организация обслуживания (количество восстанавливающих бригад, порядок восстановления в случае очереди и т.д.);
- данные о системе (структура, виды резервирования);
- критерии отказа системы.

Для проведения ориентировочных расчетов задачу упрощают до уровня следующих ситуации. Исправное изделие начинает эксплуатироваться в момент $t = 0$ и, проработав случайное время T_i , отказывают. На ремонт требуется случайное время M_i . Такой процесс продолжается в течение всего срока службы изделия, причем случайные величины T_i и M_i ($i=1,2,\dots$) независимы и распределены по экспоненциальному закону λ и μ (интенсивности отказов и восстановления соответственно). Кроме этого, считается, что должно осуществляться условие $\tau < T_{cp}$, где τ - время восстановления отказавшего устройства; T_{cp} - среднее время безотказной работы. В качестве показателей, характеризующих надежность системы, рассматриваются: вероятность безотказной работы за некоторое время t и коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T_p}{T_p + T_b} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + \tau}$$

Вероятность выполнения задачи системой за время t определяется формулой:

$$P_c(t) = P_0 P(t) + (1 + P_0) U(\tau) P(t - \tau).$$

где P_0 - вероятность исправного состояния системы в начальный момент времени; $P(t)$ - вероятность безотказной работы за заданное время t ; $U(\tau)$ - вероятность восстановления и проверки системы к некоторому моменту времени $\tau < t$; $P(t - \tau)$ - вероятность безотказной работы системы за оставшееся время $(t - \tau)$, достаточное для решения поставленной задачи.

Для экспоненциального закона распределения

$$P(t) = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + \tau_B} e^{-\frac{t}{T_{cp}}}.$$

Интенсивность восстановления i -го элемента будет $\mu = \frac{1}{\tau_i}$.

С учетом значения $\mu = \frac{1}{\tau_{Bi}}$ среднее время восстановления находится как $\tau_B = T_{cp} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\mu_i}$.

Ниже рассматривается пример ориентировочного расчета показателей надежности восстанавливаемой системы в упрощенном подходе.

Пусть имеется система из трех независимых последовательно соединенных элементов. Время безотказной работы и время восстановления имеют экспоненциальное распределение. Соответствующие интенсивности отказов и восстановления равны:

$$\lambda_1 = 0.05 \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_2 = 0.02 \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_3 = 0.01 \text{ 1/ч};$$

$$\mu_1 = 1.0 \text{ 1/ч};$$

$$\mu_2 = 0.5 \text{ 1/ч};$$

$$\mu_3 = 1.0 \text{ 1/ч};$$

Необходимо найти основные показатели надежности системы в течение $t = 0.5$ ч; коэффициенты готовности для режима, когда при отказе одного из элементов система выключается, среднее время безотказной работы и среднее время восстановления.

Решая задачу, вначале находится $\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 0.08$ 1/ч.

Среднее время безотказной работы $T_{cp} = 1/\lambda_0 = 12,5$ ч.

Среднее время восстановления определяется с помощью коэффициентов: $\gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} = 0.05$; $\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} = 0.04$;

$$\gamma_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3} = 0.01; \quad T = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)}{\lambda_0} = 1,26 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы за время $t = 0.5$ ч.

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} = e^{-0.08 \times 0.5} = 0.962.$$

Коэффициент готовности системы

$$K_r = \frac{1}{1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} = \frac{1}{1 + 0.05 + 0.04 + 0.01} = 0,909.$$

Постановка и решение задач, связанных с определением надежности характеристик восстанавливаемых систем, значительно сложнее, чем для невозстанавливаемых. Сложность обуславливается тем, что к структурному разнообразию систем добавляется широкий спектр возможных организаций эксплуатации, восстановления и резервирования. Понятие "отказ системы" становится функционально зависимым от времени (например, невыполнение задания за установленный срок).

Наиболее универсальным методом исследования восстанавливаемых систем является моделирование. Для многих задач на основе использования классической теории вероятностей получены аналитические выражения, позволяющие определять эксплуатационные характеристики восстанавливаемых систем. Однако эти выражения не носят универсальный характер и, в связи с многообразием, в настоящем пособии не приводятся. При необходимости справочные данные можно получить из [1].

4. РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ

Приведенная методика ориентировочного расчета надежности относится к начальному этапу разработок на уровне аванпроекта и эскизного проекта. Полученные результаты должны сравниваться либо с заданными, либо с надежностными характеристиками отечественных и зарубежных аналогов. Эти результаты можно рассматривать, как оценочные для ожидаемого уровня надежности проектируемого устройства или его составной части.

В процессе работы над дипломным проектом часто трудно или невозможно отыскать о надежности аналогов проектируемых образцов, что затрудняет формирование выводов по итогам сравнения и разработку предложений по дальнейшему повышению их надежности. Несколько облегчить задачу можно, использовав принятую в США методику разделения элементов и устройств машиностроительной промышленности по уровням надежности (без учета параметров восстановления). Ниже приводятся значения минимальных требований к надежности устройств в зависимости от их применения (табл.6). В основу взят только один показатель - максимально допустимое значение интенсивности отказов. Считается, что под устройством понимается однофункциональное изделие средней сложности. Например, процессор (функция преобразования информации), электропривод (функция управления движением), система электроснабжения (функция питания напряжениями и токами) и т.п. Если проектируется часть однофункционального устройства, то по возможности необходимо ориентировочно определить долю этой части, в интенсивности отказав всего устройства. Например, если проектируется датчик системы очувствления робота, то за основу берется в качестве однофункциональной вся информационная система (без центрального процессора и устройств питания). Зная, что в состав системы входят три датчика, подсистемы преобразования и передачи информации, можно сделать допущение: проектируемый датчик составляет примерно пятую часть системы. Для оценки надежности системы следует результат расчета интенсивности отказов датчика умножить на пять. Так как промышленный робот относится к стандартному производственному уровню, нижний допустимым пределом надежности, входящего в него однофункционального устройства, будет максимально допустимое значение интенсивности отказов уровня

$P (\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч})$. Значит надежность датчика по критерию интенсивности отказов должна быть не более значения $1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}$. Если это условие выполняется, то можно предположить, что выполняется и заданное без конкретных цифр требование к надежности проектируемого устройства. Если условие не выполняется, то необходимо предусмотреть меры для выполнения поставленных требований к надежности. Это может быть:

- пересмотр состава элементов, использованных при проектировании в сторону улучшения их показателей надежности;
- изменение схемных решений с целью их упрощения или ориентации на более надежные элементы;
- выявление "слабых" по надежности мест и изыскание возможности их устранения;
- применение различных способов резервирования.

Таблица 8

Название уровня	Условное обозначение	Максимальное значение интен. отказов, 1/час	Примечание
Рыночный, широкого потребления	0	$2 \cdot 10^{-3}$	Для изделий общего пользования
Низкий производственный	R	$1.5 \cdot 10^{-4}$	Для изделий неотвественного назначения
Стандартный производственный	P	$5 \cdot 10^{-5}$	Для изделий конкурентного класса
Военный	S	$5 \cdot 10^{-6}$	Для изделий с тяжёлыми режимами эксплуатации
Разгруженный специально назначения	DS	$1 \cdot 10^{-6}$	Для особо ответственных изделий
Высший	U	$5 \cdot 10^{-7}$	Для уникальных изделий разового применения

Следует помнить, что совокупность мер, связанных с повышением надежности на последующих этапах проектирования (технический проект, отработка опытного образца и т.д.), значительных изменений в показатели не вносит. Незначительных результатов можно достигнуть, облегчая режимы эксплуатации или устанавливая систему технического обслуживания и ремонта. Остальные меры направлены на то, чтобы показатели надежности изделий в процессе изготовления и эксплуатации были ниже расчетных.

При проведении ориентировочного расчета надежности, который соответствует уровню разработок для большинства дипломных проектов, первоначально берут данные (интенсивности отказов элементов), определенные для номинальных режимов работы. В ряде случаев такие режимы создать не удастся. Чаще всего это бывает, когда проектируются устройства работа в особых условиях (мобильные стенды, РТК окраски, РТК для литейного или гальванического производства и т.п.). В этом случае используют систему коэффициентов, на которые умножаются итоговые значения интенсивностей отказов проектируемых устройств. Значения некоторых коэффициентов приведены в табл. 9. В более сложных случаях влияния внешней среды (радиация, термоудары, запыленность и др.) следует значения поправочных коэффициентов искать в специальной справочной литературе.

Таблица 9

Условия Эксплуатации	Поправочный коэфф.	Условия Эксплуатации	Поправочный коэфф.
По характеру установки устройств:		По воздействию внешней температуры, С	
- в оборудованном цеху	1.0	20 - 30	1.0
- в необорудованном цеху	1.12	30 - 40	2.0
- в полевых условиях	1.18	40 - 50	2,5
- на автомобиле	2.6	более 50	3.0
- на железнодорожной платформе	2.8	По воздействию агрессивной среды (для защищенной аппаратуры):	
- на самолете	3.0	- кислотной	3.5
По воздействию влаги, %:		- щелочной	4.0
60 - 70	1.0	- ацетоновой	4.2
90 - 98	2.0		
98 - 100	2.5		

После учета наиболее значимых факторов, можно построить графические зависимости, которые помогут наглядно проиллюстрировать выводы, вытекающие из результатов расчета надежности. Графики строятся для случаев, когда внешние факторы не учитывались и когда учитывались, пример графика приведен на рис. 8. На графике зависимость $P(\tau)$ соответствует максимальному для данного устройства закону измерения во времени вероятности безотказной работа (номинальный режим работы элементов).

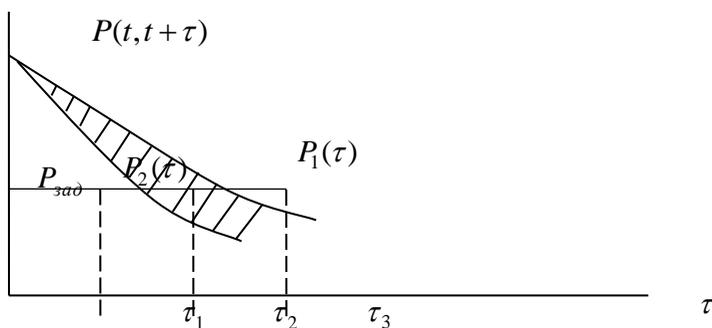


Рис. 8.

Зависимость $P_1(\tau)$ соответствует минимальному закону изменения надежности, т.е.

$$P_1(\tau) = \exp(-\lambda_{\Sigma} \tau) = P_{\max}(\tau); P_2(\tau) = \exp(-\lambda_{\Sigma} K_{\text{ПОПР}} \tau) = P_{\min}(\tau).$$

где λ_{Σ} - суммарная интенсивность отказов проектируемого устройства; $K_{\text{ПОПР}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий условия работы.

Из графиков видно, что может ли система удовлетворять значению заданной вероятности безотказной работы ($P_{\text{зад}}$) для работы в течение времени τ_i . Так, если задано значение $P_{\text{зад}}(\tau_1)P > A$, то вывод такой: система может быть построена на данных элементах при любых режимах из работы. При функционировании системы в течение времени τ_2 система на данных элементах может быть по-

строена, но режимы их работы должны быть облегчены. Соответственно для заданного значения $P_{зад}(\tau_3)P < A$ система на данных элементах при избранной схеме не может быть построена. В других случаях по этому же графику можно определить для $P_{зад}$ допустимые предельные значения безотказной работы системы или предельные значения вероятности безотказной работы для заданных значений времени безотказного функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубарев Н.И. Надежность в машиностроении. П.: Изв. стандар-тов. 1989. - 224 с.
2. Глазунов Л.П. и др. Основы теории надежности автоматиче-ских систем управления. Л.: Энергоатомиздат. 1984. - 207 с.
3. Ястребенеикий М.Н.. Иванов Г.М. Надежность автоматизи-рованных систем управления технологическими процессами. И.: Энергоатомиздат. 1989. - 263 с.
4. Сборник задач по теории надежности. Под ред. А.М.Половкова и И.М.Маликова. М.: Сов. радио. 1972. - 405 с.
5. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых при-боров и интегральных микросхем. И.: Радио и связь. 1988. - 255 с.
6. Сырицын Г.А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмопри-водов. М.: «Машиностроение. 1990. - 247 с.
7. Руководство по проектированию систем автоматического управления. Под ред. В.А.Бесекерского. В.: Высш. шк. 1983. - 296 с.
8. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. Лавриненко В.Ю. М.: Высш. шк.. 1978. - 320 с.
9. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем. М.: Сов. радио, 1977. 214 с.
10. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высш.шк.,2003.463 с.
11. Рябинин И.А. Логико-вероятностные методы исследова-ния надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.