

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ АВТОМАТИКА ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ»

Протокол № ____ от _____ 201__ г.
Автор: _____

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Надежность технических систем

Уровень ВО: *Бакалавриат*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *4*

Специальность/Направление: *27.03.04 Управление в технических системах (УТб)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *(УТ) Системы и технические средства автоматизации и управления*

Москва

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Каждый студент должен выполнить в требуемом объеме работу в соответствии с индивидуальным заданием, приобрести навыки расчета показателей надежности технических систем и по результатам расчета выбрать метод повышения надежности системы.

1.1 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ.

По структурной схеме расчета надежности технической системы (рис.1.1) в соответствии с вариантом задания, значению гарантийного срока службы и значениям интенсивностей отказов ее элементов (табл.1.1) требуется:

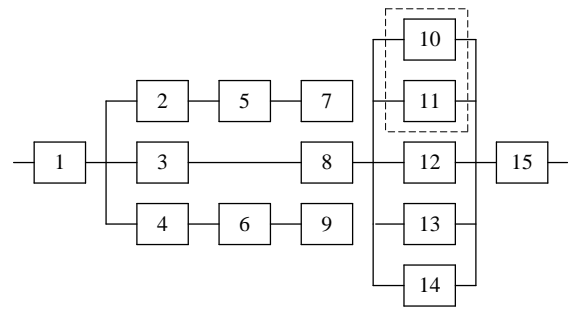
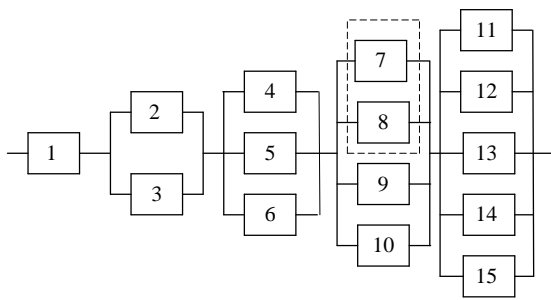
1. Построить график изменения вероятности безотказной работы системы от времени.
2. Обеспечить увеличение гарантийного срока службы не менее чем в 1,5 раза за счет:
 - а) повышения надежности элементов;
 - б) структурного резервирования элементов системы.

Все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации (простейший поток отказов). Резервирование отдельных элементов или групп элементов осуществляется идентичными по надежности резервными элементами или группами элементов. Переключатели при резервировании считаются идеальными.

Вариант задания определяется по двум цифрам шифра студента. По последней цифре учебного шифра студента определяется структурная схема надежности технической системы, а интенсивности отказов и гарантийный срок службы системы - по предпоследней цифре шифра

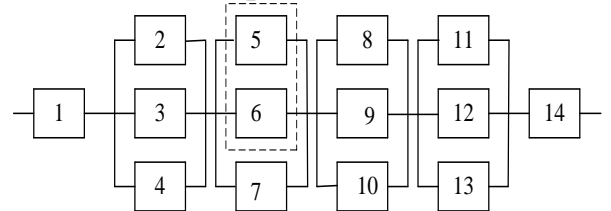
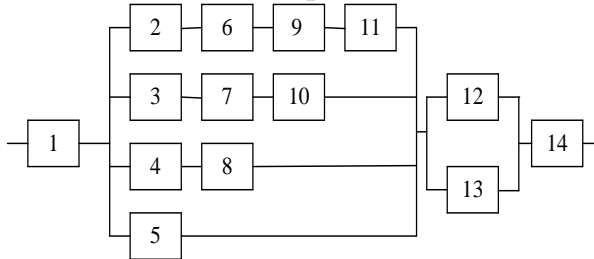
Для выполнения курсового проекта необходимо:

- изучить рекомендуемую литературу и настоящие методические указания;
- определить свой вариант задания;
- составить расчетные зависимости для определения показателей надежности системы;
- вычислить значения вероятностей безотказной работы элементов и всей системы;
- построить график зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ от времени наработки t ;
- предложить способ повышения надежности, который даст максимальный эффект в отношении надежности системы в целом.
- построить график зависимости вероятности безотказной работы модернизированной системы $P(t)$ от времени наработки t ;
- провести сравнение двух вариантов модернизации, которое следует привести в качестве вывода к работе.



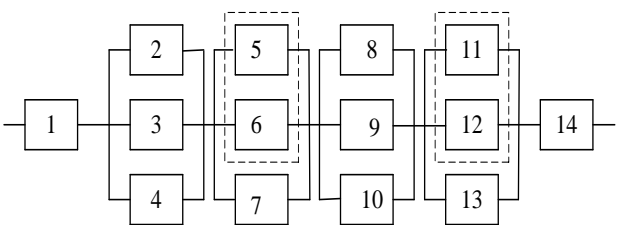
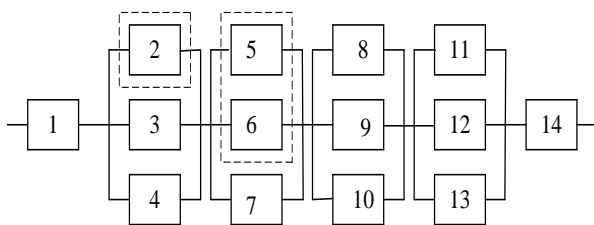
Вариант 0

Вариант 1



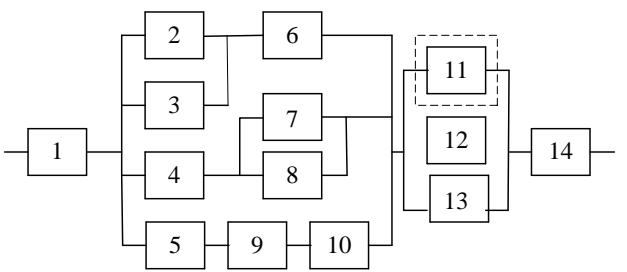
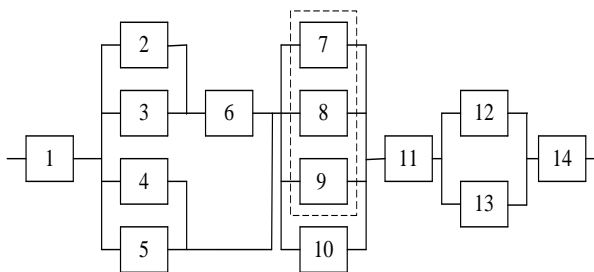
Вариант 2

Вариант 3



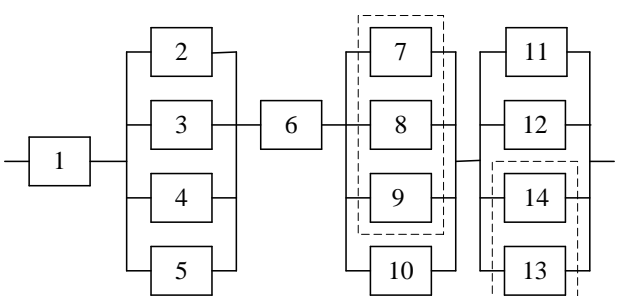
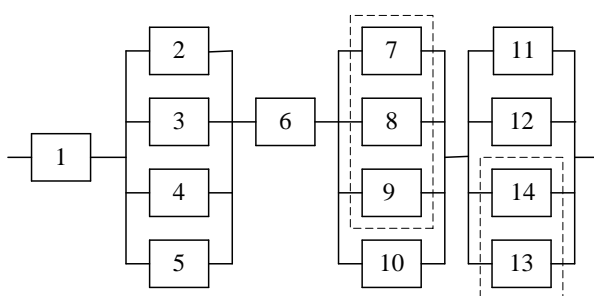
Вариант 4

Вариант 5



Вариант 6

Вариант 7



Вариант 8

Вариант 9

Рисунок 1.1 - Структурные схемы надежности

На схемах, обведенные пунктиром элементы являются функционально необходимыми из n параллельных ветвей.

Таблица 1.1 Интенсивности отказов элементов

| Цифра шифра | Срок службы, лет | Интенсивность отказов элементов $\lambda \cdot 10^{-5}$, 1/ч | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|----|------|----|----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 3 | 0,5 | 1,0 | 0,1 | | | | 1,0 | | | | 0,1 | | | | |
| 1 | 5 | 0,2 | 0,5 | | | | | | | 1,0 | | | | | | 0,1 |
| 2 | 6 | 0,1 | 1,0 | | | | 2,0 | | 1,0 | | | 5,0 | | | | - |
| 3 | 4 | 0,5 | 1,0 | | | 0,1 | | | 0,5 | | | 0,2 | | | | - |
| 4 | 5 | 0,1 | 0,5 | | | 1,0 | | | 0,5 | | | 0,25 | | | 0,1 | - |
| 5 | 3 | 0,1 | 0,5 | | | 0,1 | | | 0,5 | | | 1,0 | | | | - |
| 6 | 6 | 0,25 | 0,5 | | 0,1 | | | 0,5 | | | | 0,2 | | | 0,1 | - |
| 7 | 4 | 0,1 | 0,5 | | | 0,1 | | 0,25 | | 0,2 | | 0,5 | | | 0,1 | - |
| 8 | 3 | 0,3 | 0,5 | | | | 0,2 | | 1,0 | | | 0,03 | | | | - |
| 9 | 5 | 0,1 | 0,5 | | | 0,1 | | 0,5 | | | | 1,0 | | | | - |

1.2 ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка, объемом 15...20 страниц, должна включать:

1. Задание на проектирование и исходные данные.
2. Промежуточные преобразования исходной схемы.
3. Рабочие расчетные формулы с их обоснованием.

Результаты расчета представить в виде таблицы, в которой в столбцах приводятся значения наработки t , а в строках вычисленные значения вероятностей безотказной работы элементов и всей системы, полученные по рабочим формулам. При этом диапазон изменения наработки t не менее 8-10 значений.

Графическая часть должна содержать график зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ по результатам расчета, графики зависимостей вероятностей безотказной работы модернизированной системы. Графики этих зависимостей следует изобразить совместно с кривой $P(t)$ исходной системы.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Показатели надежности невосстанавливаемых систем

Вероятность безотказной работы или **функция надежности $P(t)$** выражает вероятность того, что невосстанавливаемый объект не откажет к моменту времени наработки t . Показатель обладает следующими свойствами:

1. $P(0) = 1$ (предполагается, что до начала работы объект является безусловно работоспособным);
2. $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$ (предполагается, что объект не может сохранять свою работоспособность неограниченно долго);

3. $\frac{dP(t)}{dt} \leq 0$ предполагается, что объект не может после отказа спонтанно восстанавливаться (для систем, восстанавливаемых обслуживающим персоналом, этот показатель не используется).

Дополнение вероятности безотказной работы до единицы называется вероятностью отказа или функцией ненадежности.

Вероятность отказа $Q(t)$ - вероятность того, что случайное время до отказа меньше заданного времени t . Поэтому функция $Q(t)$ совпадает с функцией распределения времени до отказа $F(t)$:

$$Q(t) = F(t) = \int_0^t f(t) dt,$$

где $f(t)$ - функция плотности распределения времени до отказа.

Тогда

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt.$$

Плотность распределения наработки до отказа называют **частотой отказов**:

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

Средняя наработка до отказа \bar{T}_o определяется как математическое ожидание времени до первого отказа:

$$\bar{T}_o = M[t] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Средняя наработка до отказа является средним показателем и не отражает характер распределения времени до отказа.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ выражает интенсивность процессов возникновения отказов.

Вероятностная оценка этой характеристики находится из выражения

$$\lambda(t) = \frac{\alpha(t)}{P(t)}.$$

Интенсивность отказов является основной количественной характеристикой надежности элементов. Если она известна, то можно найти все другие показатели надежности.

Наиболее распространенной статической моделью надежности является **экспоненциальная модель распределения времени до отказа**. Согласно этой модели вероятность безотказной работы объекта выражается зависимостью

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

где λ - параметр модели.

Функция плотности вероятностей распределения времени до отказа при экспоненциальной модели

$$f_{\text{э}}(t) = \alpha(t) = \frac{-dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Функция интенсивности отказов при экспоненциальной модели

$$\lambda_{\text{э}}(t) = \frac{f_{\text{э}}(t)}{P_{\text{э}}(t)} = \lambda = \text{const}.$$

Наработка до отказа при экспоненциальной модели

$$\bar{T}_o = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

2.1.2 Расчет показателей надежности

Наиболее простую структуру имеет система, состоящая из n элементов, у которой отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы. В этом случае система S имеет логически последовательное соединение элементов (рис.2.1).

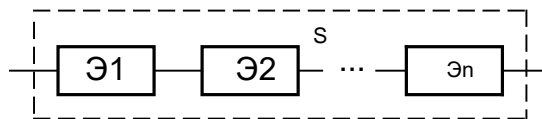


Рисунок 2.1 - Схема логического последовательного соединения элементов

Так как система работоспособна, если работоспособны все ее элементы, то согласно теореме об умножении вероятностей вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов:

$$P_c(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t),$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента.

Пусть для элементов справедлив экспоненциальный закон распределения надежности и известны их интенсивности отказов. Тогда и для системы справедлив экспоненциальный закон распределения надежности:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} = e^{-\lambda_c t},$$

где λ_c - интенсивность отказов системы.

Интенсивность отказов нерезервированной системы равна сумме интенсивностей отказов ее элементов:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Среднее время наработки до отказа и частота отказов системы соответственно равны:

$$\bar{T}_{o.c} = \frac{1}{\lambda_c}, \quad \alpha_c(t) = \lambda_c e^{-\lambda_c t}.$$

При логически параллельном соединении элементов (рис.2.2), система отказывает тогда, когда отказывают все ее элементы.

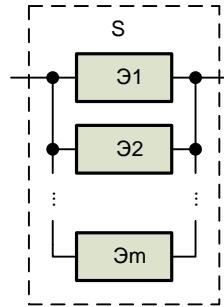


Рисунок 2.2 - Схема логического параллельного соединения элементов
По теореме умножения вероятностей имеют место следующие выражения:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot \dots \cdot q_m(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i(t)),$$

где $q(t)$, $p(t)$ – соответственно вероятности отказа и безотказной работы одного элемента.

Систему типа “ n из k ” можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее k элементов ($k < n$).

На рис.2.3 представлена система “ k из n ”, которая работоспособна, если из n её элементов работают любые k ‘элементы (на схеме пунктиром обведены функционально необходимые элементы, причем выделение элементов произведено условно, в действительности все n элементов равнозначны). Системы типа “ n из k ” наиболее часто встречаются в электрических и связных системах (при этом элементами выступают связующие каналы), технологических линий, а также при структурном резервировании.

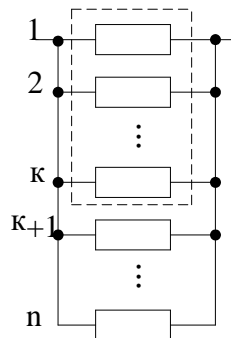


Рисунок 2.3 – Схема логического соединения “ k из n ”

Расчет надежности системы “ k из n ” может производиться комбинаторным методом, в основе которого лежит формула биномиального распределения. Биномиальному распределению подчиняется дискретная

случайная величина i - число появлений некоторого события в серии из n опытов, если в отдельном опыте вероятность появления события составляет p . При этом вероятность появления события ровно i раз определяется

$$P_i(t) = C_n^i P^{n-i}(t) \cdot [1 - P(t)]^i$$

где - C_n^i биномиальный коэффициент, называемый “числом сочетаний по i из n ” (т.е. сколькими разными способами можно реализовать ситуацию “ i из n ”):

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$$

Поскольку для безотказной работы системы “ k из n ” необходимо, чтобы количество исправных элементов было не меньше k , то вероятность безотказной работы может быть найдена по теореме сложения вероятностей для $i=0, 1, \dots, (n-k)$:

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i P^{n-i}(t) \cdot [1 - P(t)]^i.$$

Для расчета надежности систем с последовательно-параллельной структурой (в таких системах элементы соединяются только последовательно или только параллельно) *применяется метод преобразования структурной схемы* (метод свертки).

В этом случае необходимо произвести декомпозицию системы, разбив ее на простые подсистемы - группы элементов, методика расчета надежности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надежности заменяются квазиэлементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости такую процедуру можно выполнить несколько раз, до тех пор, пока оставшиеся квазиэлементы не образуют структуру, методика расчета надежности которой также известна.

2.1.3. Методы повышения надежности

Все методы повышения надежности технических средств систем могут быть сведены к следующим:

- резервирование;
- уменьшение интенсивности отказов технических средств;
- сокращение времени непрерывной работы;
- уменьшение среднего времени восстановления.

Реализация указанных методов может осуществляться либо при проектировании, либо при изготовлении, либо в процессе эксплуатации технических средств.

Уменьшить среднее время восстановления можно, повышая надежность технических средств и тем самым, уменьшая число отказов, или сокращая время, необходимое для отыскания и устранения отказов. Сократить время, необходимое для отыскания и устранения неисправностей, можно, применяя встроенный контроль, автоматизацию проверок,

повышение квалификации обслуживающего персонала, сбор и обобщение опыта эксплуатации.

Уменьшить время непрерывной работы объектов можно в том случае, если имеется возможность выключать объекты на определенные промежутки времени.

Наиболее эффективными и многочисленными методами повышения надежности, являются методы, которые применяются при проектировании технических средств. К таким методам относятся:

- резервирование;
- выбор наиболее надежных элементов;
- создание схем с ограниченными последствиями отказов элементов;
- облегчение электрических, механических, тепловых и других режимов работы элементов;
- стандартизация и унификация элементов и узлов;
- встроенный контроль;
- автоматизация проверок.

Эффективность этих методов состоит в том, что они принципиально позволяют из малонадежных элементов строить надежные объекты и системы. Эти методы позволяют уменьшить интенсивность отказов объектов и систем, уменьшить среднее время их восстановления и время непрерывной работы.

При проектировании систем одним из наиболее эффективных и просто реализуемых методов повышения надежности является резервирование. ***Резервирование применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния изделия при отказе одного или нескольких его элементов.***

В этом случае отказ наступает только после отказа основных и всех резервных элементов. При этом возможно резервирование на уровне всей системы в целом (общее резервирование) или на уровне отдельных ее элементов (раздельное резервирование).

На практике применяются способы резервирования, приведенные на рис. 2.4. Схемные реализации различных способов резервирования показаны на рис. 2.5.

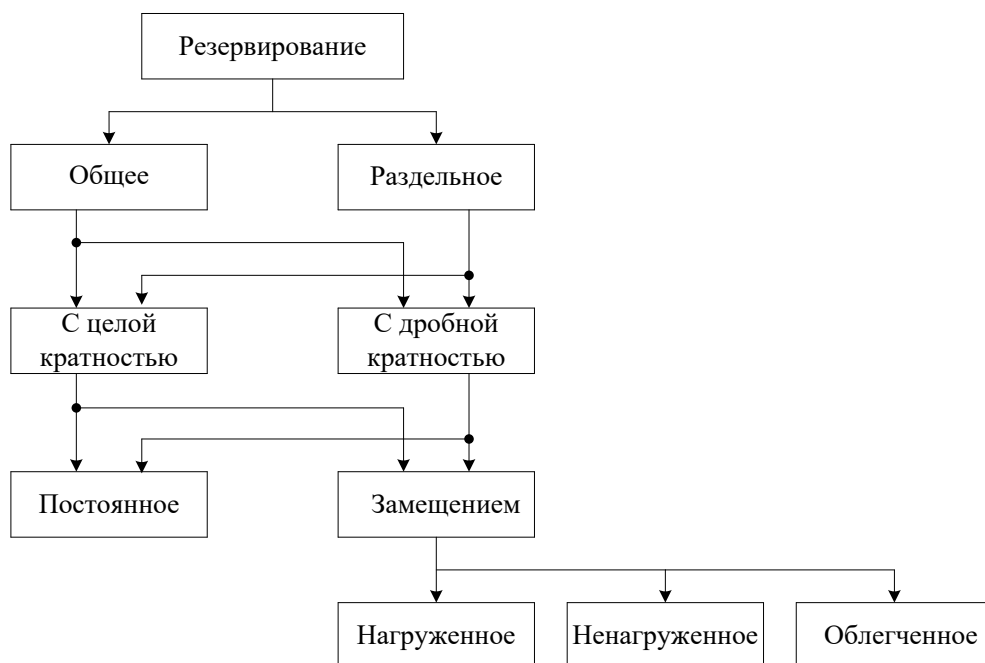


Рисунок 2.4 - Способы резервирования

Общее резервирование - резервирование, при котором резервируемым элементом является все изделие в целом (рис.2.5,а). **Раздельное резервирование** – резервирование, при котором резервируемыми являются отдельные элементы изделия или их группы (рис.2.5,б).

Основным параметром резервирования является его кратность. **Кратность резерва** - отношение числа резервных элементов изделия, к числу резервируемых ими основных элементов изделия, выраженное несокращенной дробью.

В зависимости от кратности резервирование подразделяется на резервирование с целой и дробной кратностью. Схемные обозначения обоих видов резервирования при постоянном включении резерва одинаковы. Для их различия на схеме указывается кратность резервирования m .

При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число, при резервировании с дробной кратностью – дробное несокращаемое число.

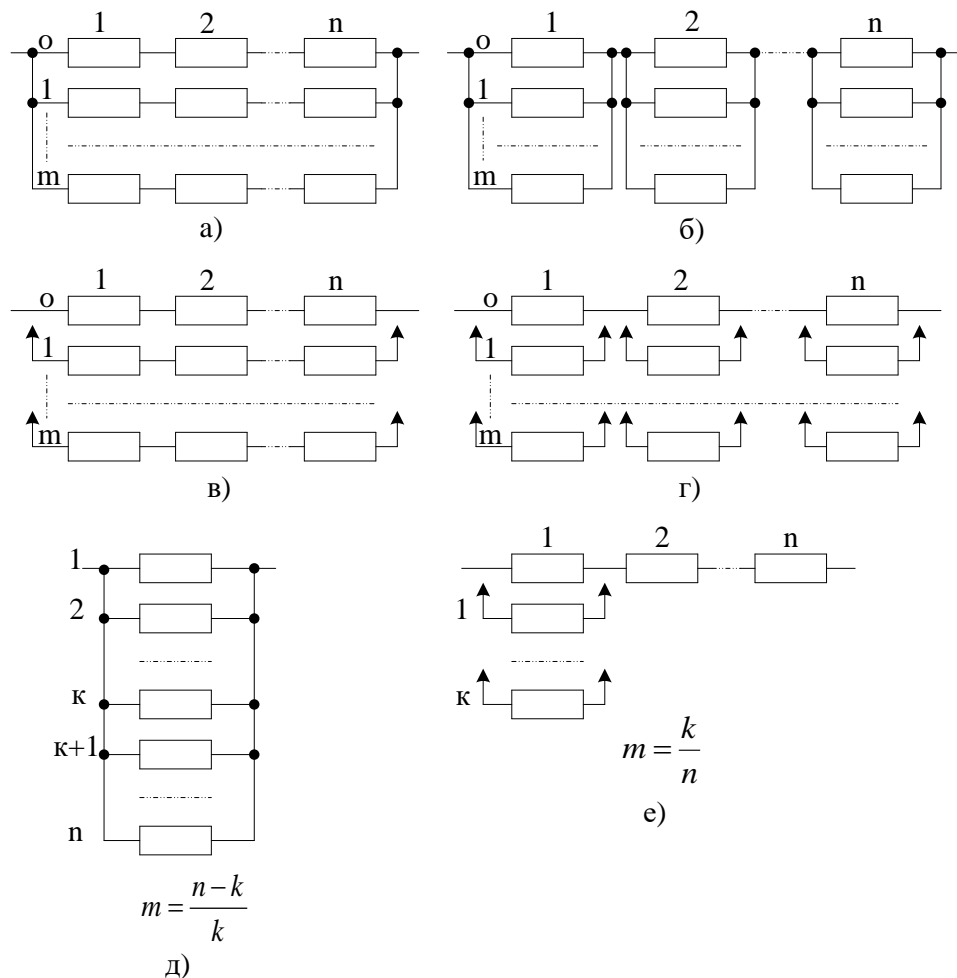


Рисунок 2.5 - Схемные реализации различных способов резервирования

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; е) раздельное замещением с дробной кратностью.

Например, $m = \frac{4}{2}$ означает наличие резервирования с дробной кратностью,

при котором число резервных элементов равно четырем, число основных – двум, а общее число элементов – шести. Сокращать дробь нельзя, так как если $m = \frac{4}{2} = 2$, то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трем.

По способу включения резервирование разделяется на постоянное и резервирование замещением. **Постоянное резервирование – резервирование без перестройки структуры изделия при возникновении отказа его элемента. Резервированием замещением – резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.**

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях:

- нагруженном;
- облегченном;
- ненагруженном.

Приведем основные расчетные формулы для указанных выше видов резервирования.

1. *Общее резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью* (рис.2.5,а):

$$P_C(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]^{m+1},$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента в течение времени t ; n – число элементов основной системы или любой из резервных систем; m – кратность резервирования (число резервных цепей).

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

$$P_C(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_o t})^{m+1},$$

где $\lambda_o = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ - интенсивность отказов основной системы или любой из резервных систем.

2. *Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью* (рис.2.5,б):

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

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента в течение времени t ; m_i - кратность резервирования i -го элемента; n – число элементов основной системы.

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

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - e^{-\lambda_i \cdot t}]^{m_i+1}\}.$$

При равнонадежных элементах и одинаковой кратности резервирования

$$P_C(t) = \left[1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1} \right]^n,$$

где λ - интенсивность отказа одного элемента системы.

3. *Общее резервирование замещением с целой кратностью* (рис.2.5,в).

При экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_C(t) = e^{-\lambda_o t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_o t)^i}{i!},$$

где λ_0 - интенсивность отказа основной (нерезервированной) системы.

При экспоненциальном законе надежности и облегченном состоянии резерва

$$P_C(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_i t})^i \right],$$

где $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)$; λ_1 - интенсивность отказов резервного устройства до замещения.

4. *Раздельное резервирование замещением с целой кратностью* (рис.2.5,г):

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

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы системы из-за отказов элементов i -го типа, резервированных по способу замещения. Вычисляется $P_i(t)$ по формулам общего резервирования замещением

При равной надежности всех элементов и экспоненциальном законе надежности:

$$P_C(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[\sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right]^n.$$

5. *Общее резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом* (рис.2.5,д):

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i P^{n-i}(t) \cdot [1 - P(t)]^i,$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы основной или любой из резервных систем; n - общее число элементов расчета резервированного соединения, k - число элементов необходимое для нормальной работы, $n - k$ - число резервных элементов. Кратность резервирования $m = \frac{n-k}{k}$, $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ -

число комбинаций из n элементов по i .

При экспоненциальном законе распределения функции надежности

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i e^{-\lambda(n-i)t} (1 - e^{-\lambda t})^i.$$

6. *Раздельное резервирование замещением с дробной кратностью (скользящее резервирование)* (рис.2.5,е):

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

Этот вид резервирования применяется, если все элементы системы выполняют одинаковые функции. Основная система имеет n элементов, а k элементов находятся в холодном резерве. Кратность резервирования $m = \frac{k}{n}$.

Надежность данной системы равна надежности системы с общим резервированием с замещением, но в то же время имеет в n раз меньше резервных элементов. Однако переключающие устройства при этом усложняются.

2.2 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Структурная схема надежности приведена на рис.2.6. Известны интенсивности отказов элементов: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,1 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\lambda_3 = \lambda_4 = 0,25 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\lambda_5 = \lambda_6 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\lambda_7 = \lambda_8 = 0,2 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\lambda_9 = 0,35 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; $\lambda_{10} = \lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_{13} = 0,15 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации. Гарантийный срок службы системы 5 лет.

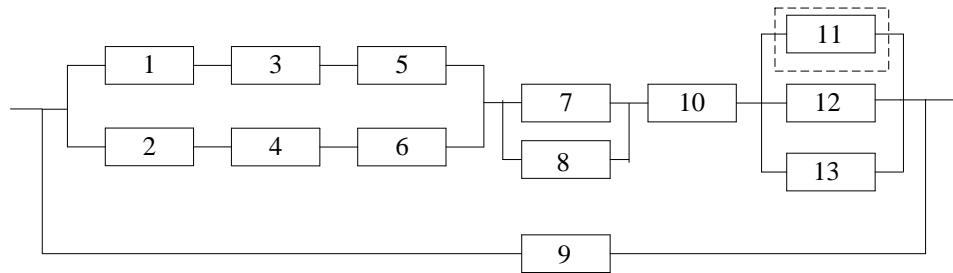


Рисунок 2.6 - Структурная схема расчета надежности

Рассматриваемая система представляет собой систему с последовательно-параллельной структурой. Поэтому для определения вероятности безотказной работы системы используем метод преобразования структурной схемы (метод свертки). В исходной схеме элементы 1, 3, 5 соединены последовательно. Заменяя их квазиэлементом A и учитывая, что

при последовательном соединении элементов $P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t)$ получим:

$$p_A(t) = p_1(t) \cdot p_3(t) \cdot p_5(t) \quad (2.1)$$

Элементы 2, 4, 6 также образуют последовательное соединение, поэтому заменяя их квазиэлементом B получим:

$$p_B(t) = p_2(t) \cdot p_4(t) \cdot p_6(t) \quad (2.2)$$

Элементы 7 и 8 в исходной схеме соединены параллельно заменяя их квазиэлементом C и учитывая, что $P_7 = P_8$ и при параллельном соединении

$P_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j(t))$ получим:

$$p_C(t) = 1 - (1 - p_7(t)) \cdot (1 - p_8(t)) = 1 - (1 - p_7(t))^2 \quad (2.3)$$

Элементы 11, 12, 13 образуют соединение «1 из 3», которое заменяем квазиэлементом D . Так как $p_{11} = p_{12} = p_{13}$, то для определения вероятности

безотказной работы квазиэлемента D можно воспользоваться формулой

$P_c(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i p^{n-i}(t) \cdot [1 - p(t)]^i$. В результате получим:

$$\begin{aligned}
 p_D(t) &= \sum_{i=0}^2 C_3^i p_{11}^{3-i}(t) \cdot [1 - p_{11}(t)]^i = \\
 &= \frac{3!}{0! \cdot 3!} p_{11}^3(t) \cdot (1 - p_{11}(t))^0 + \frac{3!}{1! \cdot 2!} p_{11}^2(t) \cdot (1 - p_{11}(t))^1 + \\
 &+ \frac{3!}{2! \cdot 1!} p_{11}(t) \cdot (1 - p_{11}(t))^2 = p_{11}^3(t) - 3p_{11}^2(t) + 3p_{11}(t)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

В результате преобразования получим следующую схему технической системы (рисунок 2.7).

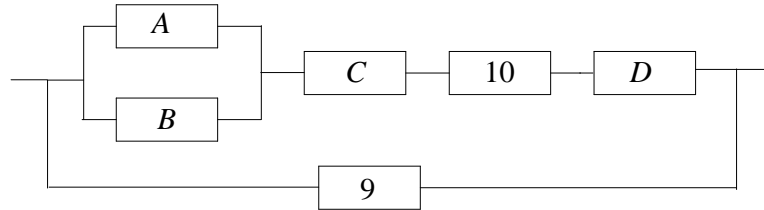


Рисунок 2.7 - Преобразованная схема системы

В преобразованной схеме квазиэлементы A и B соединены параллельно заменяя их квазиэлементом E и учитывая, что $p_A = p_B$ получим:

$$p_E(t) = 1 - (1 - p_A(t)) \cdot (1 - p_B(t)) = 1 - (1 - p_A(t))^2 \tag{2.5}$$

В результате такого преобразования получим следующую схему технической системы (рисунок 2.8).

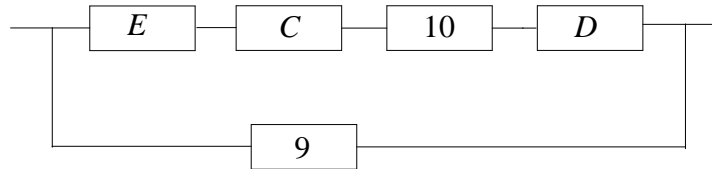


Рисунок 2.8 - Преобразованная схема системы

В полученной схеме квазиэлементы E , C , D и элемент 10 соединены последовательно заменяя их квазиэлементом F получим:

$$p_F(t) = p_E(t) \cdot p_C(t) \cdot p_{10}(t) \cdot p_D(t) \tag{2.6}$$

В результате этого преобразования получим следующую схему технической системы (рисунок 2.9).

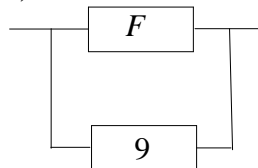


Рисунок 2.9 - Преобразованная схема системы

В преобразованной схеме квазиэлемент F и элемент 9 образуют параллельное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы:

$$P(t) = 1 - (1 - p_F(t)) \cdot (1 - p_9(t)) \quad (2.7)$$

Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1 по 13 (рисунок 2.6) подчиняются экспоненциальному закону:

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (2.8)$$

Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов 1 - 13 исходной схемы по формуле (2.8) для наработки до гарантийного срока службы ($t = 365 \cdot 24 \cdot 5 = 43800$ ч) представлены в таблице 2.1. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы квазиэлементов *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* и системы в целом по формулам (2.1) - (2.7) также представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов и системы

| Элемент | $\lambda_i \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}$ | Наработка до гарантийного срока службы t , ч | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | 30000 | 35500 | 40000 | 45000 | 50000 | 65700 |
| 1, 2 | 0,1 | 0,99501 | 0,99505 | 0,98511 | 0,98020 | 0,97531 | 0,97045 | 0,96561 | 0,96079 | 0,95600 | 0,95123 | 0,93641 |
| 3, 4, | 0,25 | 0,98758 | 0,97531 | 0,96319 | 0,95123 | 0,93941 | 0,92774 | 0,91622 | 0,90484 | 0,89360 | 0,88250 | 0,84853 |
| 5, 6 | 0,9 | 0,95600 | 0,91393 | 0,87372 | 0,83527 | 0,79852 | 0,76338 | 0,72279 | 0,69768 | 0,66698 | 0,63763 | 0,55361 |
| 7, 8 | 0,2 | 0,99005 | 0,98020 | 0,97045 | 0,96079 | 0,95123 | 0,94176 | 0,93239 | 0,92312 | 0,91393 | 0,90484 | 0,87687 |
| 9 | 0,35 | 0,98265 | 0,96561 | 0,94885 | 0,93239 | 0,91622 | 0,90032 | 0,88471 | 0,86936 | 0,85428 | 0,83946 | 0,79457 |
| 10 - 13 | 0,15 | 0,99253 | 0,98511 | 0,97775 | 0,97045 | 0,96319 | 0,95600 | 0,94885 | 0,94176 | 0,93473 | 0,92774 | 0,90815 |
| P_A, P_B | | 0,93941 | 0,8825 | 0,82903 | 0,7788 | 0,73162 | 0,68769 | 0,64565 | 0,60653 | 0,56978 | 0,53526 | 0,43988 |
| P_C | | 0,99990 | 0,99961 | 0,99913 | 0,99846 | 0,99762 | 0,99661 | 0,99543 | 0,99409 | 0,99259 | 0,99094 | 0,98484 |
| P_D | | 0,99999 | 0,99996 | 0,99987 | 0,99969 | 0,99941 | 0,99901 | 0,99847 | 0,99777 | 0,99691 | 0,99586 | 0,99133 |
| P_E | | 0,99633 | 0,98619 | 0,97077 | 0,95107 | 0,92797 | 0,90221 | 0,87444 | 0,84518 | 0,81491 | 0,78402 | 0,68627 |
| P_F | | 0,98878 | 0,97109 | 0,94821 | 0,92126 | 0,89116 | 0,85874 | 0,82465 | 0,78949 | 0,75374 | 0,71780 | 0,60712 |
| P | | 0,99981 | 0,99901 | 0,99735 | 0,99468 | 0,99088 | 0,98592 | 0,97978 | 0,97250 | 0,96411 | 0,95469 | 0,91929 |
| 5, 6 | 0,106 | 0,99471 | 0,98945 | 0,98422 | 0,97902 | 0,97384 | 0,96870 | 0,96357 | 0,95848 | 0,95341 | 0,94838 | 0,93273 |
| P'_A, P'_B | | 0,97746 | 0,95542 | 0,93389 | 0,91284 | 0,89226 | 0,87214 | 0,85248 | 0,83327 | 0,81448 | 0,79612 | 0,74112 |
| P'_E | | 0,99949 | 0,99801 | 0,99563 | 0,9924 | 0,98839 | 0,98365 | 0,97824 | 0,9722 | 0,96558 | 0,95843 | 0,93298 |
| P'_F | | 0,99192 | 0,98273 | 0,97250 | 0,96129 | 0,94919 | 0,93625 | 0,92255 | 0,90814 | 0,89310 | 0,87748 | 0,82539 |
| P' | | 0,99986 | 0,99941 | 0,99859 | 0,99738 | 0,99574 | 0,99365 | 0,99107 | 0,98800 | 0,98442 | 0,98033 | 0,96413 |
| P''_F | | 0,99987 | 0,99916 | 0,99732 | 0,99380 | 0,98815 | 0,98004 | 0,96925 | 0,95569 | 0,93936 | 0,92036 | 0,84565 |
| P'' | | 0,999998 | 0,99997 | 0,99986 | 0,99958 | 0,99901 | 0,99801 | 0,99646 | 0,99421 | 0,99116 | 0,98721 | 0,96829 |

Расчет показывает (таблица 2.1), что при $T = 65700$ ч для элементов преобразованной схемы (рис.2.9) $p_F = 0,60713$, а $p_9 = 0,79457$. Следовательно, из двух параллельно соединенных элементов минимальное значение вероятности безотказной работы имеет квазиэлемент F (последовательное соединение трех квазиэлементов E , C , D и элемента 10), и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом.

Для того, чтобы при $T = 65700$ ч система в целом имела вероятность безотказной работы $P(T) = 0,96411$, необходимо, чтобы квазиэлемент F имел вероятность безотказной работы (формула 2.7) равную:

$$p_F(T) = \frac{P(T) - p_9(T)}{1 - p_9(T)} \quad (2.8)$$

$$p_F(T) = \frac{0,96411 - 0,79457}{1 - 0,79457} = 0,82531 \quad (2.9)$$

Очевидно, значение $p_F(T)$, полученное по формуле (2.9), является минимальным для выполнения условия увеличения наработки не менее, чем в 1,5 раза, при более высоких значениях $p_F(t)$ увеличение надежности системы будет большим.

Так как квазиэлемент F (рис.2.8) представляет собой последовательное соединение элементов, то вероятность безотказной работы этого соединения не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов. Из таблицы 2.1 видно, что самым ненадежным элементом является квазиэлемент E , представляющий собой параллельное соединение двух квазиэлементов A и B .

Для определения вероятности безотказной работы квазиэлемента E необходимо решить уравнение (2.6) относительно $p_E(T)$ при $p_F(T) = 0,82531$.

$$p_E(T) = \frac{p_F(T)}{p_C(T) \cdot p_D(T) \cdot p_{10}(T)} \quad (2.10)$$

$$p_E(T) = \frac{0,82531}{0,98484 \cdot 0,99133 \cdot 0,90815} = 0,93290$$

Для определения минимально необходимой вероятности безотказной работы квазиэлемента A необходимо решить уравнение (2.5) относительно $p_A(T)$ при $p_E(T) = 0,98327$.

$$p_A(T) = \frac{2 \pm 2\sqrt{1 - p_E(T)}}{2} = -1 \pm \sqrt{1 - p_E(T)} \quad (2.10)$$

$$p_A(T) = 1 \pm \sqrt{1 - 0,93290} = 0,74096 \quad (2.11)$$

Квазиэлемент A представляет собой (рис.2.6) последовательное соединение элементов 1, 3, 5. Вероятность безотказной работы этого соединения не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов. Из таблицы 2.1 видно, что самым ненадежным элементом является элемент 5. Для определения минимально необходимой

вероятности безотказной работы элемента 5 необходимо решить уравнение (2.1):

$$p_5(T) = \frac{p_A(T)}{p_1(T) \cdot p_3(T)} \quad (2.12)$$

$$p_5(T) = \frac{0,74096}{0,93641 \cdot 0,84853} = 0,93252 \quad (2.13)$$

Так как по условиям задания все элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону (2.8), то для элемента 5 при $T = 65700$ находим

$$\lambda'_5 = -\frac{\ln p_5(T)}{T} = -\frac{\ln 0,93252}{65700} = 0,106 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч} \quad (2.14)$$

Таким образом, для увеличения гарантийного срока службы системы необходимо увеличить надежность элементов 5 и 6 и снизить интенсивность их отказов с $0,9 \cdot 10^{-5}$ до $0,106 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, т.е. в 9 раз.

Результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 5 и 6 приведены в таблице 2.1. Там же приведены расчетные значения вероятности безотказной работы квазиэлементов p'_A , p'_B , p'_E , p'_F и системы в целом P' . При $T = 65700$ ч вероятность безотказной работы системы $P' = 0,96413$, что соответствует условиям задания.

Если решение уравнения аналитическим способом вызывает затруднение, рекомендуется для его решения использовать графоаналитический метод.

Для второго способа увеличения вероятности безотказной работы системы - структурного резервирования также выбираем квазиэлемент F , вероятность безотказной работы которого после резервирования должна быть не ниже $p''_F(T) = 0,82531$ (см. формулу 2.9).

Для повышения надежности квазиэлемента F используем резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью. Поэтому параллельно квазиэлементу F добавляем элементы, идентичные по надежности исходному квазиэлементу, до тех пор, пока вероятность безотказной работы $p''_F(T)$ не достигнет заданного значения

Добавим один квазиэлемент F , тогда вероятность безотказной работы

$$p''_F(T) = 1 - (1 - p_F(T))^2 \quad (2.15)$$

$$p''_F(T) = 1 - (1 - 0,60712)^2 = 0,84564 \quad (2.16)$$

Таким образом, для повышения надежности до требуемого уровня необходимо параллельно квазиэлементу F включить еще один такой же квазиэлемент. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы квазиэлемента F $p''_F(t)$ и системы в целом $P''(t)$ представлены в таблице 2.1.

В этом случае исходная схема (рис.2.6) преобразуется в схему, показанную на рисунке 2.10, а на рисунке 2.11 представлены графики зависимости вероятности безотказной работы системы $P(t)$, вероятности

безотказной работы после повышения надежности элементов $P'(t)$ и вероятности безотказной работы после структурного резервирования $P''(t)$

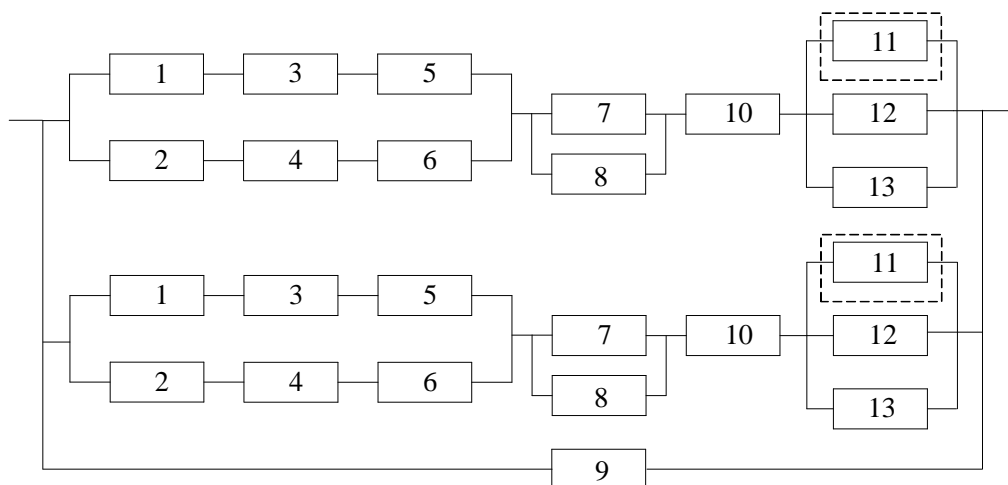
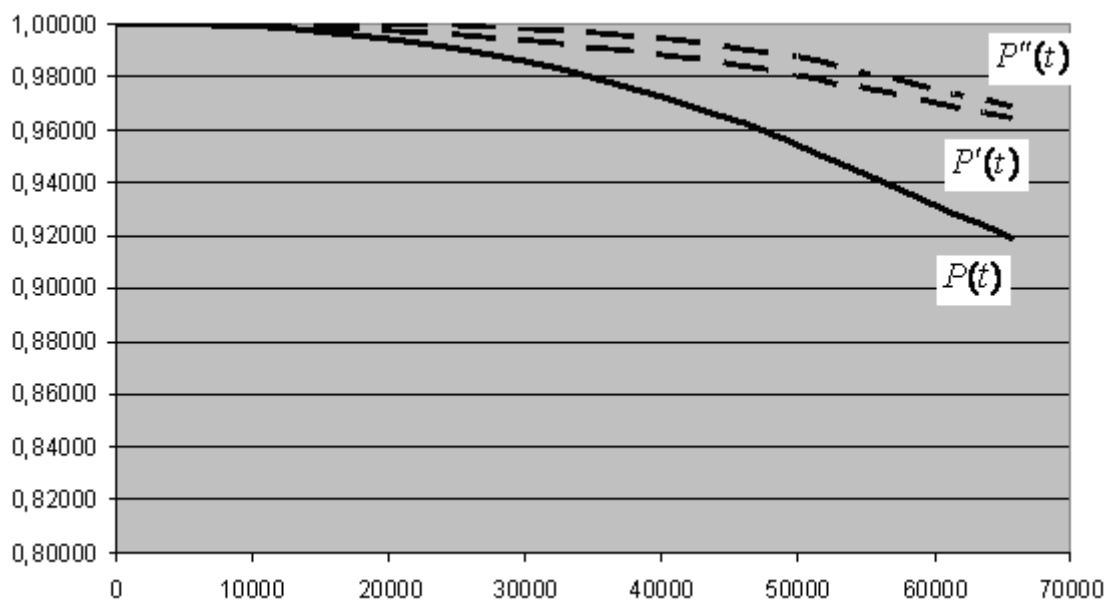


Рисунок 2.10 – Схема расчета надежности системы после резервирования



На рис.2.11 - Изменение вероятности безотказной работы исходной системы ($P(t)$), системы с повышенной надежностью элементов ($P'(t)$) и системы со структурным резервированием элементов ($P''(t)$).

Вывод.

Анализ зависимостей вероятности безотказной работы системы от времени (наработки) (рис. 2.11) показывает, что второй способ повышения надежности системы (структурное резервирование) предпочтительнее первого, так как в период наработки до $T = 65700$ часов вероятность безотказной работы системы при структурном резервировании (кривая $P''(t)$) выше, чем при увеличении надежности элементов (кривая $P'(t)$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А.В., Ермакова О.П. Надежность информационных систем. Основы надежности устройств ЖАТС. Курс лекций – М.: РГОТУПС, 2003. 89 с.
2. Сапожников В.В., Сапожников Вл,В, Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Учебное пособие для вузов ж.д. трансп./ Под ред. Вл.В. Сапожникова.- М.:Маршрут,2003. 263 с.
3. Надежность изделий электронной техники народнохозяйственного назначения. Справочник.- М.:ВНИИ Электростандарт, 1989. 196 с.
4. Горелик А.В., Ермакова О.П. Практикум по теории надежности: учеб. пособие. – М.:ФГБОУ»Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013.-133 с.