

МИНЕСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Рубцовский индустриальный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»

А.Н ТАТАРНИКОВА, С.А. ГОНЧАРОВ,  
О.П. БАЛАШОВ

**Надежность электроснабжения**

Методические указания для самостоятельных работ студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

г.Рубцовск, 2021

А.Н. Татарникова, С.А. Гончаров., О.П. Балашов. Надёжность электроснабжения Методические указания для самостоятельных работ студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения./ Татарникова А.Н., Гончаров, Балашов О.П. - Рубцовск, 2021.-9 с. [ЭР]

Методические указания для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» предназначены в качестве руководства при изучении дисциплины «Надёжность электроснабжения». Содержат перечень вопросов по дисциплине и указания для решения контрольной работы

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения.

Рассмотрены и одобрены  
на заседании кафедры ЭЭ  
Протокол № от .

©Рубцовский индустриальный институт,2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	5
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	7
3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ.....	9
4. ПРИМЕР РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....	15
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	23

## *ВВЕДЕНИЕ*

Надежностью называют свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Расширение условий эксплуатации, повышение ответственности выполняемых устройствами электроснабжения функций, их усложнение приводит к повышению требований к надежности систем электроснабжения (СЭС) в целом.

Надежность является сложным свойством, и характеризуется такими составляющими, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, восстанавливаемость и сохраняемость.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Безотказность показывает свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки, выражающееся в вероятности безотказной работы, средней наработке до отказа, интенсивности отказов.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния устройств энергоснабжения. Для установления причин отказов, виновников их возникновения и разработки мероприятий по снижению вероятности их возникновения служит классификация отказов (рис.1.1).

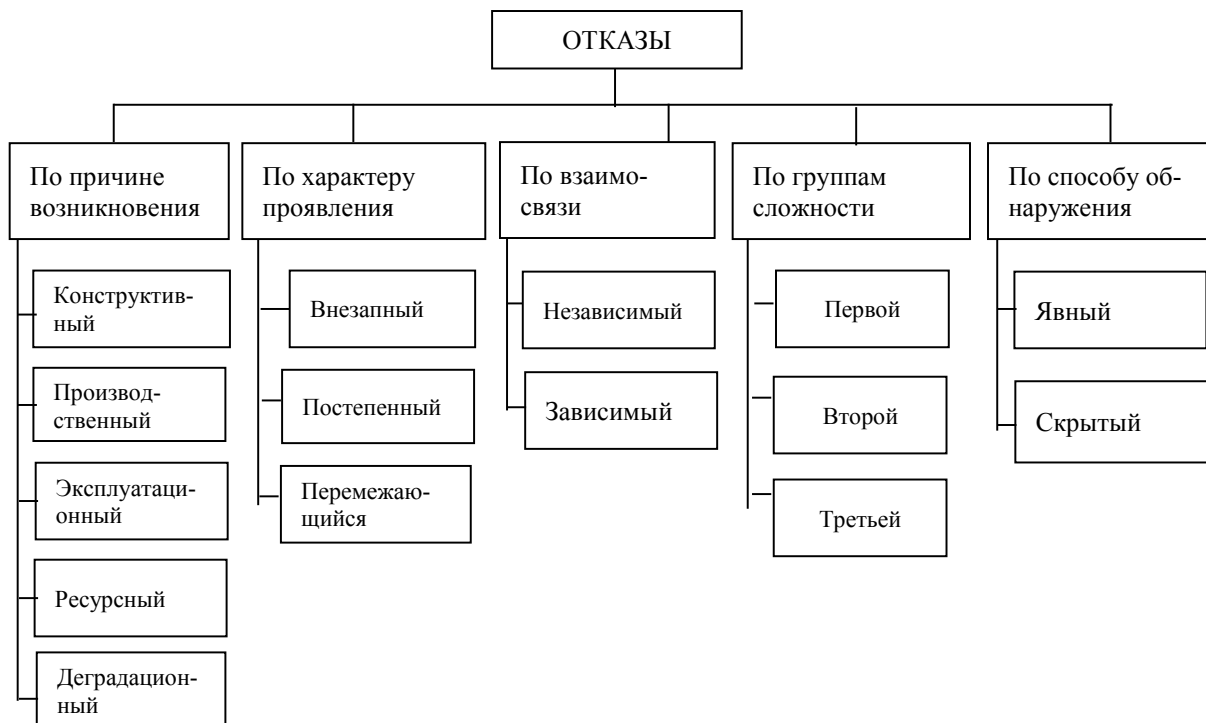


Рис.1.1. Классификация отказов

Отказы делят по причине возникновения, характеру проявления, взаимосвязи, группам сложности и способу обнаружения.

По причине возникновения отказы делят на: конструктивные, производственные, эксплуатационные, ресурсные и деградационные.

*Конструктивный отказ* – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта.

Конструктивный отказ возникает в результате несовершенства конструкции объекта: при наличии ошибочных исходных данных для проектирования, ошибок при выборе кинематики механизмов или электрооборудования, выполнении прочностных расчетов, неправильном назначении материала детали, технических требований на изготовление отдельных элементов и объекта в целом и т.д.

Желательно мероприятия по устранению конструктивных отказов проводить на более ранних стадиях производства объекта.

*Производственный отказ* - отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии.

Производственные отказы возникают в результате неправильного назначения технологических процессов изготовления или восстановления деталей и сборки объекта или служат следствием нарушения принятой технологии, а также неудовлетворительного качества материала деталей или наносимых на них покрытий, несовершенства технологических методов обработки деталей, применения недостаточно точных измерительных средств, невыполнения технических требований на изготовление и сборку элементов и объекта в целом.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта.

Эксплуатационные отказы возникают вследствие использования объектов в условиях, для которых они не предназначались, нарушения правил эксплуатации (недопустимые перегрузки, невыполнение правил ТО, несвоевременное проведение регулировок, несоблюдение правил транспортировки и хранения).

По характеру проявления отказы подразделяют на внезапные, постепенные и перемежающиеся.

*Внезапный отказ* – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Внезапные отказы возникают вследствие вполне определенных причин (усталостное разрушение деталей, поломка деталей из-за внутренних дефектов или перегрузок, коробление деталей вследствие местных значительных перегревов и т.д.). Однако установить их заранее, как правило, не удается, и поэтому связанные с этими причинами отказы с точки зрения эксплуатации возникают неожиданно.

Характерные примеры внезапных отказов – аварийные поломки деталей, пробивание изоляции и т.д.

*Постепенный отказ* возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Главная причина постепенного отказа – естественное старение и изнашивание.

При ТО и ремонтах принимают меры, предупреждающие или увеличивающие наработку до возникновения отказа путем регулировок, замены быстроизнашивающихся деталей и т.д.

*Перемежающийся отказ* – многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта одного и того же характера.

Отказ в этом случае многократно возникает и сам устраняется. Пример такого отказа – плохой контакт или залипание в результате износа.

По взаимосвязи отказы подразделяют на независимые и зависимые.

*Независимый отказ* – отказ объекта, не обусловленный отказом другого объекта.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами.

Независимый отказ элемента вызывается потерей работоспособности именно этого элемента, а не является следствием потери работоспособности другого элемента технической системы.

По группам сложности отказы подразделяют на три группы.

*Отказы первой группы сложности* устраняют заменой или ремонтом деталей, расположенных снаружи агрегатов или сборочных единиц, или же путем внеочередного проведения операций ежесменного ТО (ЕТО) и периодических ТО (ТО-1 и ТО-2).

*Отказы второй группы сложности* устраняют заменой или ремонтом легкодоступных сборочных единиц и агрегатов с раскрытием внутренних полостей основных агрегатов или проведением операций внеочередного ТО-3. Эти отказы можно устранять в полевых условиях, но с участием персонала передвижной ремонтной мастерской.

*Отказы третьей группы сложности* устраняют, разбирая основные агрегаты в стационарных мастерских.

По способу обнаружения различают явный и скрытый отказы.

*Явный отказ* – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

*Скрытый отказ* – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении ТО или специальными методами диагностирования.

*Ресурсный отказ* – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

*Деградационный отказ* – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми этапами “жизненного цикла” устройств электроснабжения от зарождения идеи создания до списания: при расчете и проектировании изделия его надежность закладывается в проект, при изготовлении надежность обеспечивается, при эксплуатации - реализуется. Поэтому проблема надежности - комплексная проблема и решать ее необходимо на всех этапах и разными средствами. На этапе проектирования изделия определяется его структура, производится выбор или разработка элементной базы, поэтому здесь имеются наибольшие возможности обеспечения требуемого уровня надежности устройств электроснабжения. Основным методом решения этой задачи являются расчеты надежности (в первую очередь - безотказности), в зависимости от структуры объекта и характеристик его составляющих частей, с последующей необходимой коррекцией проекта. Некоторые способы расчета структурной надежности рассматриваются в данном пособии.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Задание на расчетно-графическую работу содержит в качестве исходных данных структурную схему надежности технической системы (ТС) и интенсивность отказов ее элементов (см. п. 7). То есть студент оказывается в ситуации, когда выполнены п. 1 - 6 анализа структурной надежности ТС (см. разд. 2), и ему надлежит в первую очередь выполнить п. 7 - составить расчетные зависимости для определения

показателей надежности системы для различных значений наработки  $t$ , чтобы графически изобразить вероятность безотказной работы  $P(t)$  как функцию наработки.

Поскольку заданная схема надежности является комбинированной, ее следует подвергнуть декомпозиции, как это описано в п. 3.5. Далее, вводя соответствующие квазиэлементы, преобразовать исходную схему к простейшему виду и, используя соответствующие формулы п. 3.1 - 3.4, для ряда значений наработки  $t$  в предположении простейшего потока отказов формулы (1.7) вычислить значения вероятностей безотказной работы элементов, квазиэлементов и всей системы. В расчетно-графической работе следует привести все промежуточные преобразования исходной схемы, конкретные рабочие расчетные формулы с их обоснованием, а результаты расчета представить в виде таблицы, в которой по столбцам изменяется значение наработки  $t$ , а по строкам в столбцах приводятся вычисленные значения вероятностей безотказной работы элементов, квазиэлементов и всей системы, полученные по рабочим формулам. При этом диапазон измерения наработки  $t$  должен обеспечить снижение вероятности безотказной работы системы до уровня 0.1 - 0.2 и содержать не менее 8-10 значений аргумента.

После этого строится график зависимости  $P(t)$  по результатам расчета. И него графически по заданному значению  $\gamma(P_\gamma)$  определяется  $\gamma$  - процентная наработка системы (см. (1.9)),  $T_\gamma$ .

По заданию требуется предложить способы увеличения  $\gamma$  - процентной наработки в 1,5 раза за счет повышения надежности элементов и за счет структурного резервирования.

Предварительно следует определить элемент или квазиэлемент окончательно преобразованной схемы, повышение надежности которого даст максимальный эффект в отношении надежности всей системы.

Для дальнейших действий необходимо вычислить требуемое улучшенное значение  $\gamma$  - процентной наработки  $T'_\gamma$  элементарным умножением  $T_\gamma$  на 1.5. Следовательно, чтобы удовлетворить заданию в отношении повышения надежности системы, необходимо обеспечить вероятность безотказной работы  $P = P_\gamma$  за время  $t = T'_\gamma = T_\gamma \cdot 1.5$ . Теперь следует повторить расчет надежности элементов, квазиэлементов и всей системы за время  $T'_\gamma$  и дополнить этим столбцом предыдущую таблицу. Зная вероятности безотказной работы всех элементов преобразованной схемы и требуемое значение  $P_\gamma$ , легко определить, какую вероятность безотказной работы  $P'$  за время  $T'_\gamma$  должен иметь квазиэлемент, избранный для модернизации.

По первому методу модернизации необходимо определить интенсивности отказов элементов, входящих в данный квазиэлемент, при которых при неизменной структуре квазиэлемента обеспечивалось бы необходимое значение  $P'(T'_\gamma)$ . Проще это осуществить графоаналитическим методом, задавая ряд пропорционально уменьшенных (по сравнению с исходной) интенсивностей отказов для составляющих квазиэлемента и просчитывая каждый раз величину  $P'(T'_\gamma)$ . Из построенного по этим данным графика можно определить необходимую кратность снижения интенсивно-



сти отказов элементов и сами значения интенсивности. Для найденного решения следует выполнить проверочный расчет вероятности безотказной работы системы за время  $T'_\gamma$ .

По второму методу надежность выбранного квазиэлемента можно повысить за счет резервирования без изменения надежности составляющих элементов. При этом, основываясь на рекомендациях и соображениях, учитывая структуру модернизируемого квазиэлемента, нужно выбрать, какие его составляющие элементы и как следует резервировать для достижения наибольшего эффекта. Далее остается определить необходимую кратность резервирования  $\ell$ . Поскольку  $\ell$  есть величина дискретная, аналитически ее определить невозможно. Для решения задачи нужно последовательно увеличивать кратность резервирования, начиная с единицы, каждый раз по соответствующим формулам из п. 4.2 определять величину вероятности безотказной работы квазиэлемента в течении времени  $T'_\gamma$ . Как только необходимое значение  $P'(T'_\gamma)$  будет обеспечено, окажется реализованным второй метод повышения надежности системы. Для найденного решения также необходимо провести проверку вероятности безотказной работы системы за время  $T'_\gamma$ . Модернизованную структуру с резервированием следует привести в пояснительной записке.

Для построения зависимостей вероятностей безотказной работы от времени для модернизированной системы по первому и второму методу удобно дополнить ранее составленную таблицу соответствующими строками. Графики этих зависимостей следует изобразить совместно с кривой  $P(t)$  исходной системы.

Полученное семейство кривых позволяет провести сравнение двух вариантов модернизации, которое следует привести в качестве вывода к работе.

Все действия и использование расчетных соотношений должны быть объяснены и обоснованы. Для заимствуемой информации (формулы, численные значения констант) необходимо указать источник заимствования.

Задания на расчетно-графическую работу приведены в главе 6, а в главе 7 - пример расчета надежности.

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

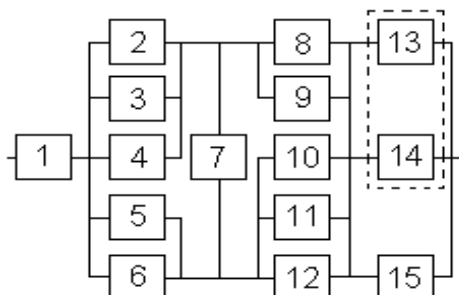
По структурной схеме надежности технической системы в соответствии с вариантом задания, требуемому значению вероятности безотказной работы системы  $\gamma$  и значениям интенсивностей отказов ее элементов  $\lambda_i$  (табл. 1) требуется:

1. Построить график изменения вероятности безотказной работы системы от времени наработки в диапазоне снижения вероятности до уровня 0.1 - 0.2.
2. Определить  $\gamma$  - процентную наработку технической системы.
3. Обеспечить увеличение  $\gamma$  - процентной наработки не менее чем в 1,5 раза за счет:

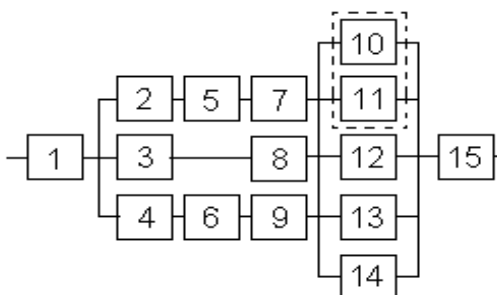
- а) повышения надежности элементов;
- б) структурного резервирования элементов системы.

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.

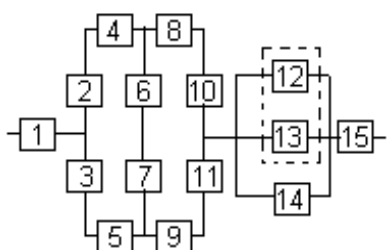
На схемах обведенные пунктиром  $m$  элементов являются функционально необходимыми из  $n$  параллельных ветвей.



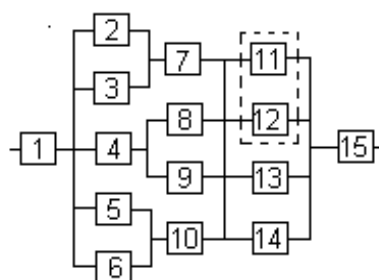
Вариант 1



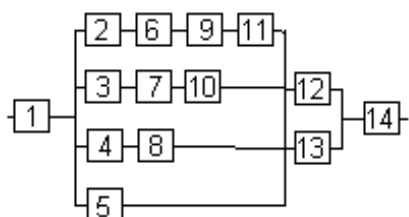
Вариант 2



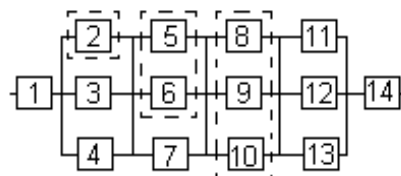
Вариант 3



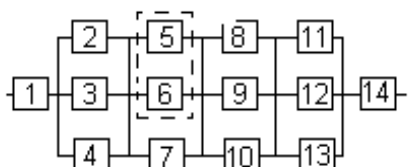
Вариант 4



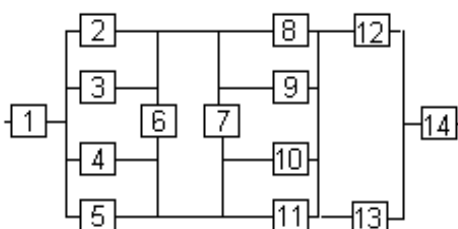
Вариант 7



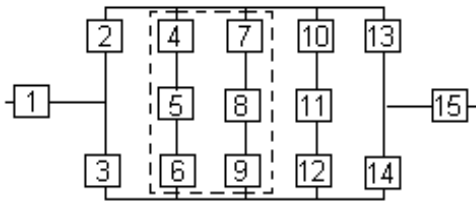
Вариант 8



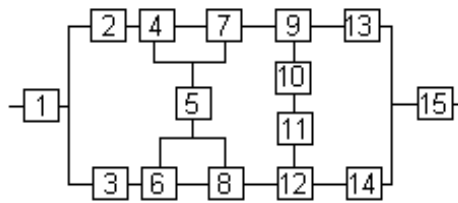
Вариант 9



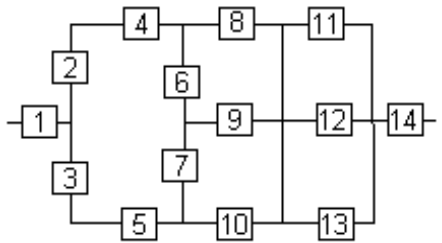
Вариант 10



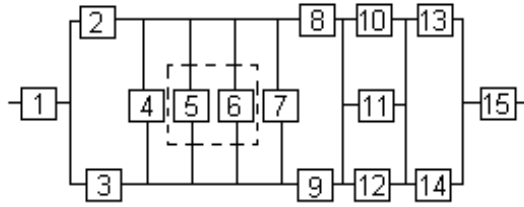
Вариант 11



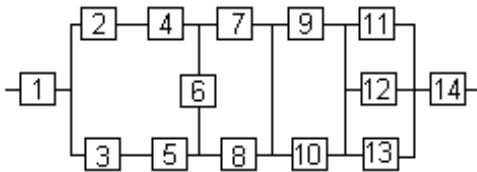
Вариант 12



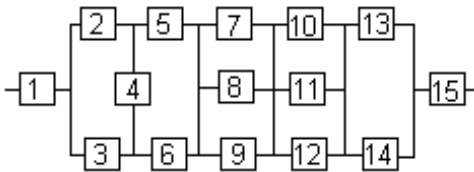
Вариант 13



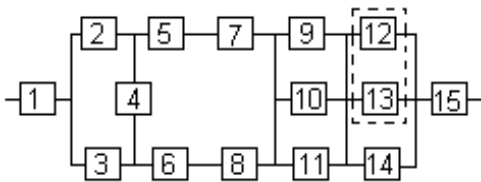
Вариант 14



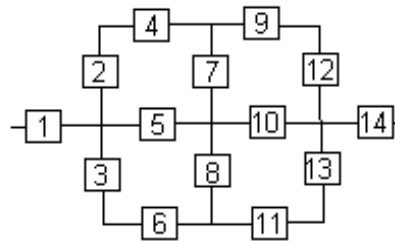
Вариант 15



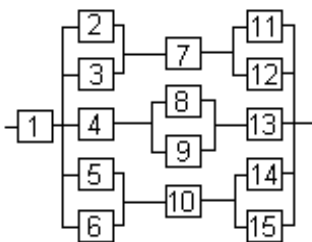
Вариант 16



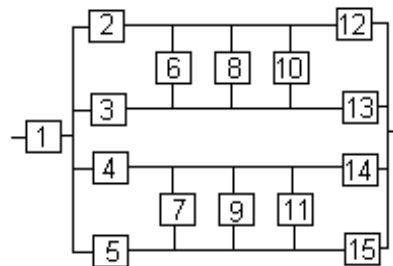
Вариант 17



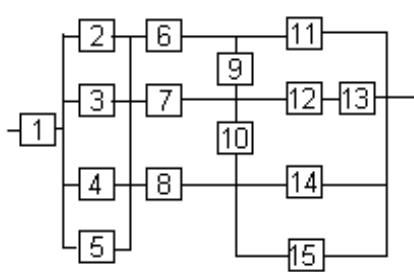
Вариант 18



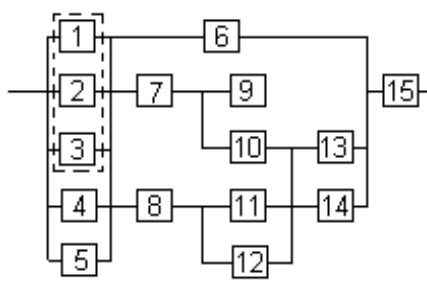
Вариант 19



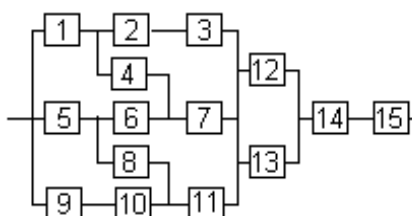
Вариант 20



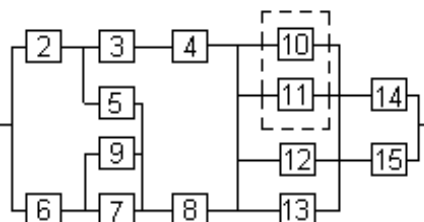
Вариант 21



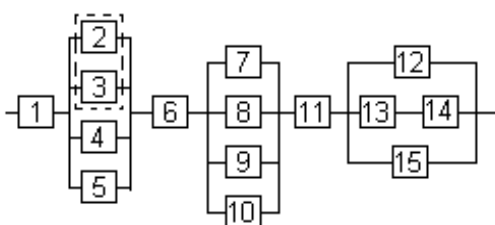
Вариант 22



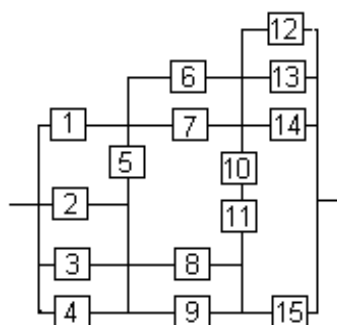
Вариант 23



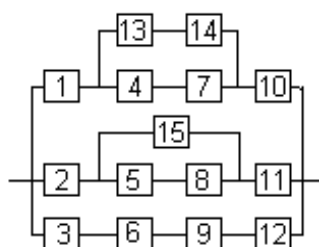
Вариант 24



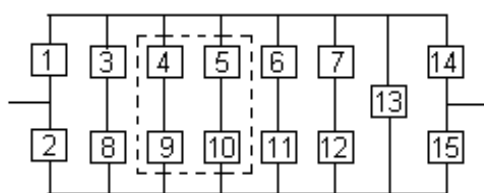
Вариант 25



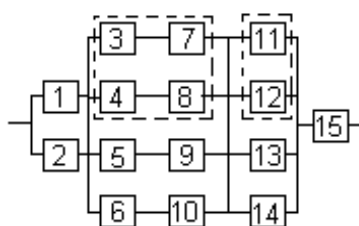
Вариант 26



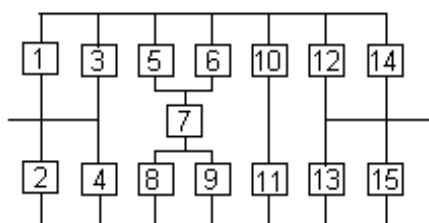
Вариант 27



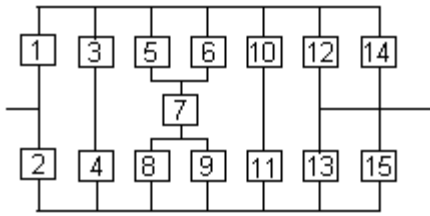
Вариант 28



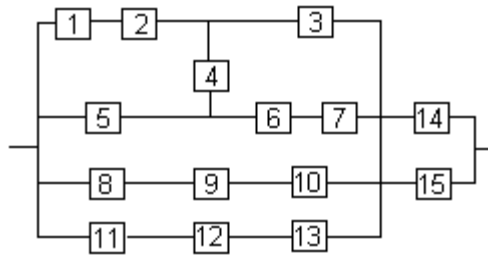
Вариант 29



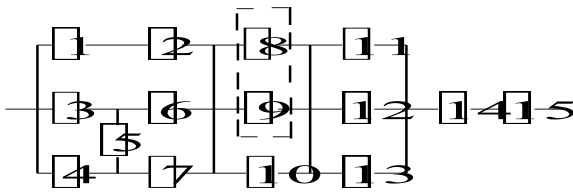
Вариант 30



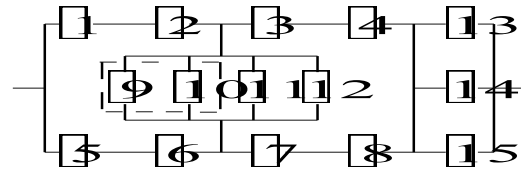
Вариант 31



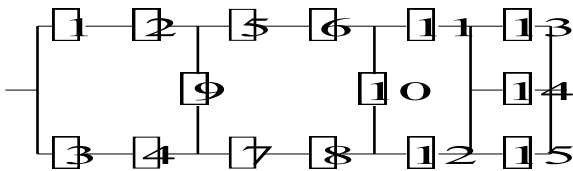
Вариант 32



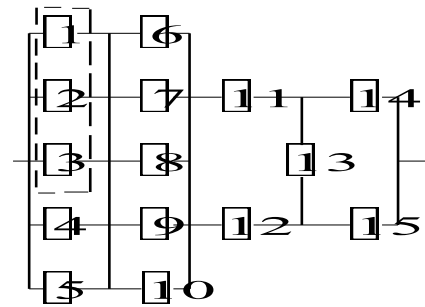
Вариант 33



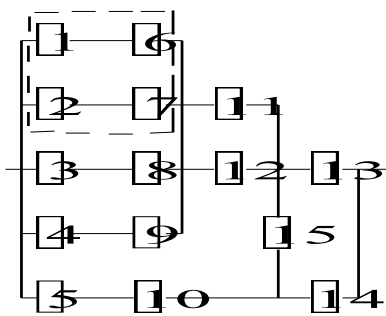
Вариант 34



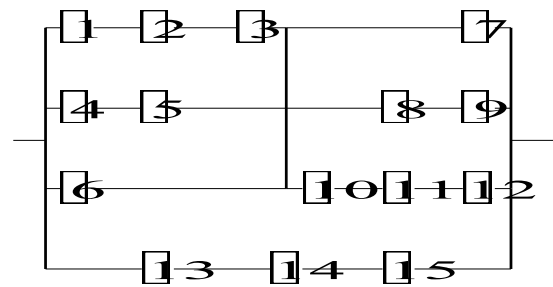
Вариант 35



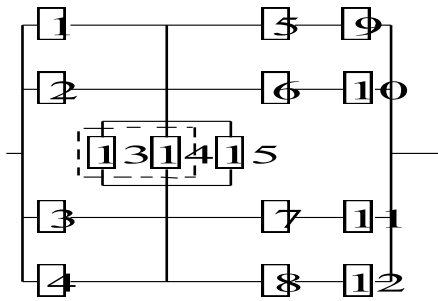
Вариант 36



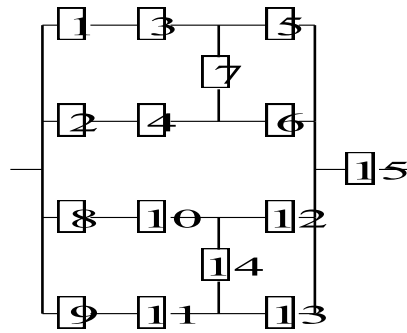
Вариант 37



Вариант 38



Вариант 39



Вариант 4

Таблица 1

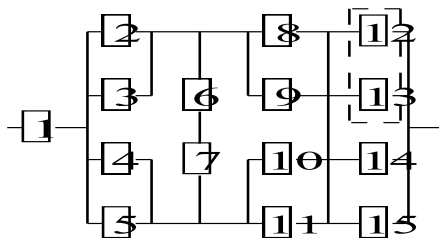
Численные значения параметров к заданию

№ ва р.	$\gamma, \%$	Интенсивности отказов элементов, $\lambda_i, \times 10^{-6} 1/ч$														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	90	0.1	1.0			0.5		1.0			0.1					
2	95	0.2	0.5						1.0			0.1				
3	80	0.1	1.0			2.0		1.0			5.0			0.2		
4	70	0.05	1.0			0.5			0.2			0.02				
5	50	0.01	0.05		0.1		0.5			1.0						
6	75	0.01	0.05		1.0						0.05		0.1		-	
7	65	0.05	0.5			0.05		0.005		0.1		0.2		0.1		-
8	85	0.1	0.5		0.2			0.01		0.5		0.1		-		
9	60	0.03	0.5		0.2			1.0		0.03		0.1		-		
10	50	0.1	0.5			1.0		0.5			1.0		0.1		-	
11	75	0.05	0.2		0.5						0.2		0.1			
12	65	0.02	0.1		1.0			2.0			0.1		0.05			
13	70	0.01	0.2			0.1		1.0		0.5		0.1		-		
14	50	0.01	0.1		10.0			0.2		10.0		0.5		-		
15	85	0.01	1.0		5.0			0.2		5.0		0.1		-		
16	80	0.1	1.0		2.0		1.0		5.0		3.0		1.0		0.05	
17	95	0.1	5.0		1.0		5.0		10.0		5.0		1.0		0.2	

18	60	0.01	1.0											0.1	-	
19	75	0.1	5.0	0.5	5.0	1.0	3.0	1.0	5.0	0.5	5.0					
20	90	0.1	10.0				20.0				10.0					
21	90	0.1	1.0			0.5			2.0	0.5	0.2	1.0				
22	80	1.0			0.2	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.1				
23	70	0.5	0.2	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0	0.2				
24	60	1.0	2.0		4.0	2.0		4.0	5.0			1.0				
25	50	0.5	10.0			0.5	5.0			0.8	5.0	1.0	5.0			
26	60	1.0	2.0	3.0	5.0			2.0	5.0			1.0				
27	70	5.0		10.0			15.0			10.0		10.0	15.0	10.0		
28	80	1.0	2.0				5.0				2.0	1.0				
29	90	5.0	20.0				50.0				30.0			1.0		
30	80	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0	2.0	5.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0		
31	70	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0	2.0	5.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0		
32	60	5.0	2.0			5.0	1.0	2.0	3.0			1.0				
33	60	1.0	2.0	3.0	4.0	2.0	3.0		5.5			0.2	0.5			
34	90	6.0	3.0	6.0		3.0	6.0	20.0			10.0					
35	95	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	5.0									
36	80	2.0			1.0				0.6							
37	70	10.0				30.0				5.0	2.0					
38	90	3.0		2.0	1.0	2.0	3.0	2.0								
39	90	8.0			3.0			5.0			2.0					
40	80	2.0			5.0	8.0	2.0			5.0	8.0					
№	γ,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ва	%	Интенсивности отказов элементов, λ <sub>1</sub> , x10 <sup>-6</sup> 1/ч														
р.																

#### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Структурная схема надежности приведена на рис 4.1. Значения интенсивности отказов элементов даны в  $10^{-6}$  1/ч.



$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.001; \\ \lambda_2 &= \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0.1 \\ \lambda_6 &= \lambda_7 = 0.01; \\ \lambda_8 &= \lambda_9 = \lambda_{10} = \lambda_{11} = 0.2 \\ \lambda_{12} &= \lambda_{13} = \lambda_{14} = \lambda_{15} = 0.5 \\ \gamma &= 50\%. \end{aligned}$$

Рис.7.1. Исходная схема систем

1. В исходной схеме элементы 2 и 3 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом А. Учитывая, что  $P_2 = P_3$ , получим

$$\text{A} \text{---} 6 \text{---} 7 \text{---} 8 \text{---} 9 \text{---} 10 \text{---} 11 \text{---} 12 \text{---} 13 \text{---} 14 \text{---} 15 \quad (4.1)$$

2. Элементы 4 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом В и учитывая, что  $P_4 = P_5 = P_2$ , получим

$$\text{B} \text{---} 6 \text{---} 7 \text{---} 8 \text{---} 9 \text{---} 10 \text{---} 11 \text{---} 12 \text{---} 13 \text{---} 14 \text{---} 15 \quad (4.2)$$

3. Элементы 6 и 7 в исходной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом С, для которого при  $P_6 = P_7$

$$R \rightarrow R_6 \rightarrow R_7 \rightarrow R_C \quad (4.3)$$

4. Элементы 8 и 9 образуют параллельное соединение. Заменяем их элементом D, для которого при  $P_8 = P_9$ , получим

$$R \rightarrow R_6 \rightarrow R_7 \rightarrow R_C \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_D \quad (4.4)$$

5. Элементы 10 и 11 с параллельным соединением заменяем элементом E, причем, так как  $P_{10} = P_{11} = P_8$ , то

$$R \rightarrow R_6 \rightarrow R_7 \rightarrow R_C \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_D \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_E \quad (4.5)$$

6. Элементы 12, 13, 14 и 15 образуют соединение “2 из 4”, которое заменяем элементом F. Так как  $P_{12} = P_{13} = P_{14} = P_{15}$ , то для определения вероятности безотказной работы элемента F можно воспользоваться комбинаторным методом (см. раздел 3.3):

$$\begin{aligned} P_F &= \sum_{k=2}^4 \binom{4}{k} P^k (1-P)^{4-k} = \\ &= \binom{4}{2} P^2 (1-P)^2 + \binom{4}{3} P^3 (1-P) + \binom{4}{4} P^4 = \\ &= 6P^2(1-P)^2 + 4P^3(1-P) + P^4 \end{aligned} \quad (4.6)$$

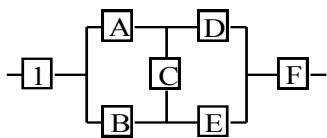


Рис.7.2. Преобразованная схема

7. Преобразованная схема изображена на рис. 7.2.

8. Элементы A, B, C, D и E образуют (рис. 7.2) мостиковую систему, которую можно заменить квазиэлементом G. Для расчета вероятности безотказной работы воспользуемся методом разложения относительно особого элемента (см.

раздел 3.4), в качестве которого выберем элемент C. Тогда

$$P_G = P_C P_{G|C=1} + (1-P_C) P_{G|C=0} \quad (7.7)$$

где  $P_G(P_C=1)$  - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при абсолютно надежном элементе C (рис. 7.3, а),  $P_G(P_C=0)$  - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при отказавшем элементе C (рис. 7.3, б).



Рис.7.3. Преобразования мостиковой системы при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) элементе C

Учитывая, что  $P_B = P_A$ , получим



$$\begin{aligned}
 & P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15} \\
 & P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15} \\
 & P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15} \\
 & P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15} \\
 & P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

9. После преобразований схема изображена на рис. 4.4.



10. В преобразованной схеме (рис.4 .4) элементы 1, G и F образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы

$$P = P_1 P_G P_F \tag{4.9}$$

Рис.7.4. Преобразованная схема

11. Так как по условию все элементы системы

работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1 по 15 (рис. 7.1) подчиняются экспоненциальному закону:

$$P = e^{-\lambda t} \tag{4.10}$$

12. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов 1 - 15 исходной схемы по формуле (4.10) для наработки до  $3 \cdot 10^6$  часов представлены в таблице 7.1.

13. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы квазиэлементов А, В, С, D, Е, F и G по формулам (4.1) - (4.6) и (4.8) также представлены в таблице 4.1.

14. На рис. 7.5 представлен график зависимости вероятности безотказной работы системы Р от времени (наработки) t.

15. По графику (рис. 4.5, кривая Р) находим для  $\gamma = 50\%$  ( $P_\gamma = 0.5$ )  $\gamma$  - процентную наработку системы  $T_\gamma = 1.9 \cdot 10^6$  ч.

16. Проверочный расчет при  $t = 1.9 \cdot 10^6$  ч показывает (таблица 4.1), что  $P_\gamma = 0.4923 \approx 0.5$ .

17. По условиям задания повышенная  $\gamma$  - процентная наработка системы

$$T_\gamma = 1.9 \cdot 10^6 \text{ ч.}$$

Таблица 4.1

### Расчет вероятности безотказной работы системы

Элемент	$\lambda_i, \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка t, $\times 10^6$ ч							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,9	2,85
1	0,001	0,9995	0,9990	0,9985	0,9980	0,9975	0,9970	0,9981	0,9972
2 - 5	0,1	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,8270	0,7520
6,7	0,01	0,9950	0,9900	0,9851	0,9802	0,9753	0,9704	0,9812	0,9719
8 - 11	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,6839	0,5655
12 - 15	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
А, В	-	0,9976	0,9909	0,9806	0,9671	0,9511	0,9328	0,9701	0,9385
С	-	0,9900	0,9801	0,9704	0,9608	0,9512	0,9417	0,9628	0,9446
Д, Е	-	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,9001	0,8112

F	-	0,9639	0,8282	0,6450	0,4687	0,3245	0,2172	0,5017	0,2458
G	-	0,9924	0,9888	0,9863	0,9820	0,9732	0,9583	0,9832	0,9594
P	-	0,9561	0,8181	0,6352	0,4593	0,3150	0,2075	0,4923	0,2352
12` - 15`	0,322	0,8513	0,7143	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806	0,5424	0,3994
F`	-	0,9883	0,9270	0,8397	0,7243	0,6043	0,4910	0,7483	0,5238
P`	-	0,9803	0,9157	0,8270	0,7098	0,5866	0,4691	0,7343	0,5011
16 - 18	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
F``	-	0,9993	0,9828	0,9173	0,7954	0,6413	0,4858	0,8233	0,5311
P``	-	0,9912	0,9708	0,9034	0,7795	0,6226	0,4641	0,8079	0,5081

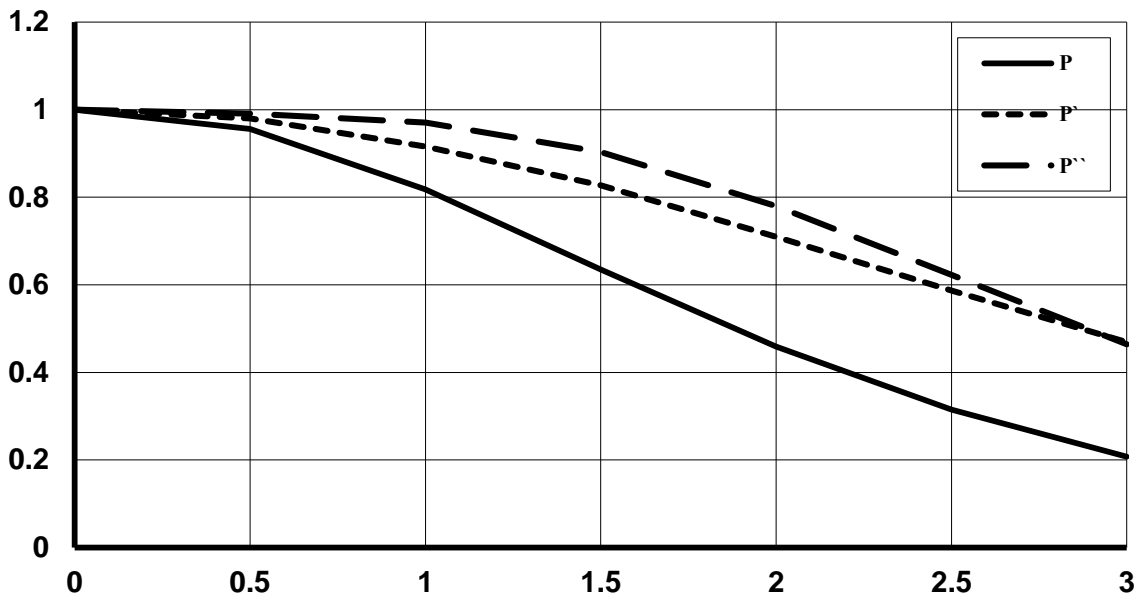


Рис 4.5. Изменение вероятности безотказной работы исходной системы (P), системы с повышенной надежностью (P') и системы со структурным резервированием элементов (P'')

18. Расчет показывает (таблица 4.1), что при  $t=285 \cdot 10^6$  ч для элементов преобразованной схемы (рис. 4.4)  $P_A=0,9972$ ,  $P_G=0,9594$  и  $P_F=0,2458$ . Следовательно, из трех последовательно соединенных элементов минимальное значение вероятности безотказной работы имеет элемент F (система “2 из 4” в исходной схеме (рис. 7.1)) и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом .

19. Для того, чтобы при  $T'_r=285 \cdot 10^6$  ч система в целом имела вероятность безотказной работы  $P_r=0,5$ , необходимо, чтобы элемент F имел вероятность безотказной работы (см. формулу (7.9))

$$P_r = \frac{P}{P_A \cdot P_G} = 0,5 \quad (4.11)$$

При этом значении элемент F останется самым ненадежным в схеме (рис. 4.4) и рассуждения в п. 18 останутся верными.

Очевидно, значение  $P_F$ , полученное по формуле (7.11), является мини-мальным для выполнения условия увеличения наработки не менее, чем в 1.5 раза, при бо-

лее высоких значениях  $P_F$  увеличение надежности системы будет большим.

20. Для определения минимально необходимой вероятности безотказной работы элементов 12 - 15 (рис. 4.1) необходимо решить уравнение (4.6) относительно  $P_{12}$  при  $P_F = 0.5226$ . Однако, т.к. решение аналитического выражения этого уравнения связано с определенными трудностями, более целесообразно использовать графо-аналитический метод. Для этого по данным табл. 4.1 строим график зависимости  $P_F = f(P_{12})$ . График представлен на рис. 4.6.

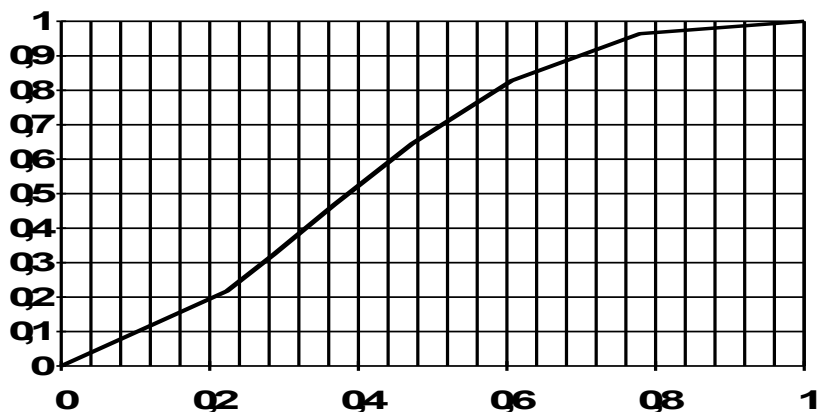


Рис. 4.6. Зависимость вероятности безотказной работы системы “2 из 4” от вероятности безотказной работы ее элементов

21. По графику при  $P_F = 0.5226$  находим  $P_{12} \approx 0.4$ .

22. Так как по условиям задания все элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону (4.10), то для элементов 12 - 15 при  $t = 285 \cdot 10^6$  находим

$$\lambda_{12,13,14,15} = \frac{0.5 \cdot 10^{-6}}{285 \cdot 10^6} \text{ ч}^{-1}. \quad (4.12)$$

23. Таким образом, для увеличения  $\lambda$  - процентной наработки системы необходимо увеличить надежность элементов 12, 13, 14 и 15 и снизить интенсивность их отказов с  $0.5 \cdot 10^{-6}$  до  $0.322 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , т.е. в 1.55 раза.

24. Результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 12, 13, 14 и 15 приведены в таблице 4.1. Там же приведены расчетные значения вероятности безотказной работы системы “2 из 4”  $F$  и системы в целом  $P$ . При  $t = 285 \cdot 10^6$  ч вероятность безотказной работы системы  $P = 0.5226$ , что соответствует условиям задания. График приведен на рис 4.5.

25. Для второго способа увеличения вероятности безотказной работы системы - структурного резервирования - по тем же соображениям (см. п. 18) также выбираем элемент F, вероятность безотказной работы которого после резервирования должна быть не ниже  $P_F'' = 0.5226$  (см. формулу (4.11)).

26. Для элемента F - системы "2 из 4" - резервирование означает увеличение общего числа элементов. Аналитически определить минимально необходимое количество элементов невозможно, т.к. число элементов должно быть целым и функция  $P_F = f(n)$  дискретна.

27. Для повышения надежности системы "2 из 4" добавляем к ней элементы, идентичные по надежности исходным элементам 12 - 15, до тех пор, пока вероятность безотказной работы квазиэлемента F не достигнет заданного значения.

Для расчета воспользуемся комбинаторным методом (см. раздел 3.3):

- добавляем элемент 16, получаем систему "2 из 5":



$$(4.13)$$



$$(4.14)$$

- добавляем элемент 17, получаем систему "2 из 6":



$$(4.15)$$



$$(4.16)$$

- добавляем элемент 18, получаем систему "2 из 7":



$$(4.17)$$



$$(4.18)$$

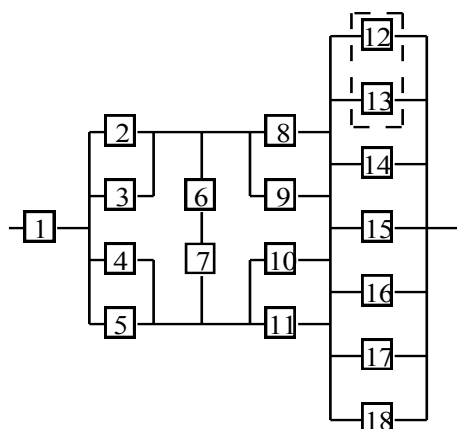


Рис.7.7. Структурная схема системы после структурного резервирования

28. Таким образом, для повышения надежности до требуемого уровня необходимо в исходной схеме (рис. 7.1) систему "2 из 4" достроить элементами 16, 17 и 18 до системы "2 из 7" (рис. 7.7).

29. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы системы "2 из 7"  $F''$  и системы в целом  $P''$  представлены в таблице 7.1.

30. Расчеты показывают, что при  $t=285 \cdot 10^6$  ч  $P''=0,981 > 0,9$ , что соответствует условию задания.

31. На рис. 7.5 нанесены кривые зависимостей вероятности безотказной работы системы после повышения надежности элементов 12 - 15 (кривая  $P'$ ) и после структурного резервирования (кривая  $P''$ ).

Выводы:

1. На рис. 7.5 представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая  $P$ ). Из графика видно, что 50% - наработка исходной системы составляет  $1,9 \cdot 10^6$  часов.

2. Для повышения надежности и увеличения 50% - наработки системы в 1.5 раза (до  $2.85 \cdot 10^6$  часов) предложены два способа:

а) повышение надежности элементов 12, 13, 14 и 15 и уменьшение их отказов с 0.5 до  $0.322 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$  ;

б) нагруженное резервирование основных элементов 12, 13, 14 и 15 идентичными по надежности резервными элементами 16, 17 и 18 (рис. 4.7).

3. Анализ зависимостей вероятности безотказной работы системы от времени (наработки) (рис. 4.5) показывает, что второй способ повышения надежности системы (структурное резервирование) предпочтительнее первого, так как в период наработки до  $2.85 \cdot 10^6$  часов вероятность безотказной работы системы при структурном резервировании (кривая  $P''$  ) выше, чем при увеличении надежности элементов (кривая  $P'$  ).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

ПРИЛОЖЕНИЕ

Биномиальные коэффициенты

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

n	m											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	1											
1	1	1										
2	1	2	1									
3	1	3	3	1								
4	1	4	6	4	1							
5	1	5	10	10	5	1						
6	1	6	15	20	15	6	1					
7	1	7	21	35	35	21	7	1				
8	1	8	28	56	70	56	28	8	1			
9	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1		
10	1	10	45	120	210	252	210	120	45	10	1	
11	1	11	55	165	330	462	462	330	165	55	11	
12	1	12	66	220	495	792	924	792	495	220	66	
13	1	13	78	286	715	1287	1716	1716	1287	715	286	
14	1	14	91	364	1001	2002	3003	3432	3003	2002	1001	
15	1	15	105	455	1365	3003	5005	6435	6435	5005	3003	
16	1	16	120	560	1820	4368	8008	11440	12870	11440	8008	
17	1	17	136	680	2380	6188	12376	19448	24310	24310	19448	
18	1	18	153	816	3060	8568	18564	31824	43758	48620	43758	
19	1	19	171	969	3876	11628	27132	50388	75582	92378	92378	
20	1	20	190	1140	4845	15504	38760	77520	125970	167960	184756	

Примечание: Для  $m > 10$  можно воспользоваться свойством симметрии:

$$C_n^m = C_n^{n-m}$$

