МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания

для выполнения самостоятельной работы

Волгоград

2018

УДК 62-19

Р е ц е н з е н т:
Доцент кафедры «Эксплуатация и технический сервис машин в АПК»
ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, канд. техн. наук
В. А. Моторин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Структурно-логический анализ надежности технических систем: метод. указания для выполнения самостоятельной работы / Сост. А. Е. Новиков, М. И. Филимонов, М. И. Ламскова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – 36 с.

Методические указания к выполнению самостоятельной работы предназначены для бакалавров и магистрантов, обучающихся соответственно по направлениям подготовки 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», профили «Машины и аппараты химических производств» и «Сервис технологического оборудования в нефтегазовом комплексе»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», профиль «Машины и аппараты пищевых производств»; 43.03.01 «Сервис», профиль «Сервис в нефтегазовых комплексах»; 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», программа «Процессы и оборудование химических, нефтехимических и биотехнологических производств» по всем формам и срокам обучения.

В методических указаниях рассматривается методика определения структурной надежности технических систем методами структурно-логического анализа – прямого перебора, комбинаторным, логико-вероятностными, в том числе логических схем и относительно особого элемента.

© Волгоградский государственный
технический университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4

1 Структурно-логический анализ надежности систем 5

2 Структурно-логические схемы надежности систем 7

3 Расчет надежности систем с последовательным соединением элементов 10

4 Расчет надежности систем с параллельным соединением элементов 12

5 Расчет надежности систем методом прямого перебора 13

6 Расчет надежности систем комбинаторным методом 16

7 Расчет надежности систем с использованием логико-вероятностных методов 18

7.1 Метод логических схем 20

7.2 Метод разложения относительно особого элемента 24

8 Задание и порядок выполнения самостоятельной работы 26

Библиографический список 27

Приложения 28

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой любого технического объекта является надежность, под которой понимается способность объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации. Основные понятия в теории надежности устанавливаются ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения». Понятие технического объекта это обобщенный термин, который включает понятия элемент, система, изделие и комплекс.

Под изделием понимается предмет, имеющий конкретную форму и вид, которые получены в процессе его изготовления. Простейшей составной неделимой частью изделия является элемент, который предназначен для выполнения определенных функций. Совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций представляет собой систему, а совокупность совместно взаимодействующих изделий в процессе применения их по назначению представляет собой комплекс.

Основными критериями оценки надежности являются два несовместимых одновременно события – вероятность безотказной работы элемента p или системы P и вероятность отказа элемента q или системы Q за время t.

Вероятность безотказной работы элемента p или системы P за время t – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ элемента или системы не произойдет.

Вероятность отказа работы элемента q или системы Q за время t – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ элемента или системы произойдет.

Таким образом, в теории вероятности, а соответственно и теории надежности, считают, что несовместимые события образуют полную груп-

пу, для которой можно записать основополагающие уравнения:

– для системы: $Q(t)+P(t)=1$;

– для элемента: $q(t)+p(t)=1$.

Для статистической оценки вероятности безотказной работы системы P или ее вероятности отказа Q за время t используют формулы:

$$P(t)=\frac{N_p(t)}{N}=1-\frac{n(t)}{N}; \qquad Q(t)=1-\frac{N_p}{N}=\frac{n(t)}{N},$$

где $N_p(t)$ – количество работоспособных элементов системы к концу времени t испытаний или эксплуатации;

N – общее количество элементов системы, поставленных на испытания или эксплуатацию;

$n(t)$ – количество элементов системы отказавших к концу времени t испытаний или эксплуатации.

Цель самостоятельной работы заключается в ознакомление студентов с основными методами структурно-логического анализа технических систем на надежность.

В соответствии с поставленной целью студент должен уметь анализировать схемы соединения элементов в системы, определять вероятность их безотказной работы, вероятность отказа, прогнозировать состояние системы в зависимости от отказа какого-либо структурного элемента, находить возможности повышения структурной надежности системы.

1 СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Структурно-логический анализ позволяет оценить основные характеристики надежности технического объекта с учетом особенностей его конструкции, характера функционирования и взаимодействия составных частей, их влияния на надежность в целом.

При определении структуры технического объекта целесообразно оценить влияние каждого элемента на работоспособность объекта в целом. По степени влияния элементы можно разделить на четыре группы:

– элементы, отказ которых не влияет на работоспособность объекта (деформация поверхности, изменение окраски поверхности и т.д.);

– элементы, вероятность отказа которых за рассматриваемый промежуток времени не изменяется и близка к нулю (корпусные детали, станины, малонагруженные элементы с большим запасом прочности);

– элементы, ремонт которых возможен в процессе эксплуатации объекта или во время плановых остановок (замена режущего инструмента на станке, регулировка холостого хода карбюратора и т.д.);

– элементы, отказ которых приводит к отказу объекта.

Структурно-логический анализ надежности технических систем выполняется в следующем порядке:

– анализ системы – определяются функции отдельных элементов объекта и их взаимосвязи;

– определяются все возможные отказы системы и ее составных частей, их причины и последствия на работоспособность системы в целом;

– декомпозиция системы на элементы с известными показателями надежности;

– составление топологической модели безотказной работы системы;

– составление расчетных зависимостей для определения вероятности безотказной работы и других показателей надежности системы.

Структурно-логический анализ надежности технических объектов может проводиться на различных этапах их жизненного цикла: при проектировании, изготовлении, испытаниях, монтаже, запуске, эксплуатации и т.д. По результатам расчетов характеристик надежности и их изменения во времени принимаются решения о необходимости повышения надежности,

о возможности постановки объекта на производство или снятия с производства, об установлении графика ППР, о необходимой номенклатуре и количестве запасных частей, узлов и деталей, о возможности дальнейшей эксплуатации, модернизации, о списании и прочих мероприятиях.

2 СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Практически любая техническая система может быть представлена в виде отдельных унифицированных, функционально законченных элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно.

Под последовательным соединением элементов в систему понимают такое соединение, при котором отказ любого элемента влечет за собой отказ всей системы (рис. 1).

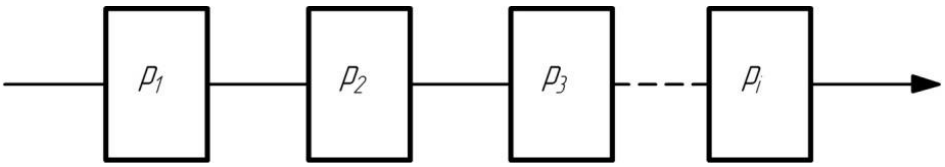


Рис. 1. Схема последовательного соединения элементов в системе

Под параллельным соединением элементов в систему понимают такое соединение, при котором отказ системы произойдет только в случае отказа всех элементов этой системы (рис. 2).

Основным критерием для определения вида соединения элементов является влияние их отказа на работоспособность всей системы. Необходимо учитывать, что структурная схема надежности и конструктивная схема зачастую не согласуются друг с другом. Например, подшипники на валу редуктора работают параллельно друг с другом, однако выход любого из них приводит к отказу системы, соответственно с позиции надежности они образуют последовательное соединение. Другой пример: система, состоящая

из нескольких насосов работающих последовательно, обеспечивает подачу жидкости к объекту, в случае отказа одного из них система также продолжит функционировать, но с меньшим расходом, т.е. с позиции надежности насосы между собой соединены параллельно.

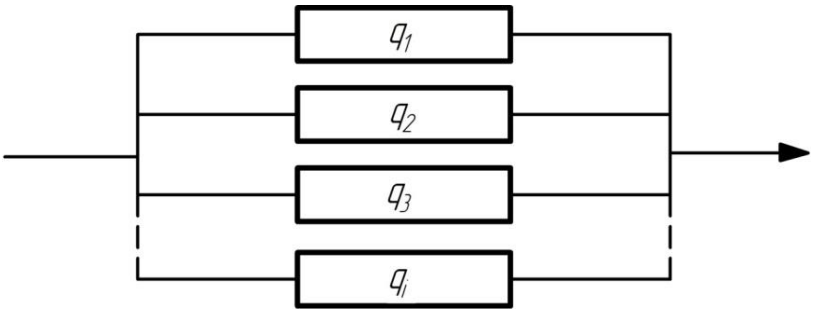


Рис. 2. Схема параллельного соединения элементов в системе

При составлении структурно-логической схемы надежности системы и выборе расчетной модели надежности системы необходимо также учитывать возможные варианты отказов элементов и их влияние на систему в целом. Например, в системах подачи топлива для увеличения пропускной способности и надежности системы используют последовательное или параллельное соединение фильтров (рис. 3).

Отказ фильтра может произойти по двум причинам: засорение фильтрующей перегородки или ее разрыв. В первом случае (при засорении) структурная схема надежности будет соответствовать конструктивной схеме системы. Так, при последовательном соединение фильтров засорение любого из них приведет к отказу всей системы, а при параллельном соединении фильтров – изменяться лишь характеристики системы, но отказ ее не произойдет (рис. 3, *а*). Во втором случае (при разрыве) структурная схема надежности будет обратной конструктивной. Так при параллельном соединении фильтров разрыв перегородки в любом из них приведет к пропуску нефильтрованной жидкости в систему, то есть произойдет отказ системы, а при последовательном соединении система будет менее работоспособной, но при этом отказ ее не произойдет (рис. 3, *б*).

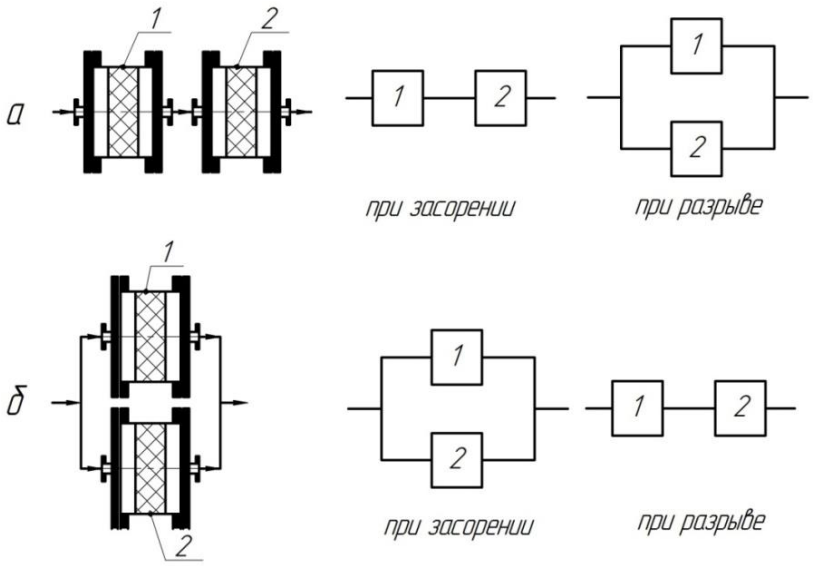


Рис. 3. Конструктивные и структурные схемы соединения фильтров при различных вариантах отказов

Разновидностью систем с параллельным соединением элементов являются мажоритарные системы, которые также называются системами типа «*m* из *n*» или «схемы голосования». Мажоритарные системы широко распространены в электрических и радиосхемах, системах управления, технологических линиях, при структурном резервировании.

Системы типа «*m* из *n*» (рис. 4) функционируют только в том случае, если из *n* элементов системы в работоспособном состоянии находится *m* элементов. Соответственно если происходит отказ *m* элементов или больше, то работоспособность системы нарушается и происходит ее отказ.

В технике также широко распространены мостиковые системы. Эти системы (рис. 5) представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, которые включены между узлами различных параллельных ветвей.

Работоспособность такой системы определяется количеством отказавших элементов и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность системы (рис. 5) будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 2; 4 и 5; 2, 3 и 4; 1, 3 и 5 и т.д. В то же время отказ элементов 1 и 5; 2 и 4; 1, 3 и 4; 2, 3 и 5 к отказу системы не приведет.

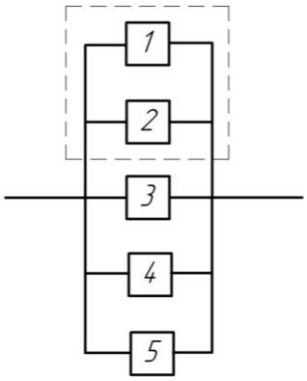


Рис. 4. Мажоритарная система «2 из 5»

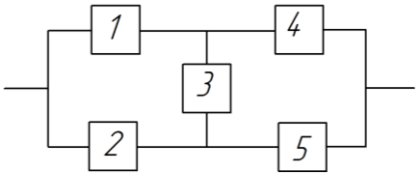


Рис. 5. Мостиковая система из пяти элементов

Примером мостиковой системы является система подачи топлива (рис. 6), которая работает, если исправен хотя бы один из насосов 1 или 2 и срабатывают клапана 3, 4 и 5.

Для расчета мажоритарных и мостиковых систем используются:

– метод прямого перебора (при небольшом количестве элементов);

– комбинаторный метод (метод перечисляющих производящих функций);

– логико-вероятностные методы (метод минимальных путей и метод минимальных сечений);

– метод разложения относительно особого элемента.

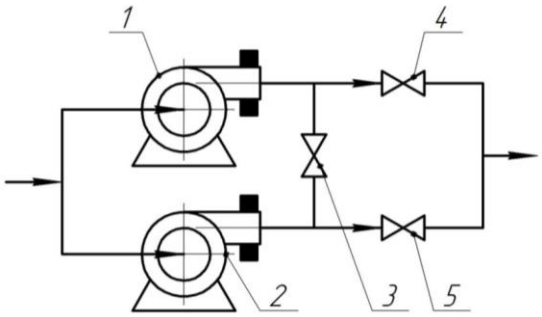


Рис. 6. Мостиковая система подачи топлива

3 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Если p_1, p_2, p_3 … p_i – вероятности безотказной работы элементов, входящих в систему (см. рис. 1), то алгебраическая вероятность безотказной

работы этой системы P за время t может быть подсчитана по теореме умножения вероятностей – вероятность совместного появления произвольного числа независимых событий A_i равна произведению вероятностей P_i этих событий:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \ldots \cdot A_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^{n} A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \ldots \cdot P(A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i),$$

или

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \ldots \cdot p_i = \prod_{i=1}^{n} p_i.$$

Так как вероятность несовместных событий составляют полную группу, то вероятность отказа этой же системы Q за время t будет равна:

$$Q = 1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \ldots \cdot p_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_i.$$

В случае если вместо вероятностей безотказной работы элементов p за время t известны вероятности их отказов q за тоже время t, то выражения можно представить в следующем виде:

$$P = (1-q_1) \cdot (1-q_2) \cdot (1-q_3) \cdot \ldots \cdot (1-q_i) = \prod_{i=1}^{n} (1-q_i);$$

$$Q = 1 - (1-q_1) \cdot (1-q_2) \cdot (1-q_3) \cdot \ldots \cdot (1-q_i) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1-q_i),$$

а в случае если все элементы в системе равнонадежные, то есть обладают одинаковой надежностью $p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_i$ за время t, то получим:

$$P = {p_i}^n = (1-q_i)^n;$$

$$Q = 1 - {p_i}^n = 1 - (1-q_i)^n,$$

где n – количество элементов в системе.

Надежность системы с последовательным соединением элементов ниже надежности самого ненадежного элемента данной системы. Наиболее

простым решением повышения надежности системы является повышение вероятности безотказной работы тех ее элементов, отказы которых приводят к отказу всей системы. Это возможно, например, за счет создания рациональных конструкций элементов, применения стойких к агрессивным средам материалов, совершенствования организации технологических процессов их изготовления, монтажа и прочих мероприятий.

4 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Если q_1, q_2, q_3 … q_i – вероятности отказов элементов, входящих в систему (см. рис. 2), то алгебраическая вероятность отказа этой системы Q за время t может быть также подсчитана по теореме умножения вероятностей как произведение произвольного числа независимых событий:

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot \ldots \cdot q_i(t) = \prod_{i=1}^{n} q_i.$$

Так как вероятность несовместных событий составляют полную группу, то вероятность безотказной работы P этой же системы за время t будет равна:

$$P = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot \ldots \cdot q_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} q_i.$$

В случае если вместо вероятностей отказов элементов q за время t известны вероятности их безотказной работы p за тоже время t, то выражения можно представить в следующем виде:

$$Q = (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \ldots \cdot (1 - p_i) = \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i);$$

$$P = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \ldots \cdot (1 - p_i) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i),$$

а в случае если все элементы в системе равнонадежные, соответственно

обладают одинаковой вероятностью отказа $q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q_i$ за время t, то получим:

$$Q = q_i^{\,n} = (1 - p_i)^n;$$

$$P = 1 - q_i^{\,n} = 1 - (1 - p_i)^n.$$

Надежность системы с параллельным соединением элементов значительно выше надежности отдельного элемента этой системы. Причем надежность системы увеличивается с увеличением числа элементов в этой системе. Это свойство позволяет из малонадежных элементов создать достаточно надежные системы.

5 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПЕРЕБОРА

Метод прямого перебора заключается в рассмотрении всех возможных сочетаний работоспособных и неработоспособных состояний системы. Рассмотрим данный метод на примере мажоритарной системы типа «2 из 5» (см. рис. 4). Для нормального функционирования системы типа «2 из 5» необходимо чтобы в работоспособном состоянии находились не менее двух элементов.

Количество всех возможных состояния системы N определяется по формуле:

$$N = 2^n.$$

Тогда, для системы типа «2 из 5» имеем:

$$N = 2^5 = 32.$$

Далее составляется расчетная таблица (табл. 1), в которой:

– колонка 1 – номер состояния системы;

– колонка 2 – сочетания состояний элементов (работоспособное или неработоспособное) системы;

– колонка 3 – состояние системы;

– колонка 4 – расчетная формула для определения вероятности безотказной работы системы для каждого случая сочетания элементов.

Для обозначения состояний элементов и системы используется двоичная система: 1 – работоспособное состояние, 0 – неработоспособное состояние.

Состояние системы в каждом случае определяется количеством работоспособных или неработоспособных элементов и условием работы. Вероятность любого состояния определяется произведением вероятностей состояний, в которых находятся данные элементы системы.

Например, для состояния системы № 7 элементы 1, 2 и 3 находятся в работоспособном состоянии, а элементы 4 и 5 – в неработоспособном состоянии. Следовательно, условие работы «2 из 5» сохраняется, и система находится в работоспособном состоянии. Вероятность такого состояния будет равна: $P_7 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot (1 - p_4) \cdot (1 - p_5)$, или при условии равнонадежных элементов – $P_7 = p^3 \cdot q^2 = p^3 \cdot (1 - p)^2$.

С учетом всех возможных состояний системы вероятность безотказной работы находится суммированием всех работоспособных сочетаний:

$$P = p^5 + 5 \cdot p^4 \cdot q + 10 \cdot p^3 \cdot q^2 + 10 \cdot p^2 \cdot q^3;$$
$$P = p^5 + 5 \cdot p^4 \cdot (1 - p) + 10 \cdot p^3 \cdot (1 - p)^2 + 10 \cdot p^2 \cdot (1 - p)^3.$$

Если принять вероятность безотказной работы каждого элемента равной 0,9, тогда вероятность безотказной работы всей системы будет равна:

$$P = 0{,}9^5 + 5 \cdot 0{,}9^4 \cdot (1 - 0{,}9) + 10 \cdot 0{,}9^3 \cdot (1 - 0{,}9)^2 + 10 \cdot 0{,}9^2 \cdot (1 - 0{,}9)^3 = 0{,}99954.$$

С учетом того, что работоспособное и неработоспособное состояния образуют полную группу, то вероятность безотказной работы системы можно определить следующим образом:

$$Q = 5 \cdot p \cdot q^4 + q^5 = 5 \cdot p \cdot (1 - p)^4 + (1 - p)^5.$$

Подставив принятое значение p элементов в уравнение отказа системы, получим соответственно вероятность отказа системы:

Таблица 1

Таблица для определения надежности системы типа «2 из 5»
(при условии равнонадежных элементов системы)

№ состояния	Состояние элементов					Состояние системы	Формула системы
	1	2	3	4	5		
1	2					3	4
1	1	1	1	1	1	1	p^5
2	1	1	1	1	0	1	$p^4q^1 = p^4(1-p)$
3	1	1	1	0	1	1	
4	1	1	0	1	1	1	
5	1	0	1	1	1	1	
6	0	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	0	0	1	$p^3q^2 = p^3(1-p)^2$
8	1	1	0	1	0	1	
9	1	0	1	1	0	1	
10	0	1	1	1	0	1	
11	1	1	0	0	1	1	
12	1	0	1	0	1	1	
13	0	1	1	0	1	1	
14	1	0	0	1	1	1	
15	0	1	0	1	1	1	
16	0	0	1	1	1	1	
17	1	1	0	0	0	1	$p^2q^3 = p^2(1-p)^3$
18	1	0	1	0	0	1	
19	0	1	1	0	0	1	
20	1	0	0	0	1	1	
21	0	1	0	0	1	1	
22	0	0	0	1	1	1	
23	1	0	0	1	0	1	
24	0	1	0	1	0	1	
25	0	0	1	0	1	1	
26	0	0	1	1	0	1	
27	1	0	0	0	0	0	$p^1q^4 = p^1(1-p)^4$
28	0	1	0	0	0	0	
29	0	0	1	0	0	0	
30	0	0	0	1	0	0	
31	0	0	0	0	1	0	
32	0	0	0	0	0	0	$q^5 = (1-p)^5$

$$Q = 5 \cdot 0{,}9 \cdot (1 - 0{,}9)^4 + (1 - 0{,}9)^5 = 0{,}00046,$$

или вероятность безотказной работы системы:

$$P = 1 - 0{,}00046 = 0{,}99954.$$

Таким образом, полученные разными способами значения вероятности безотказной работы системы идентичны, однако можно сделать следующий вывод: для упрощения расчетов оценку вероятности безотказной работы системы необходимо проводить по меньшему количеству ее состояний.

6 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ КОМБИНАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Комбинаторный метод основан на законе биномиального распределения:

$$P_m = c_n^m \cdot p^m \cdot (1 - p)^{n-m},$$

где c_n^m – биномиальный коэффициент (количество сочетаний по m из n);

n, m – соответственно количество элементов в системе и элементов находящихся в работоспособном состоянии;

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

Для определения вероятности безотказной работы системы необходимо найти сумму вероятностей, обеспечивающие ее работоспособное состояние:

$$P = P_m + P_{m+1} + ... + P_{n-2} + P_{n-1} + P_n = \sum_{i=m}^{n} P_i.$$

А с учетом закона биномиального распределения последнее выражение для определения надежности системы примет вид:

$$P = c_n^m \cdot p^m \cdot (1 - p)^{n-m} + c_n^{m+1} \cdot p^{m+1} \cdot (1 - p)^{m-m-1} +$$
$$+ ... + c_n^{n-1} \cdot p^{n-1} \cdot (1 - p) + c_n^n \cdot p^n \cdot (1 - p)^0;$$

или

$$P = \sum_{i=m}^{n} c_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}.$$

В качестве примера рассмотрим систему типа «2 из 5» (см рис. 4), которая состоит из равнонадежных элементов с показателем надежности 0,9.

Для того чтобы система типа «2 из 5» находилась в работоспособном состоянии необходимо, чтобы работоспособными оставались как минимум 2 элемента, то есть логически возможно 4-е состояния системы при которых она будет функционировать: при нахождении в работоспособном состоянии 2-х, 3-х, 4-х и 5-и элементов системы.

Тогда формула надежности системы запишется следующим образом:

$$P = c_5^2 \cdot p^2 \cdot (1-p)^{5-2} + c_5^3 \cdot p^3 \cdot (1-p)^{5-3} +$$
$$+ c_5^4 \cdot p^4 \cdot (1-p)^{5-4} + c_5^5 \cdot p^5 \cdot (1-p)^{5-5};$$

Разложив биномиальные коэффициенты и упростив выражение, получим:

$$P = 10 \cdot p^2 \cdot (1-p)^3 + 10 \cdot p^3 \cdot (1-p)^2 + 5 \cdot p^4 \cdot (1-p) + p^5,$$

или с учетом надежности элементов:

$$P = 10 \cdot 0{,}9^2 \cdot (1-0{,}9)^3 + 10 \cdot 0{,}9^3 \cdot (1-0{,}9)^2 +$$
$$+ 5 \cdot 0{,}9^4 \cdot (1-0{,}9) + 0{,}9^5 = 0{,}99954.$$

Аналогичным способом можно определить и вероятность отказа системы. В общем виде формулу для определения вероятности отказа системы можно записать следующим образом:

$$Q = \sum_{i=0}^{m-1} c_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}.$$

Логически система типа «2 из 5» будет неработоспособна в случаях, если откажут все элементы или работоспособным останется один. Тогда формула записи вероятности отказа системы типа «2 из 5» примет вид:

$$Q = c_5^1 \cdot p^1 \cdot (1-p)^{5-1} + c_5^0 \cdot p^0 \cdot (1-p)^{5-0} = 5 \cdot p \cdot (1-p)^4 + (1-p)^5,$$

или с учетом надежности элементов:

$$Q = 5 \cdot 0{,}9 \cdot (1-0{,}9)^4 + (1-0{,}9)^5 = 0{,}00046.$$

7 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ

Расчет структурной надежности технических систем с использованием логико-вероятностных методов основан на теории алгебры логики. Метод применим к системам с различными связями и сочетаниями элементов. Применение этого метода сводится к составлению формулы алгебры логики (ФАЛ), которая определяет условие работоспособности системы. При этом для каждого элемента рассматриваются два противоположных несовместимых события – состояние отказа $\bar{a}_i$ и состояние работоспособности a_i. Функции составляются с использованием знаков операции конъюнкция или логическое умножение (обозначается ∧, читается «и») и дизъюнкция или логическое сложение (обозначается ∨, читается «или»).

Для мостиковой схемы с 5-ю элементами (см. рис. 5) функция работоспособности и неработоспособности запишутся следующим образом:

$$A = a_1 \wedge a_4 \vee a_2 \wedge a_5 \vee a_1 \wedge a_3 \wedge a_5 \vee a_2 \wedge a_3 \wedge a_4 = \\ = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4;$$

$$\overline{A} = \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_2 \vee \bar{a}_4 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_1 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_5 \vee \bar{a}_2 \wedge \bar{a}_3 \wedge \bar{a}_4 = \\ = \bar{a}_1 \bar{a}_2 + \bar{a}_4 \bar{a}_5 + \bar{a}_1 \bar{a}_3 \bar{a}_5 + \bar{a}_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4.$$

Для расчета вероятности безотказной работы необходимо от логических функций посредством теоремы сложения вероятности, как суммы произвольного числа независимых событий A_i:

$$P(A_1 + A_2 + ... + A_n) = P\left(\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right) = 1 - \left[1 - P(A_1)\right] \cdot \left[1 - P(A_2)\right] \times$$
$$\times ... \cdot \left[1 - P(A_n)\right] = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left[1 - P(A_i)\right],$$

и теоремы умножения вероятности, как произведения произвольного числа независимых событий A_i:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot ... \cdot A_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^{n} A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot ... \cdot P(A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i),$$

перейти к вероятностным функциям $P = P(A)$ или $Q = P(\bar{A})$:

$$P = P(A) = 1 - [1 - P(a_1 a_4)] \cdot [1 - P(a_2 a_5)] \cdot [1 - P(a_1 a_3 a_5)] \times$$
$$\times [1 - P(a_2 a_3 a_4)] = 1 - [1 - p(a_1) p(a_4)] \cdot [1 - p(a_2) p(a_4)] \times$$
$$\times [1 - p(a_1) p(a_3) p(a_5)] \cdot [1 - p(a_2) p(a_3) p(a_4)],$$

где $p(a_i) = p_i$, а также учитывая, что в алгебре логики $a_i \cdot a_i = a_i$,

$p(a_i) \cdot p(a_i) = p(a_i \cdot a_i) = p(a_i)$,

то после преобразований получим:

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 -$$
$$- p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

В случае $p_i = p$, то есть равнонадежных элементов системы:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Для получения формулы вероятности отказа аналогичные преобразования проводятся и для функции неработоспособности:

$$Q = P(\bar{A}) = 1 - [1 - P(\bar{a}_1 \bar{a}_2)] \cdot [1 - P(\bar{a}_4 \bar{a}_5)] \cdot [1 - P(\bar{a}_1 \bar{a}_3 \bar{a}_5)] \cdot [1 - P(\bar{a}_2 \bar{a}_3 \bar{a}_4)] =$$
$$= 1 - [1 - p(\bar{a}_1) p(\bar{a}_2)] \cdot [1 - p(\bar{a}_4) p(\bar{a}_5)] \cdot [1 - p(\bar{a}_1) p(\bar{a}_3) p(\bar{a}_5)] \times$$
$$\times [1 - p(\bar{a}_2) p(\bar{a}_3) p(\bar{a}_4)],$$

где $p(\bar{a}_i) = 1 - p(a_i) = 1 - p_i = q_i$ – вероятность отказа i-го элемента, а также учитывая, что в алгебре логики

$p(\bar{a}_i) \cdot p(\bar{a}_i) = p(\bar{a}_i \cdot \bar{a}_i) = p(\bar{a}_i)$,

то после преобразований получим:

$$Q = q_1q_2 + q_4q_5 + q_1q_3q_5 + q_2q_3q_4 - q_1q_2q_3q_4 -$$
$$- q_1q_2q_3q_5 - q_1q_2q_4q_5 - q_1q_3q_4q_5 - q_2q_3q_4q_5 + 2q_1q_2q_3q_4q_5.$$

В случае $q_i = q$, то есть равнонадежных элементов системы:

$$Q = 2q^2 + 2q^3 - 5q^4 + 2q^5.$$

Логико-вероятностный метод используется для расчета вероятности безотказной работы любых структурных схем надежности. Однако получаемая логическая функция работоспособности не всегда соответствует структуре системы, при этом для систем с большим количеством элементов преобразования логических функций становятся очень громоздкими и трудоемкими.

7.1 Метод логических схем

Логические схемы составляются с использованием методов минимальных путей и минимальных сечений на основе структурной схемы системы.

Минимальным путем (кратчайший путь успешного функционирования или минимальное проходное сочетание) называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает ее работоспособность, а отказ любого из них приводит к ее отказу.

Метод минимальных путей дает точное значение только для сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем результат расчета является нижней границей вероятности безотказной работы. Для расчета верхней границы вероятности безотказной работы системы служит метод минимальных сечений.

Минимальным сечением (минимальное сечение отказов или минимальное аварийное сочетание) называется последовательный набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности системы.

Порядок составления логической функции методом минимальных путей и методом минимальных сечений проводится поэтапно.

1. Составляется логическая схема.

Логическая схема минимальных путей системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути параллельно.

Логическая схема минимальных сечений системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно.

2. В соответствии с общими правилами расчета вероятности безотказной работы для логической схемы составляется логическая функция. При этом вместо символов вероятностей безотказной работы элементов p_i и системы P используются символы события – сохранения работоспособности элемента a_i и системы A.

3. Переменные a_i в логической функции рассматриваются как альтернативные (булевы), которые могут принимать только два значения: 0 или 1. Основным свойством булевы a_i является сохранения своего значения при возведении в любую степень k: $a_i^k = a_i$.

4. После преобразования логической функции проводят замены символов событий элементов a_i и системы A соответствующими вероятностями безотказной работы элементов p_i и системы P.

5. По полученному уравнению, подставляя соответствующие количественные значения вероятностей безотказной работы элементов, определяют вероятность безотказной работы системы.

Рассмотрим метод логических схем на примере системы с мостиковой структурой соединения элементов (см. рис. 5).

Для мостиковой системы из пяти элементов имеется 4-е кратчайших последовательных набора работоспособных элементов, которые обеспечи-

вают работоспособность всей системы, то есть 4-е минимальных пути (рис. 5): 1-4, 2-5, 1-3-5, 2-3-4.

Отказ логической схемы состоит в одновременном отказе всех четырех параллельных ветвей, а безотказная работа каждой ветви – в одновременной безотказной работе ее элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому умножению «И», параллельное – логическому сложению «ИЛИ». Итак, логическая схема на рис. 9 соответствует утверждению: система работоспособна, если работоспособны элементы 1 и 4, или 2 и 5, или 1,3 и 5, или 2, 3 и 4.

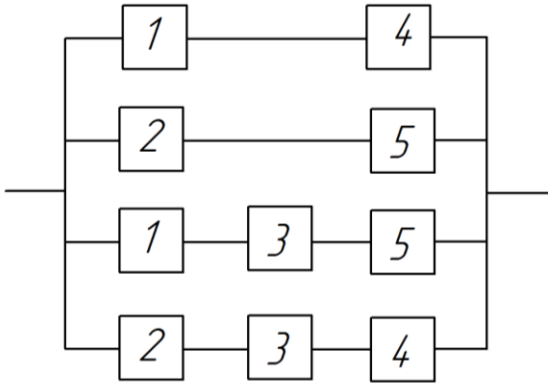


Рис. 9. Логическая схема минимальных путей системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения

Таким образом, логическая функция запишется:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4) \cdot (1 - a_2 a_5) \cdot (1 - a_1 a_3 a_5) \cdot (1 - a_2 a_3 a_4);$$

Проведем соответствующие преобразования:

$$A = 1 - (1 - a_2 a_5 - a_1 a_4 + a_1 a_2 a_4 a_5) \cdot (1 - a_2 a_3 a_4 - a_1 a_3 a_5 + a_1 a_2 a_3^2 a_4 a_5);$$

$$A = 1 - (1 - a_2 a_3 a_4 - a_1 a_3 a_5 + a_1 a_2 a_3^2 a_4 a_5 - a_2 a_5 + a_2^2 a_3 a_4 a_5 +$$

$$+ a_1 a_2 a_3 a_5^2 - a_1 a_2^2 a_3^2 a_4 a_5^2 - a_1 a_4 + a_1 a_2 a_3 a_4^2 + a_1^2 a_3 a_4 a_5 -$$

$$- a_1^2 a_2 a_3^2 a_4^2 a_5 + a_1 a_2 a_4 a_5 - a_1 a_2^2 a_3 a_4^2 a_5 - a_1^2 a_2 a_3 a_4 a_5^2 + a_1^2 a_2^2 a_3^2 a_4^2 a_5^2).$$

Раскроем скобки с учетом свойства булевы $a_i^k = a_i$.

$$A = 1 - 1 + a_2 a_3 a_4 + a_1 a_3 a_5 - a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 + a_2 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 -$$

$$- a_1 a_2 a_3 a_5 + a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 + a_1 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_3 a_4 a_5 +$$

$$+ a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 - a_1 a_2 a_4 a_5 + a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 + a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 - a_1 a_2 a_3 a_4 a_5;$$

$$A = a_1a_4 + a_2a_5 + a_1a_3a_5 + a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_5 - \\ - a_1a_2a_4a_5 - a_1a_3a_4a_5 - a_2a_3a_4a_5 + 2a_1a_2a_3a_4a_5.$$

Проводим замену символов событий a_i и A соответствующими вероятностями безотказной работы элементов p_i и системы P:

$$P = p_1p_4 + p_2p_5 + p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_5 - \\ - p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_2p_3p_4p_5 + 2p_1p_2p_3p_4p_5.$$

Если в системе все элементы равнонадежны, то итоговое выражение вероятности безотказной работы примет вид:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Для той же системы из пяти элементов (см. рис. 5) имеется 4-е минимальных сечения (аварийных сочетаний элементов), которые приводят к отказу системы, при этом восстановление любого из этих элементов приводит к восстановлению работоспособности всей системы (рис. 10): 1-2, 4-5, 1-3-5, 2-3-4.

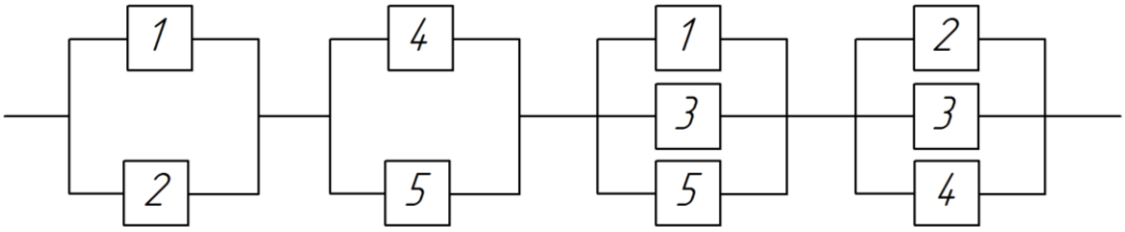


Рис. 10. Логическая схема минимальных сечений системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения

Безотказная работа логической системы (рис. 10) заключается в безотказной работе всех последовательных участков, а отказ каждого из них – в одновременном отказе всех параллельно включенных элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому сложению «ИЛИ», а параллельное – логическому умножению «И».

Итак, схема на рис. 10 соответствует утверждению: система откажет, если откажут элементы 1 и 2, или 4 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4.

Таким образом, логическая функция запишется:

$$A=[1-(1-a_1)\cdot(1-a_2)]\cdot[1-(1-a_4)\cdot(1-a_5)]\times$$
$$\times[1-(1-a_1)\cdot(1-a_3)\cdot(1-a_5)]\cdot[1-(1-a_2)\cdot(1-a_3)\cdot(1-a_4)];$$

Раскрыв скобки и проведя соответствующие преобразования с учетом свойства булевы $a_i^k = a_i$, получим следующую функцию:

$$A = a_1a_4 + a_2a_5 + a_1a_3a_5 + a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_4 - a_1a_2a_3a_5 -$$
$$- a_1a_2a_4a_5 - a_1a_3a_4a_5 - a_2a_3a_4a_5 + 2a_1a_2a_3a_4a_5.$$

Проводим замену символов событий a_i и A соответствующими вероятностями безотказной работы элементов p_i и системы P:

$$P = p_1p_4 + p_2p_5 + p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_5 -$$
$$- p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_2p_3p_4p_5 + 2p_1p_2p_3p_4p_5.$$

Если в системе все элементы равнонадежны, то итоговое выражение вероятности безотказной работы примет вид:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Таким образом, при небольшом количестве элементов в системе верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы одинаковы.

7.2 Метод разложения относительно особого элемента

Для анализа надежности сравнительно простых систем целесообразно использовать метод разложения относительно особого элемента, который основан на теореме о разложении логической функции по любому аргументу:

$$P = p_iP(p_i = 1) + q_iP(p_i = 0),$$

где p_i и q_i – вероятности безотказной работы и отказа i-го элемента;

$P(p_i = 1)$ – вероятность работоспособного состояния системы при условии, что *i* элемент абсолютно надежен;

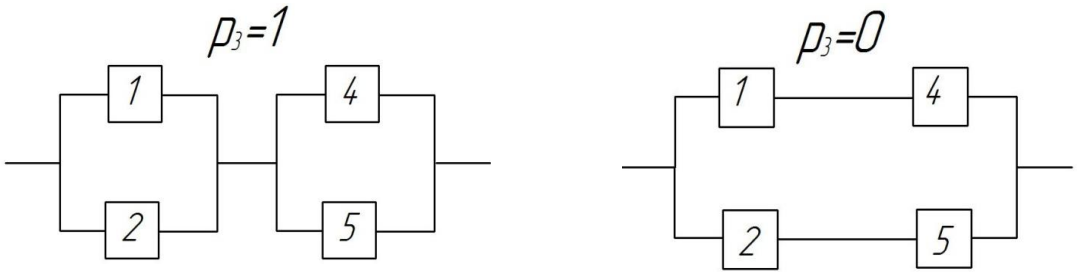
$P(p_i = 0)$ – вероятность работоспособного состояния системы при условии, что *i* элемент отказал.

Рассмотрим данный метод на примере системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения (см. рис. 5).

В качестве особого элемента здесь целесообразно выбрать диагональный элемент 3. Предполагается, что элемент 3 может находиться в двух возможных состояниях – в абсолютно надежном состоянии ($p_3 = 1$) и состоянии отказа ($p_3 = 0$):

$$P = p_3 P(p_3 = 1) + q_3 P(p_3 = 0) = p_3 P(p_3 = 1) + (1 - p_3) P(p_3 = 0).$$

При $p_3 = 1$ надежность системы повысится, тогда логическая схема рассматриваемой системы будет представлять собой параллельно-последовательное соединением элементов (рис. 11, *а*). При $p_3 = 0$ надежность системы уменьшится, и, следовательно, логическая схема будет представлять собой последовательно-параллельным соединением элементов (рис. 11, *б*).



а *б*

Рис. 11. Логические схемы системы из 5-и элементов с мостиковой структурой соединения при ее разложении относительно 3-го элемента

Для полученных логических схем с учетом общих правил теории надежности можно записать следующие уравнения:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4) \cdot (1 - p_5)];$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4) \cdot (1 - p_2 p_5).$$

Таким образом, с учетом полученных уравнений, вероятность безотказной работы системы из 5-и элементов с мостиковой структурой будет равна:

$$P = p_3 \cdot [1-(1-p_1)\cdot(1-p_2)]\cdot[1-(1-p_4)\cdot(1-p_5)]+(1-p_3)\times$$
$$\times[1-(1-p_1p_4)\cdot(1-p_2p_5).$$

Раскрыв скобки и проведя соответствующие преобразования, получим следующее выражение:

$$P = p_1p_4 + p_2p_5 + p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_5 -$$
$$- p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_2p_3p_4p_5 + 2p_1p_2p_3p_4p_5;$$

или в случае равнонадежных элементов:

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

8 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Используя логико-вероятностные методы расчета надежности, необходимо определить вероятность безотказной работы P и вероятность отказа Q системы, в соответствии с вариантом задания (*приложения А и Б*), при условии, что вероятность безотказной работы i-го элемента равна p_i, а вероятность отказа – q_i. На схемах, обведенные пунктиром m элементы являются функционально необходимыми из n параллельных ветвей.

Итоговый отчет студента о проделанной самостоятельной работе в течение учебного семестра представляет собой типовую пояснительную записку, в которой в соответствии с рабочей программой дисциплины оформлены все расчетно-графические задания. Структура пояснительной записки включает титульный лист (пример, *приложение В*) оглавление, выполненные расчетно-графические задания с соответствующими выводами и список использованной литературы.

Пояснительная записка должна быть выполнена в соответствии с общими требованиями и правилами оформления документов (*приложение Г*), а список использованных источников – в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 2011. – 32 с.

2. Дахин, О.Х. Надежность технических систем [Текст]: учеб. пособие / О.Х. Дахин ; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2006. – 159 с.

3. Зубова, А.Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств [Текст] / А.Ф. Зубова. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1978 – 215 с.

4. Надежность технических систем [Текст]: учеб. пособие / Е.В. Сугак, Н.В. Василенко, Г.Г. Назаров [и др.]; под общ. ред. Е.В. Сугак, Н.В. Василенко. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001. – 608 с.

5. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г. Грун [и др.]. – М.: Изд-во «Химия», 1987. – 272 с.

6. Рябинин, И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Изд-во «Радио и связь», 1981. – 264 с.

7. Труханов, В.М. Краткий курс теории и практики надежности сложных систем [Текст]: учеб. пособие / В.М. Труханов; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2008. – 160 с.

8. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем [Текст]: учеб. пособие / И.А. Ушаков. – М.: Изд-во «Дрофа», 2008. – 240 с.

9. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем [Текст]: учеб. / В.Ю. Шишмарев. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 304 с.

10. Шубин, В.С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств [Текст]: учеб. пособие / В.С. Шубин, Ю.А. Рюмин. – М.: Изд-во «Химия», «КолосС», 2006. – 359 с.

Приложение А1

№ варианта	№ схемы	Порядковый номер элемента															Тип соединения элементов в системе	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
		Показатель надежности																
		q	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*q*	*q*	*q*	«*m* из *n*»	«мост»
		Значение показателя надежности															Метод расчета*	
1	1	0,05	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,04	0,04	0,04	*а*	*г*
2	1	0,03	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	*г*	*в*
3	2	0,06	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,93	0,07	0,06	0,06	*б*	*а*
4	2	0,08	0,94	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,06	0,08	0,08	*а*	*г*
5	3	0,03	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,91	0,95	0,91	0,95	0,91	0,94	0,06	0,06	0,06	*б*	*а*
6	3	0,05	0,94	0,94	0,92	0,92	0,85	0,83	0,85	0,83	0,85	0,83	0,94	0,06	0,08	0,08	*а*	*б*
7	4	0,04	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,04	*в*	*б*
8	4	0,05	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,06	0,06	0,05	*б*	*в*
9	5	0,04	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,93	0,07	0,07	0,04	*г*	*а*
10	5	0,03	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,94	0,95	0,05	0,05	0,03	*б*	*в*
11	6	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	*б*	*в*
12	6	0,04	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,04	0,04	0,04	*а*	*г*
13	7	0,03	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94	0,06	0,06	0,06	*б*	*а*
14	7	0,07	0,75	0,75	0,75	0,75	0,97	0,97	0,75	0,75	0,75	0,75	0,95	0,05	0,05	0,05	*г*	*б*
15	8	0,04	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,95	0,05	0,05	0,04	*б*	*в*
16	8	0,03	0,93	0,94	0,93	0,92	0,94	0,92	0,93	0,92	0,93	0,94	0,96	0,04	0,04	0,03	*а*	*б*
17	9	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	*а*	*г*
18	9	0,04	0,94	0,94	0,95	0,94	0,96	0,94	0,95	0,96	0,96	0,95	0,94	0,04	0,04	0,04	*б*	*а*
19	10	0,07	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,92	0,08	0,08	0,08	*б*	*в*
20	10	0,06	0,92	0,92	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,09	0,06	0,06	*а*	*г*
21	11	0,04	0,97	0,94	0,96	0,97	0,94	0,96	0,95	0,94	0,91	0,95	0,94	0,09	0,06	0,04	*б*	*в*
22	11	0,03	0,95	0,93	0,94	0,95	0,92	0,94	0,96	0,93	0,89	0,96	0,92	0,89	0,07	0,03	*а*	*г*
23	12	0,12	0,79	0,79	0,83	0,80	0,83	0,80	0,83	0,88	0,89	0,88	0,89	0,08	0,09	0,07	*а*	*г*
24	12	0,10	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,87	0,91	0,87	0,91	0,06	0,06	0,06	*б*	*в*

*Примечание:
а – прямого перебора; *б* – комбинаторный; *в* – логических схем; *г* – метод относительно особого элемента

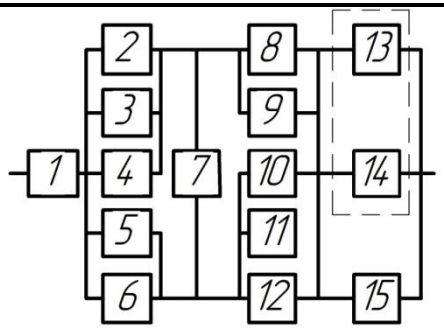
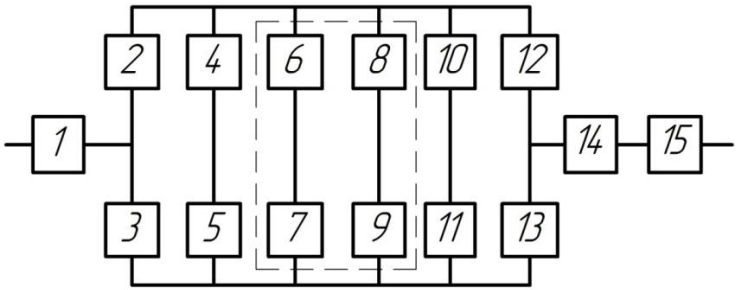
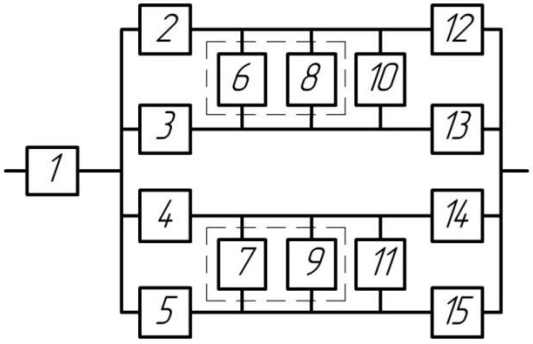
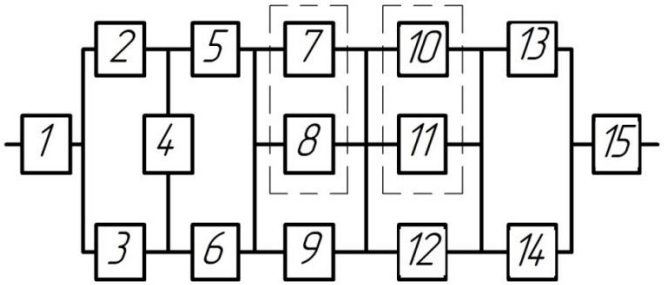
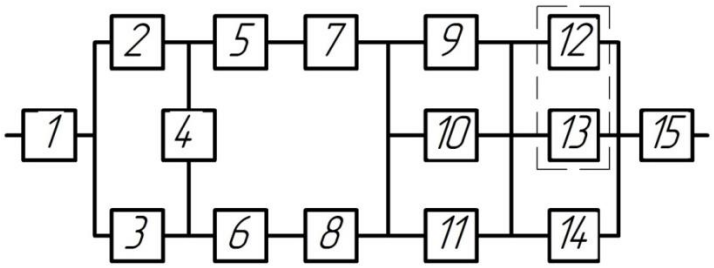
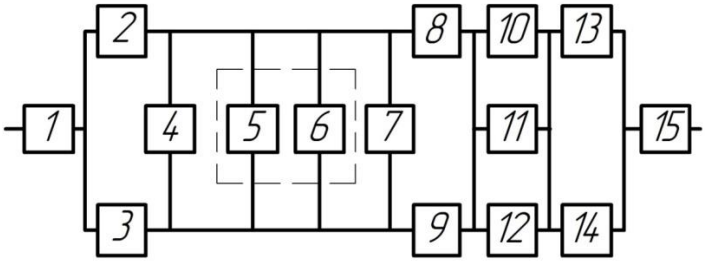
Приложение А2

№ варианта	№ схемы	Порядковый номер элемента															Тип соединения элементов в системе	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
		Показатель надежности																
		q	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*p*	*q*	*q*	*q*	«*m* из *n*»	«мост»
		Значение показателя надежности															Метод расчета*	
25	13	0,05	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,04	0,04	0,04	*а*	*г*
26	13	0,03	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	*г*	*в*
27	14	0,06	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,06	0,06	0,06	*б*	*а*
28	14	0,08	0,94	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,06	0,08	0,08	*а*	*г*
29	15	0,03	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,91	0,95	0,91	0,95	0,91	0,94	0,06	0,06	0,06	*б*	*а*
30	15	0,12	0,94	0,94	0,88	0,94	0,94	0,88	0,85	0,83	0,85	0,83	0,94	0,06	0,08	0,08	*а*	*б*
31	16	0,04	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,07	0,07	0,07	*в*	*б*
32	16	0,07	0,93	0,93	0,93	0,93	0,96	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,06	0,06	0,05	*б*	*в*
33	17	0,04	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,93	0,07	0,07	0,04	*г*	*а*
34	17	0,03	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,94	0,94	0,06	0,05	0,03	*б*	*в*
35	18	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,93	0,93	0,95	0,05	0,05	0,05	*б*	*в*
36	18	0,04	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,04	0,04	0,04	*а*	*г*
37	19	0,08	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,94	0,06	0,06	0,06	*б*	*а*
38	19	0,03	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,93	0,93	0,75	0,75	0,14	0,14	0,14	*г*	*б*
39	20	0,08	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,95	0,05	0,05	0,04	*б*	*в*
40	20	0,03	0,93	0,94	0,93	0,62	0,62	0,62	0,62	0,92	0,93	0,48	0,48	0,52	0,38	0,03	*а*	*б*
41	21	0,05	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,05	0,05	0,05	*а*	*г*
42	21	0,06	0,94	0,94	0,94	0,94	0,96	0,94	0,95	0,96	0,96	0,95	0,94	0,04	0,04	0,04	*б*	*а*
43	22	0,07	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,92	0,08	0,08	0,08	*б*	*в*
44	22	0,06	0,92	0,92	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,09	0,06	0,06	*а*	*г*
45	23	0,04	0,97	0,94	0,96	0,97	0,94	0,94	0,94	0,94	0,91	0,95	0,94	0,09	0,06	0,04	*б*	*в*
46	23	0,03	0,95	0,93	0,94	0,95	0,92	0,94	0,96	0,93	0,89	0,96	0,92	0,89	0,07	0,03	*а*	*г*
47	24	0,12	0,79	0,79	0,83	0,80	0,83	0,80	0,83	0,88	0,89	0,88	0,89	0,08	0,09	0,07	*а*	*г*
48	24	0,10	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,87	0,91	0,87	0,91	0,06	0,06	0,06	*б*	*в*

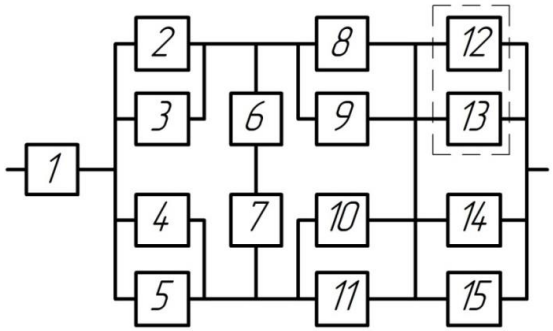
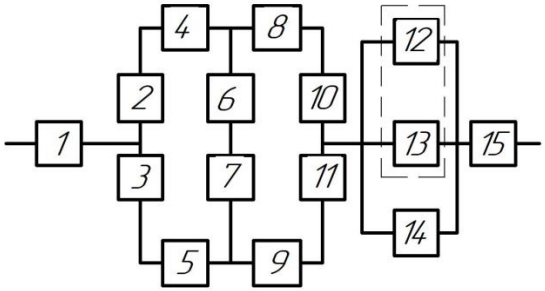
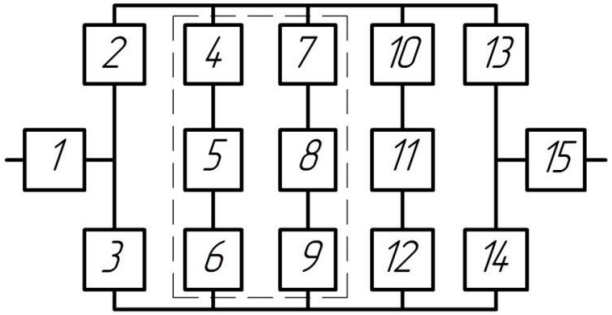
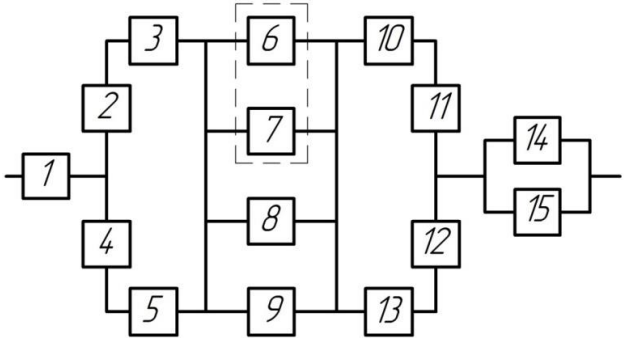
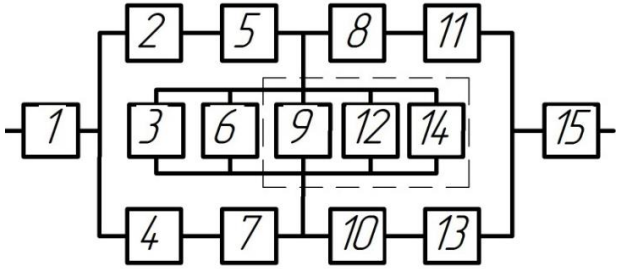
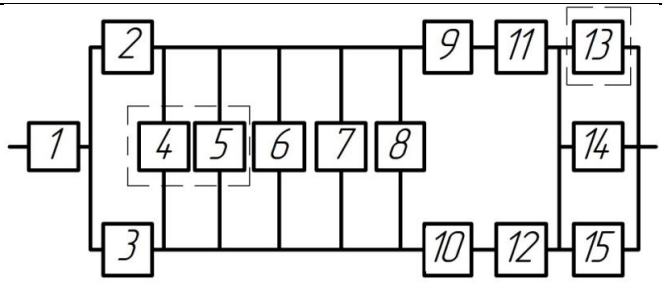
*Примечание:

а – прямого перебора; *б* – комбинаторный; *в* – логических схем; *г* – метод относительно особого элемента

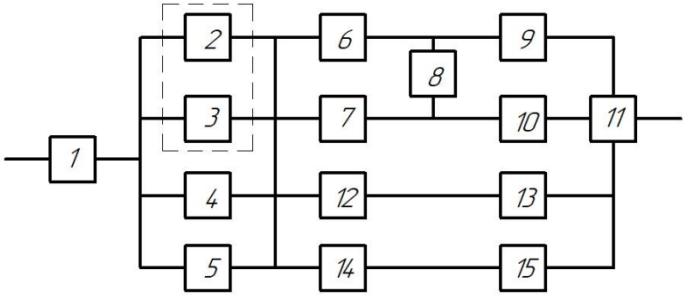
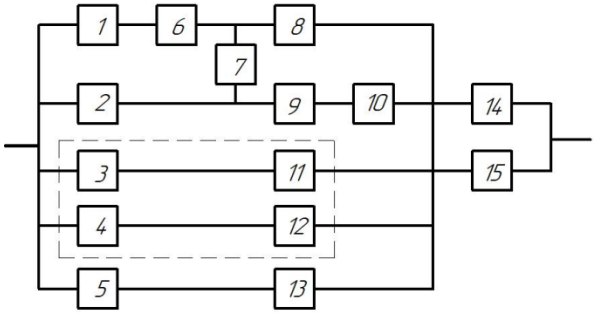
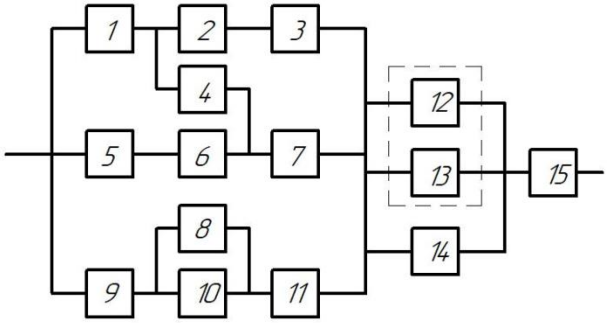
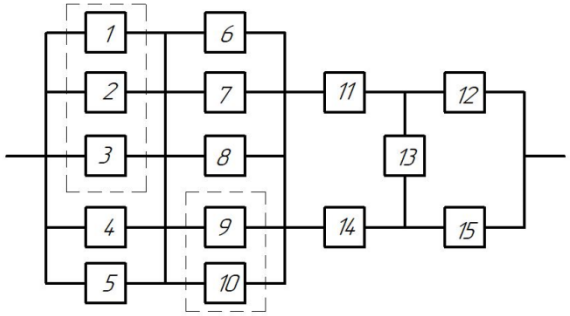
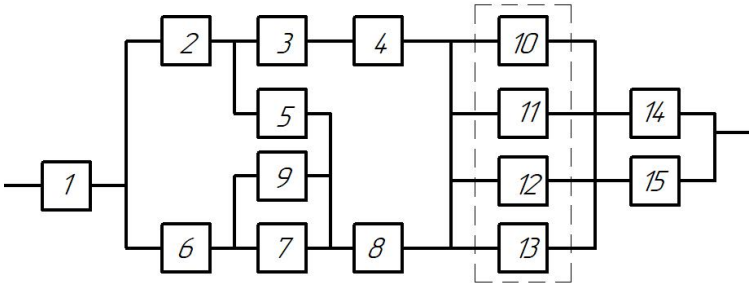
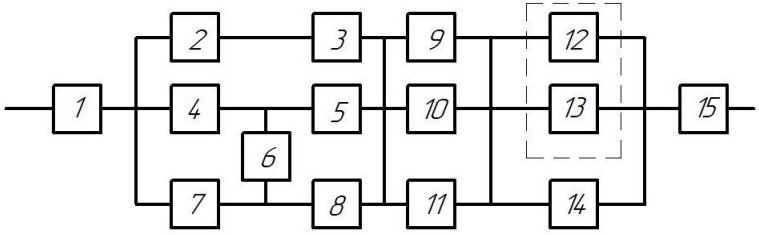
Приложение Б1

№ схемы	Структурная схема	№ схемы	Структурная схема
1		2	
3		4	
5		6	

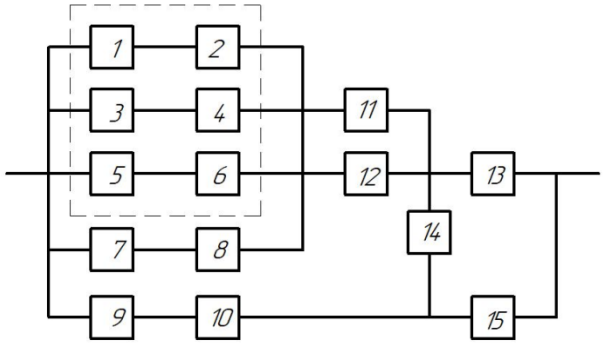
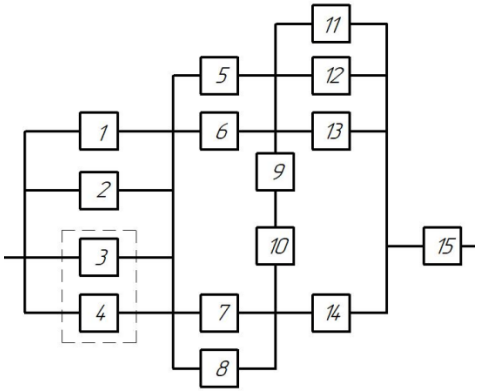
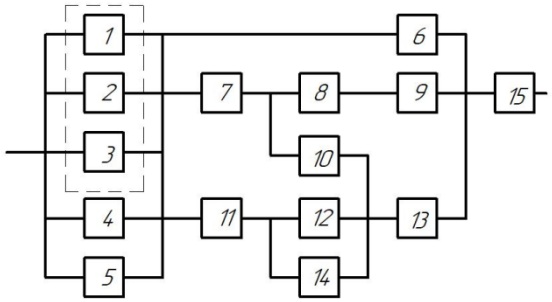
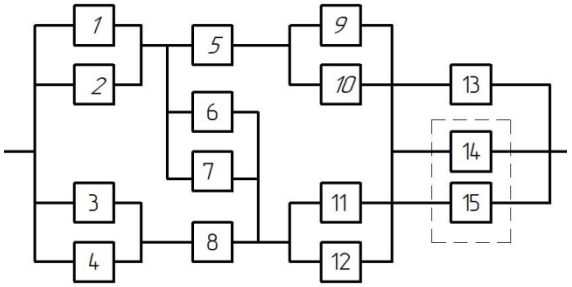
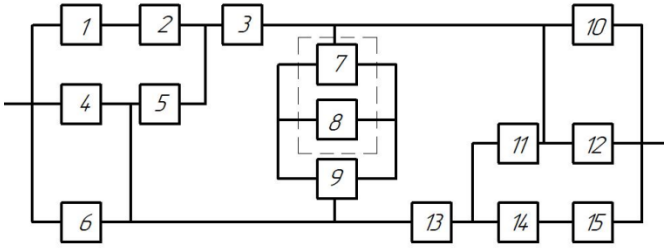
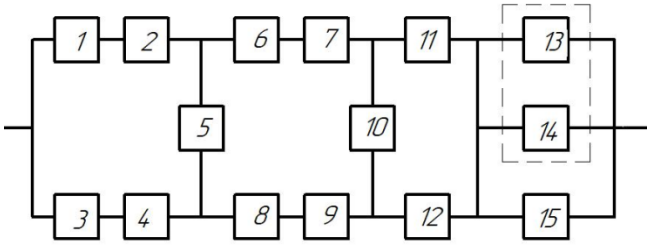
Приложение Б2

№ схемы	Структурная схема	№ схемы	Структурная схема
7		8	
9		10	
11		12	

Приложение Б3

№ схемы	Структурная схема	№ схемы	Структурная схема
13		14	
15		16	
17		18	

Приложение Б4

№ схемы	Структурная схема	№ схемы	Структурная схема
19		20	
21		22	
23		24	

Приложение В

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Факультет Красноармейский механико-металлургический
Кафедра Процессы и аппараты химических и пищевых производств

СЕМЕСТРОВАЯ (КОНТРОЛЬНАЯ) РАБОТА
по дисциплине «Надежность технических систем»

Автор _____ _____ _____
(подпись) (дата подписания) (фамилия, инициалы)

Форма обучения Очно-заочная (Заочная)

Программа обучения Нормативная (Сокращенная)

Группа _____
(шифр группы)

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль подготовки Машины и аппараты химических производств
(код по ОКСО, наименование направления и профиля)

Руководитель работы _____ _____ _____
(оценка и подпись) (дата подписания) (инициалы и фамилия)

Волгоград 20__ г.

Приложение Г

Требования к оформлению пояснительной записки
(извлечение из СТП ВолгГТУ 025-02)

Пояснительная записка выполняется на бумаге формата *А*4. Основной текст – шрифт *Times New Roman*, 14 кегль, полуторный интервал, выравнивание по ширине. Абзацы в тексте начинают с отступом 15 мм. Расстановка переносов – авто. Размер полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 15 мм, нижнее – 20 мм.

Основной текст записки выполняется на листах без рамки, номера страниц проставляются арабскими цифрами в правом нижнем углу без точки. На титульном листе номер страницы не ставится, но включается в общую нумерацию страниц.

Опечатки допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской с нанесением затем исправленного текста.

Каждый раздел начинается с новой страницы с указанием его номера по оглавлению. Номера и заголовки разделов, подразделов нумеруют арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Переносы слов в заголовках, в названиях рисунков и таблиц не допускаются. После заголовка перед текстом оставляют пустую строку.

Формулы и уравнения следует выделять из текста, в отдельную строку и располагать по центру страницы. Нумерация формул по правому краю в круглых скобках (нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте). Формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той же последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должка начинаться со слова «где» без двоеточия. Набирать формулы следует в редакторе формул *Equation* или *MathType*.

Иллюстрации (рисунки, схемы, диаграммы) должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются, или на следующей странице. Располагать рисунки и подписи к ним следует по центру страницы. Рисунки нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. Слово «Рисунок» и название располагают после поясняющих его данных.

Таблицы должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются, или на следующей странице. Таблицы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией или в пределах каждого раздела. В конце заголовков таблиц точки не ставят. Слово «Таблица» пишут слева без абзацного отступа.

При переносе таблицы на новую страницу слева без абзацного отступа пишется «Продолжение таблицы».

Ссылки на использованные источники приводятся по тексту в квадратных скобках, внутри которых ставится номер источника по «Списку использованных источников», приводимого в конце пояснительной записки. Список использованных источников составляют по мере упоминания источников или в алфавитном порядке.

С о с т а в и т е л ь :

Андрей Евгеньевич **Новиков**

Максим Игоревич **Филимонов**

Мария Игоревна **Ламскова**

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания для выполнения самостоятельной работы

Темплан 2018 г. Поз. № ___.
Подписано в печать ____ 2018 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага газетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. ___. Тираж 10 экз. Заказ ___.

Волгоградский государственный технический университет.
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп.