



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Авиационное»

Кафедра «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования»

**Методы оценки эффективности и надежности авиационной
техники**

*Методические рекомендации к
магистрантов очной и заочной формы обучения
направления подготовки*

*25.04.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»
программа «Техническая эксплуатация авиационной техники»*

Ростов-на-Дону
2021

Составитель:

ктн, профессор, Решенкин А.С.

Методические рекомендации составлены с учётом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования подготовки магистров.

Содержание

1	Краткие сведения из теории надёжности	4
2	Общая характеристика метода	7
3	Модель надёжности	8
4	Основные этапы оценки безотказности варианта схемы	10
5	Анализ функциональных связей между элементами (этап 1)	11
6	Построение структурной схемы надёжности системы (этап 2)	12
7	Уравнение надёжности системы (схемы) (этап 3)	15
8	Оценка интенсивности отказов системы через интенсивности отказов элементов	18
	№1. Метод структурных схем	24
	№2. Анализ надёжности системы самолёта на этапе проектирования	32
	Библиографический список	33
	Приложение 1. Принципиальные схемы систем	34
	Приложение 2. Параметры потока отказов элементов систем	44
	Приложение 3. Нарботка на отказ подсистем самолёта	47

1 Краткие сведения из теории надёжности

Уровень безопасности полётов (БП) и эффективность (Э) эксплуатации самолётного парка в значительной мере определяют надёжностью, живучестью и эксплуатационной технологичностью систем и агрегатов самолёта и самолёта в целом как сложной системы.

Под надёжностью технического изделия понимают его свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность является обобщённым свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [1]. Например, для невосстанавливаемых (неремонтируемых) объектов основным свойством может быть безотказность, а для восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов — ремонтпригодность.

Под живучестью [1] понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определённого вида, а также при отказе некоторых компонентов. Например, сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений.

Под эксплуатационной технологичностью понимают приспособленность изделия к выполнению работ по его техническому обслуживанию и ремонту.

В качестве обобщённого показателя надёжности системы или изделия в целом принимают вероятность выполнения поставленных задач в установленные сроки и при соблюдении правил эксплуатации. Очевидно, что реализуемая в конкретном изделии надёжность зависит от концепции и качества разработки, культуры производства и последующей грамотной эксплуатации до некоторого предельного состояния.

Одним из частных показателей надёжности системы или изделия в целом является вероятность безотказной работы в течение заданного срока. Отказ системы — это случайное событие ее перехода из работоспособного в неработоспособное состояние.

Появление в процессе эксплуатации дефектов и отказов систем и агрегатов летательного аппарата (ЛА) и обусловленная этим процессом необходимость выполнения большого объёма работ по их предупреждению, выявлению и устранению приводят к увеличению простоев ЛА и сокращению времени его использования по прямому назначению. С другой стороны, этот же процесс определяет существенную часть затрат на техническое обслуживание парка ЛА. Так, значительная по трудоёмкости часть работы инженерно-технического состава авиапредприятий ГА и частей ВВС приходится на выполнение работ, связанных с проверкой исправности, работоспособности и правильности функционирования тех или иных систем и агрегатов ЛА, а также с выявлением возникающих в них неисправностей. Наибольшая часть времени простоя ЛА приходится на поиск неисправного элемента в отказавшей системе.

То и другое вместе взятое (простои и затраты на техническое обслуживание) и определяет, в основном, экономическую эффективность использования самолётного парка.

В то же время подавляющее большинство случаев лётных происшествий или возникновения предпосылок к ним так или иначе также связано с возникновением отказов систем и агрегатов ЛА, т. е. с их недостаточной надёжностью, живучестью и эксплуатационной технологичностью.

Тесная связь показателей надёжности с эффективностью применения самолётного парка свидетельствует о том, что в общем

случае задача нормирования и обеспечения надёжности не может рассматриваться как самостоятельная. Её решение, точно так же, как решение задач по нормированию и обеспечению других характеристик изделия, должно основываться на исследовании эффективности самолётного парка с применением методов оптимизации.

Такая ситуация требует самого пристального внимания к вопросам обеспечения надёжности систем, агрегатов и ЛА в целом, начиная с самых ранних этапов проектирования. Грубые просчеты в обеспечении надёжности на ранних этапах проектирования явились основной причиной прекращения работ по целому ряду проектов ЛА, а в ряде случаев потребовали внесения радикальных изменений в конструкцию ЛА уже в ходе его серийного производства. Степень и качество проработки вопросов надёжности, живучести и эксплуатационной технологичности на этапе проектирования изделия определяют как сложность, длительность и стоимость его доводки, так и, в значительной мере, эффективность его последующей эксплуатации.

В последние годы проблема обеспечения надёжности технических систем всё более выходит на первый план. Сегодня задача обеспечения надёжности рассматривается как важнейший аспект проектирования, а программа обеспечения надёжности становится органической и существенной частью процессов проектирования, испытаний, доводки, производства и эксплуатации изделия.

Обеспечение надёжности включает:

- 1) выявление всех видов возможных отказов изделия и их возможных последствий;
- 2) установление причин отказов;
- 3) планирование и проведение мероприятий, ограничивающих число отказов до приемлемого уровня.

Основные задачи, решаемые для обеспечения надёжности технической системы на этапе проектирования, можно условно разделить на три группы:

1. Проектирование системы с требуемым уровнем надёжности путем проведения:
 - сравнительных оценок различных способов обеспечения надёжности конкретной схемы;

— сравнительного анализа вариантов схем.

2. Обоснование требований по надёжности (нормирование надёжности) к основным элементам проектируемой системы.

3. Выполнение контрольных расчетов надёжности выбранного варианта схемы системы.

Очевидно, каждая из указанных групп задач предполагает существование определенных подходов и методов анализа надёжности технических систем.

2 Общая характеристика метода

Метод структурных схем предназначен для анализа безотказности относительно простых систем и по своей природе принадлежит к формально-математическим методам анализа схемной надёжности. То есть он не рассматривает и не учитывает физическую природу отказов в системе, а оперирует только статистическими (вероятностными) характеристиками потока отказов (такими, как интенсивность потока отказов, параметр потока отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы и т. п.) Каждый структурный элемент функциональной системы рассматривается здесь как «чёрный ящик», для которого возможны лишь два технических состояния: исправен (работоспособен) или неисправен (неработоспособен), а также известны характеристики индивидуальных потоков отказов элементов.

Таким образом, работа, по существу, ведется со схемой системы и априорными характеристиками надёжности элементов. Такой подход оправдан на ранних стадиях проектирования (когда натурный эксперимент невозможен) для анализа надёжности систем с относительно стабильной элементной базой (дальнейшая отработка отдельных элементов в смысле их надёжности по тем или иным причинам затруднена, а характеристики надёжности элементов известны по результатам массовых испытаний и эксплуатации в составе систем-прототипов). К таким системам относятся пневмо- и гидросистемы на основе унифицированных узлов и агрегатов, топливные системы, электросхемы, радиоэлектрон-

ное оборудование и т. п. В этом случае метод используется как аппарат анализа надёжности в ходе синтеза принципиальной схемы системы (решение вопросов о необходимости дублирования и кратности резервирования элементов) и для сравнительного анализа вариантов принципиальных схем.

В случае использования в системе новых (разрабатываемых параллельно с системой) элементов метод позволяет уточнить или сформулировать вновь технические требования к надёжности (т. е. пронормировать надёжность) этих элементов. Таким образом, рассматриваемый метод может, в принципе, обеспечить решение всех трёх перечисленных групп задач, по крайней мере, на ранних стадиях проектирования.

Ограничения на применение метода вытекают из тех допущений, которые положены в его основу и совокупность которых составляет модель надёжности, рассматриваемую ниже.

3 Модель надёжности

Метод структурных схем базируется на следующих допущениях:

1. ЛА рассматривается как иерархическая система, обладающая конечным числом подсистем, определённой структурой и схемой межсистемных функциональных связей. В качестве подсистем рассматриваются функциональные системы и агрегаты ЛА. Схема межсистемных связей и структура системы заданы однозначно.
2. Каждая система, в свою очередь, рассматривается состоящей из отдельных подсистем и отвечает вышесформулированным требованиям.
3. Для каждого элемента и системы в целом допускаются лишь два возможных технических состояния: работоспособность либо отказ. Всякая возможность частичного функционирования всей системы или её элементов исключается.

4. Предполагается, что все случайные события безотказной работы элементов независимы. То есть отказ одного элемента системы не сказывается на работоспособности (не влечёт отказа) других элементов.
5. Считается, что в каждый момент времени может произойти только один отказ, т. е. вероятность попадания двух или более отказов на один элементарный отрезок времени Δt близка к нулю.
6. Подразумевается, что системы и их элементы перед каждым очередным рабочим циклом (например, полётом) имеют одно и то же стабильно техническое состояние. То есть элементы системы либо не «стареют», либо их свойства полностью восстанавливаются при межполётном обслуживании.
7. Считается, что вероятность отказа любого элемента зависит только от длительности рабочего цикла (например, полёта) и не зависит от его предварительной наработки (например, в предыдущих полётах).
8. Предполагается, что последовательность отказов элементов не влияет на суммарную работоспособность системы (свойство монотонности).
9. Подразумевается, что система состоит (создаётся) преимущественно из «старых» элементов, характеристики безотказности которых известны по опыту их эксплуатации в составе систем-прототипов или по результатам стендовых испытаний.
10. В качестве критерия надёжности системы берётся вероятность $P(\tau)$ безотказной работы за время τ рабочего цикла (например, за время выполнения полётного задания).

Из перечисленных допущений следует, что модель обладает большой широтой, применима к системам различной природы и не требует специальной информации о природе системы и характерах отказов.

Но эти преимущества модели одновременно являются её слабыми местами и накладывают ограничения на её применение.

Действительно, из допущений 1, 2, 3 и 8 следует, что в системе возможно лишь конечное множество технических состояний (булева модель). Очевидно, что допущение может быть справедливым лишь для относительно простых по структуре систем без функциональной избыточности. То есть только для таких систем, где каждый элемент выполняет одну строго определённую функцию и связан с минимальным числом других элементов.

Далеко не всякая система отвечает условию 4. Решая вопрос о применимости метода (модели), необходимо рассмотреть природу, характер и последствия каждого отказа с точки зрения удовлетворения этому допущению, которое одновременно является и основным ограничением на применение метода.

Допущение 7 (марковская модель) также справедливо далеко не для всякой системы и не для всякого периода её эксплуатации. Допущения 4, 5, 6 и 7 в совокупности соответствуют модели простейшего (пуассоновского) потока отказов. Последний же является приемлемой моделью реального потока только на этапе нормальной эксплуатации системы. Как следствие модель (и метод) неприменима для анализа надёжности на этапах приработочных и износовых отказов в системе.

4 Основные этапы оценки безотказности варианта схемы

При использовании метода преследуются следующие цели: получить уравнение надёжности системы (т. е. аналитическую зависимость вероятности безотказной работы $P(\tau)$ системы от показателей безотказности элементов), произвести количественную оценку величины $P(\tau)$ и наметить пути повышения надёжности схемы. При этом в работе можно выделить ряд самостоятельных и относительно независимых этапов:

1. Формирование (или изучение) структуры системы и её основных функций. Определение функций элементов. Уяснение функциональных связей между элементами.

2. Структурный анализ надёжности схемы и построение диаграммы (структурной схемы) безотказной работы.
 3. Вывод уравнения надёжности схемы.
 4. Количественная оценка величины вероятности безотказной работы системы $P(\tau)$.
 5. Выявление слабого в смысле $P(\tau)$ звена схемы.
 6. Внесение изменений в схему с целью повышения $P(\tau)$.
- Ниже рассматриваются методология и содержание работы применительно к каждому из этапов 1–4.

5 Анализ функциональных связей между элементами (этап 1)

Целью данного этапа в анализе надёжности системы является уяснение следующих вопросов:

1. Каково назначение системы и какие конкретно технические задачи она должна решать?
2. Какова структура системы, т. е., из каких элементов она состоит и как эти элементы связаны между собой?
3. Каково назначение каждого элемента?
4. Какого рода отказы возможны в каждом элементе?

То есть на данном этапе уясняются функции системы в целом, роль каждого её элемента в выполнении этих функций, а также характер возможных отказов.

При реальном проектировании новой системы цель эта достигается в ходе проработки структуры системы, т. е. в процессе разработки технического задания на проектирование и разработки её принципиальной, а затем монтажной схемы.

При анализе надёжности заданной схемы, как это имеет место в лабораторных работах, данный этап работы сводится к внимательному изучению схемы и её технического описания. Особое внимание должно быть обращено на природу возможных отказов элементов и соответствие схемы допущению о независимости отказов. Несмотря на кажущуюся простоту, этот этап определяет успех работы в целом.

6 Построение структурной схемы надёжности системы (этап 2)

Структурная схема надёжности, или диаграмма безотказной работы системы — это графическое изображение взаимосвязи событий, состоящих в безотказной работе системы в целом и отдельных её элементов. Диаграмма безотказной работы строится на основе структурного анализа надёжности системы.

Структурный анализ надёжности состоит в выяснении влияния отказов элементов на работоспособность всей системы. На ранних этапах проектирования он основывается на логическом инженерном анализе принципов функционирования системы с учётом функционального назначения элементов и их взаимодействия. То есть в основе такого анализа лежат инженерные представления о работе системы, здравый смысл и поиск ответа на вопрос: «Как поведёт себя система, если отказал элемент i ?».

Цель анализа — ответить на вопрос: «Какие отказы элементов или их комбинации приводят к отказу системы?». Или наоборот: «При каких комбинациях работоспособных элементов сохраняется работоспособность системы?».

Поясним это на упрощённом примере.

Пример. 1 *Провести структурный анализ и построить диаграмму безотказной работы для силовой установки самолёта, состоящей из двух двигателей, с точки зрения надёжности выполнения самолётом боевой задачи.*

Система состоит из двух работающих параллельно элементов (двигателей №1 и №2). Элементы полностью независимы друг от друга, т. е. отказ одного из них не ведёт к отказу другого. Схема позволяет использовать для анализа надёжности метод структурных схем.

С точки зрения успешного выполнения боевой задачи отказ любого из двигателей приводит к её невыполнению. То есть с точки зрения Э отказ любого из двух элементов приводит к отказу системы. И наоборот: система работоспособна с точки зрения Э лишь при безусловной работоспособности обоих элементов.

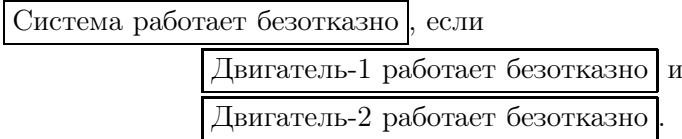
Если обозначить случайное событие безотказной работы системы через C , а случайные события безотказной работы двигателей соответственно через D_1 и D_2 , то условие нормального функционирования системы можно записать в следующем виде:

$$C = D_1 \cap D_2,$$

где C — есть пересечение событий D_1 и D_2 , или в виде диаграммы безотказной работы:

$$\boxed{C} \rangle \rightarrow \boxed{D_1} \rightarrow \boxed{D_2} , \quad (1)$$

читаемой следующим образом:



Таким образом, система, состоящая из независимых элементов, связанных функционально так, что отказ любого из них вызывает отказ всей системы, отображается структурной схемой с последовательным сочетанием событий безотказной работы элементов. В общем случае структурная схема надёжности такой системы имеет вид:

$$\boxed{C} \rangle \rightarrow \boxed{A_1} \rightarrow \boxed{A_2} \rightarrow \dots \rightarrow \boxed{A_n} . \quad (2)$$

Следует обратить внимание на тот факт, что система с физически параллельно работающими элементами отображается в данном случае диаграммой с последовательным сочетанием случайных событий их безотказной работы.

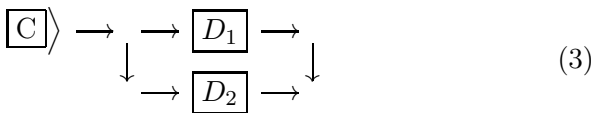
Для одной и той же схемы системы вид диаграммы может быть различным в зависимости от аспекта анализа надёжности, т. е. в зависимости от задачи, которую в данном случае система должна решать.

Поясним это на примере.

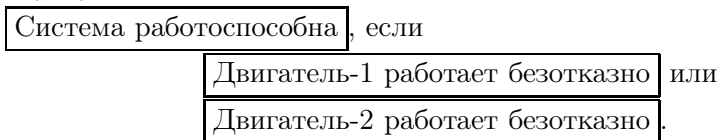
Пример. 2 Провести структурный анализ надёжности и построить диаграмму безотказной работы той же системы, что и в примере 1, с точки зрения обеспечения безопасности полёта.

В случае отказа любого одного из двух двигателей экипаж вынужден прекратить выполнение полётного задания, но имеет возможность вернуться на базу или совершить посадку на запасной аэродром. То есть с точки зрения БП при отказе одного из двух двигателей система в целом остаётся работоспособной. Условием отказа системы с этой точки зрения является одновременный отказ обоих двигателей.

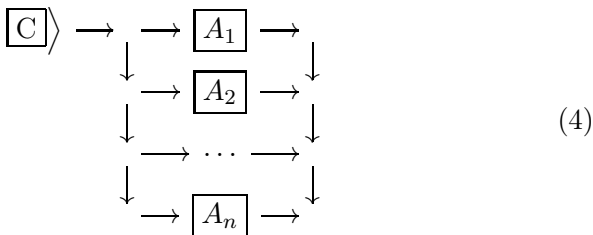
Структурная схема надёжности в этом случае будет иметь вид:



и читаться:

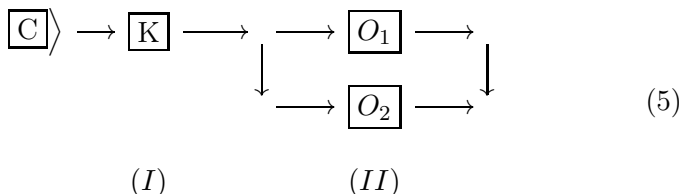


Таким образом, система, состоящая из независимых элементов, связанных функционально так, что изолированный отказ любого из них не вызывает отказа системы, отображается диаграммой безотказной работы с параллельным сочетанием событий безотказной работы элементов. В общем случае структурная схема надёжности такой системы имеет следующий вид:



В самом общем случае структурная схема какой-либо реальной системы может содержать участки как с параллельным, так

и с последовательным сочетанием событий. Например, система пожаротушения, состоящая из командного блока K и двух одинаковых параллельно срабатывающих огнетушителей O_1 и O_2 , каждого из которых заведомо достаточно для ликвидации очага пожара, будет отображаться структурной схемой, приведённой ниже:



В заключение необходимо ещё раз подчеркнуть, что залогом успеха при составлении структурной схемы являются чёткие представления о назначении, структуре и работе системы.

7 Уравнение надёжности системы (схемы) (этап 3)

Уравнением надёжности схемы называется аналитическое выражение вероятности безотказной работы системы через характеристики безотказности её структурных элементов.

Рассмотрим порядок получения уравнения надёжности на уже разработанных примерах 1 и 2.

Предположим, что нам известны вероятности случайных событий безотказной работы двигателей D_1 и D_2 в течение времени выполнения полётного задания. Обозначим эти вероятности через $P(D_1)$ и $P(D_2)$ (в литературе возможны также обозначения $P(D_i)_\tau$, или $P_i(\tau)$, подчёркивающие связь этих вероятностных характеристик с временным интервалом τ), а вероятность безотказной работы системы через $P(C)$ или $P(C)_\tau$, или $P(\tau)$.

Тогда для структурной схемы типа (1) — последовательное сочетание событий, как следует из теории вероятностей:

$$P(C) = P(D_1)P(D_2)$$

или, в общем случае (2) такой схемы:

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (6)$$

Если в такой схеме все элементы одинаковые, т. е.

$$P(A_i) = P(A) = \text{const},$$

то

$$P(C) = [P(A)]^n.$$

Заметим, что поскольку $P(A) < 1$, то при последовательном сочетании событий всегда

$$P(C) < P(A),$$

т. е. нельзя получить систему с надёжностью большей, чем надёжность элемента.

Для структурной схемы типа (3) — параллельное сочетание событий,

$$P(C) = P(D_1) \cup P(D_2)$$

или, в общем случае (4) такой системы:

$$P(C) = \bigcup_{i=1}^n P(A_i). \quad (7)$$

Выражение (7) не всегда удобно для работы. Для его дальнейшего преобразования используем следующий искусственный приём.

Введём в рассмотрение события $\overline{D_1}$ и $\overline{D_2}$ дополнительные (т. е. противоположные, дополняющие до полной группы) к событиям D_1 и D_2 . Очевидно, что события $\overline{D_1}$ и $\overline{D_2}$ состоят в отказе соответственно двигателей 1 и 2.

Тогда

$$\overline{C}(\text{отказ двух двигателей}) = \overline{D_1} \cup \overline{D_2}$$

и

$$P(\overline{C}) = P(\overline{D_1})P(\overline{D_2}). \quad (8)$$

Поскольку для полных групп событий

$$P(\overline{C} + C) = P(\overline{C}) + P(C) = 1$$

и

$$P(\overline{D}_i + D_i) = P(\overline{D}_i) + P(D_i) = 1,$$

то с учетом (8)

$$P(\overline{C}) = P(\overline{D}_1)P(\overline{D}_2) = 1 - P(C) = [1 - P(D_1)][1 - P(D_2)].$$

Отсюда

$$P(C) = 1 - [1 - P(D_1)][1 - P(D_2)]$$

или, в общем случае (4) системы с параллельным сочетанием событий:

$$P(C) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)]. \quad (9)$$

Заметим, что если в такой системе все элементы одинаковы, т. е.

$$P(A_i) = P(A) = \text{const},$$

то

$$P(C) = 1 - [1 - P(A)]^n.$$

Таким образом, параллельное сочетание событий (резервирование элементов) позволяет получить систему с $P(C) > P(A)$, т. е. даёт возможность создать надёжную систему из ненадёжных элементов, что, собственно, часто и является задачей проектирования.

Выражения (6) и (9) дают возможность составить уравнение надёжности в вероятностях для структурной схемы любого вида. Последовательность формирования такого уравнения покажем на примере системы пожаротушения, структурная схема которой рассмотрена выше (5):

$$\boxed{C} \rangle \longrightarrow \boxed{I} \longrightarrow \boxed{II} .$$

Будем рассматривать событие C (система работоспособна), состоящим из последовательного сочетания событий I и II. Событие I

означает работоспособность командного блока К. Сложное событие II означает работоспособность любого из двух или обоих огнетушителей.

Тогда в соответствии с (6)

$$P(C) = \prod_{i=1}^2 P(A_i) = P(I)P(II).$$

Из (9) и учитывая, что $P(O_1) = P(O_2) = P(O)$,

$$P(II) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P(O_i)] = 1 - [1 - P(O)]^2.$$

Окончательно

$$P(C) = P(K)\{1 - [1 - P(O)]^2\}.$$

Очевидно, с помощью аналогичных рассуждений можно записать $P(C)$ для сколь угодно сложной структурной схемы.

8 Оценка интенсивности отказов системы через интенсивности отказов элементов

Однако использование выражений (6) и (9) для практических расчётов надёжности обычно затруднено следующим обстоятельством. В практике испытаний и эксплуатации элементов в качестве характеристик их безотказности используются не вероятности $P(A_i)$, а интенсивность потока отказов элементов $\lambda_i(t)$ или параметр потока отказов $\omega_i(t)$.

Физический смысл этих характеристик безотказности проще всего понять из рассмотрения их статистических аналогов $\lambda^*(t)$ и $\omega^*(t)$, наиболее просто определяемых из опыта.

Интенсивность распределения вероятностей отказов (интенсивность потока отказов) $\lambda(t)$ определяется выражением:

$$\lambda(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lambda^*(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\Delta n_i}{(N - n_i)\Delta t_i}.$$

Здесь N — общее число испытываемых или эксплуатирующихся элементов; Δt_i — интервал времени, для которого оценивается безотказность элементов; n_i — число элементов, отказавших к моменту времени t_i начала интервала Δt_i ; Δn_i — число элементов, отказавших на интервале Δt_i .

При ограниченном объеме испытаний обычно считают

$$\lambda(t) \approx \lambda^*(t).$$

Таким образом, $\lambda^*(t)$ есть частота отказов элементов (отношение числа отказавших элементов к числу поставленных на испытания) в единицу времени на временном интервале Δt_i . Очевидно, использование $\lambda(t)$ в качестве характеристики безотказности элементов особенно удобно при проведении стендовых испытаний, когда отказавшие элементы не восстанавливаются (не ремонтируются и не заменяются), а просто выбывают из испытаний.

В процессе эксплуатации ЛА, когда отказавшие элементы ремонтируются (восстанавливаемый объект), наработки элементов к данному конкретному моменту времени t_i могут существенно различаться (ситуация равносильна испытаниям, в которых элементы начали работать в разное время). В этом случае использование (определение) $\lambda(t)$ в качестве характеристики безотказности затруднено и используется другая характеристика: параметр потока отказов $\omega(t)$, определяемый выражением

$$\omega(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \omega^*(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{\sum_{i=1}^N t_i}. \quad (10)$$

Здесь N — общее число однотипных элементов, находившихся в эксплуатации (стоящих на самолётах и стоявших ранее, но снятых вследствие их отказов); n — число элементов из N , отказавших к рассматриваемому моменту времени; t_i — наработка (налёт) элемента к рассматриваемому моменту времени.

Таким образом, $\omega^*(t)$ есть число отказов, приходящееся на единицу времени наработки всего парка элементов. При большом числе эксплуатирующихся элементов обычно считают

$$\omega(t) \approx \omega^*(t).$$

Легко показать, что $\lambda(t)$ и $\omega(t)$ — часто довольно близкие по смыслу и величине характеристики потока отказов. Для этого перепишем выражение (10) в следующем виде:

$$\omega^*(t) = \frac{n}{\sum_{i=1}^N t_i} = \frac{n}{N t_{cp}}.$$

Здесь n — число отказавших элементов; t_{cp} — средний налёт элементов с начала эксплуатации парка.

В то же время, если определять $\lambda^*(t)$ на временном интервале $(0, t_i)$, т. е. за всё время проведения испытаний, то получим при $\Delta n_i = n$, $n_i = 0$ и $\Delta t_i = t_i$

$$\lambda^*(t) = \frac{n}{N t_{cp}}.$$

То есть $\omega^*(t) = \lambda^*(t_{cp})$.

Для элементов со слабо меняющейся функцией $\lambda(t)$, а именно такой характер зависимости имеет место для большинства элементов в период нормальной эксплуатации,

$$\lambda^*(t) \approx \lambda^*(t_{cp}) \approx \text{const.}$$

Тогда можно считать, что

$$\omega(t) \equiv \lambda(t). \quad (11)$$

Это обстоятельство даёт возможность при анализе надёжности использовать $\lambda(t)$ и $\omega(t)$ как равнозначные характеристики, не делая между ними различия.

Заметим также, что параметры $\lambda(t)$ и $\omega(t)$, как и $P(t)$, являются точечными характеристиками надёжности элемента, т. е. характеризуют его безотказность в данный момент времени.

С учетом сказанного целесообразно вместо выражений (6) и (9) получить для обоих вариантов соединения элементов прямые выражения $P(C)$ через $\lambda_i(t)$ или $\omega_i(t)$.

В общем случае (т. е. независимо от реального вида закона функции распределения вероятности безотказной работы во времени) для невозстанавливаемого элемента теория надёжности [2,

с. 40] даёт следующую зависимость между вероятностью его безотказной работы $P(\tau)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$:

$$P(\tau) = e^{-\int_0^\tau \lambda(t)dt}. \quad (12)$$

Выражение (12) часто называют основной формулой теории надёжности.

Считая время τ (полёта) малым по сравнению с общим временем службы (суммарным налётом) t элемента, а зависимость $\lambda = \lambda(t)$ на отрезке τ пологой и близкой к линейной¹, заменим в (12) $\lambda(t)$ на $\lambda = \lambda_{cp} = \text{const}$. Тогда

$$P(\tau) = e^{-\lambda_{cp}\tau},$$

что совпадает с формой записи вероятности безотказной работы при экспоненциальном законе её распределения

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}. \quad (13)$$

То есть допущения о малости τ и $\lambda = \text{const}$ равносильны принятию для элемента экспоненциального закона распределения

$$P(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Физически это допущение означает, что $P(\tau)$ зависит только от длительности рабочего цикла τ и не зависит от предварительной наработки t . Последнее соответствует ранее сформулированной модели надёжности. Раскладывая выражение (13) в ряд Тэйлора, имеем

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau} = 1 - \lambda\tau + \frac{1}{2}(\lambda\tau)^2 - \dots,$$

или, с учетом малости величин λ и τ ,

$$P(\tau) \approx 1 - \lambda\tau. \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) дают возможность непосредственного вычисления $P_i(\tau)$ через интенсивности отказов элементов $\lambda_i(t)$ или,

¹То есть, рассматривая период нормальной эксплуатации элемента.

с учетом (11), — через величины параметров потоков отказов элементов $\omega_i(t)$.

Если теперь подставить выражения (13) и (14) в ранее полученные формулы для безотказности (6) и (9), то мы получаем возможность записать уравнение надёжности непосредственно в интенсивностях отказов элементов.

Для системы типа (2) — последовательное сочетание событий в структурной схеме — получим:

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P(A_i) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i \tau} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \tau} = e^{-\lambda_{\Sigma} \tau} \approx -\lambda_{\Sigma} \tau + 1,$$

т. е.

$$P(C) = 1 - \lambda_{\Sigma} \tau = 1 - \tau \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (15)$$

Для системы типа (4) — параллельное сочетание событий в структурной схеме — получим:

$$P(C) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i \tau}] = 1 - \prod_{i=1}^n \lambda_i \tau$$

или, окончательно,

$$P(C) = 1 - \tau \tau^{(n-1)} \prod_{i=1}^n \lambda_i. \quad (16)$$

Для дальнейших рассуждений воспользуемся доказываемой в теории надёжности теоремой Чертинцева, которая гласит: *если вероятности отказов достаточно большого числа функциональных элементов, составляющих систему, для малого времени τ изменяются линейно², то вероятность безотказной работы всей системы подчинена экспоненциальному закону.* То есть

$$P(C) = e^{-\tau \lambda_C} \approx 1 - \tau \lambda_C, \quad (17)$$

где λ_C — интенсивность потока отказов системы в целом.

²А такое допущение приемлемо для малого τ при любом законе распределения вероятностей безотказной работы элементов.

Сопоставление выражений (15) и (16) с выражением (17) дает следующее: для структурной схемы типа (2) — последовательное сочетание событий:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (18)$$

для структурной схемы типа (4) — параллельное сочетание событий:

$$\lambda_C = \tau^{(n-1)} \prod_{i=1}^n \lambda_i. \quad (19)$$

Формулы (17) и (18) являются основными рабочими формулами, т. к. дают возможность сформировать уравнение надёжности схемы непосредственно в интенсивностях отказов элементов.

Так, для ранее рассмотренной структурной схемы пожаротушения (5) уравнение надёжности при прежней логике рассуждений (выделение событий I и II) будет получено следующим образом:

для первого события $\lambda_I = \lambda_K$;

для второго события в соответствии с (19) $\lambda_{II} = \tau \lambda_O^2$;

для системы в целом (последовательное сочетание событий I и II) в соответствии с (18)

$$\lambda_C = \lambda_I + \lambda_{II} = \lambda_K + \tau \lambda_O^2,$$

уравнение надёжности системы в соответствии с (17)

$$P(C) = 1 - \lambda_C \tau = 1 - \tau(\lambda_K + \tau \lambda_O^2) = 1 - \tau \lambda_K - (\tau \lambda_O)^2.$$

Пользуясь той же логикой, очевидно, можно сформировать уравнение надёжности для структурной схемы произвольного вида.

Выполнение следующего этапа, т. е. количественная оценка величины $P_C(\tau)$, очевидно, не представляет принципиальной трудности.

Величина наработки системы на отказ в соответствии с (10) и (11) определяется очевидным соотношением:

$$T_{ОТК}(C) = \frac{1}{\lambda_C}.$$

№1

Метод структурных схем

Цель работы: ознакомление с одним из простейших методов анализа надёжности систем — методом структурных схем — и отработка навыков его применения при проектировании.

Задачи работы:

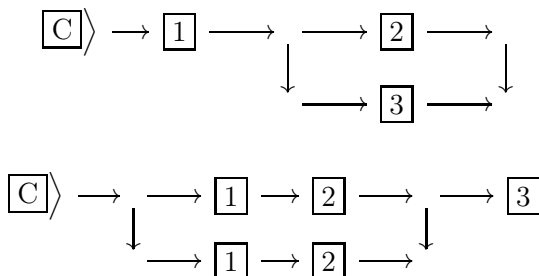
1. Уяснить структуру и характер допущений, положенных в основу метода структурных схем, основные ограничения на применение метода, последовательность и содержание основных этапов оценки безотказности системы по данному методу.
2. Ответить на контрольные вопросы.
3. Выполнить расчет безотказности и наработки на отказ заданного варианта структурной схемы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные группы задач решаются в процессе анализа и отработки надёжности систем и агрегатов ЛА в процессе проектирования?
2. Учитывает ли метод структурных схем природу и характер отказов элементов?
3. Каков физический смысл допущения о независимости отказов элементов в системе?
4. Учитывают ли модель надёжности и метод структурных схем вероятность одновременного отказа двух и более элементов?
5. Можно ли, в принципе, использовать метод для анализа надёжности статически неопределимой силовой конструкции?
6. В каких случаях характер отказа элемента влияет на возможность применения метода? Привести пример.

7. Можно ли использовать метод для анализа надёжности системы на этапе появления в ней износных отказов, т.е. на этапе её «старения»? Да? Нет? Почему?

8. Прочитайте следующие структурные схемы надёжности систем:



9. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = P(A_1)P(A_2)P(A_3)?$$

10. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3)?$$

11. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = 1 - [1 - P(A_1)][1 - P(A_2)][1 - P(A_3)]?$$

12. Каков статистический аналог показателя $\lambda(t)$?

13. Каков статистический аналог показателя $\omega(t)$?

14. Почему при анализе надёжности часто не делают разницу между характеристиками $\lambda(t)$ и $\omega(t)$?

15. Какой структурной схеме соответствует запись

$$P(C) = 1 - \tau\tau^2(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)?$$

16. Какой структурной схеме соответствует запись

$$\lambda_C = \lambda_1 + \lambda_2 + \tau^2 \lambda_3^3?$$

17. Каким образом связаны между собой параметр потока отказов системы ω_C и величина её наработки на отказ $T_{OTK}(C)$?

Задание

1. Составить уравнение надёжности, оценить величины вероятности безотказной работы $P_\tau(C)$ и наработки на отказ $T_{OTK}(C)$ для заданного варианта структурной схемы при длительности рабочего цикла:

$\tau = 1$ ч (варианты 1–6),

$\tau = 2$ ч (варианты 7–14),

$\tau = 3$ ч (варианты 15–22).

Интенсивности отказов элементов приведены в таблице.

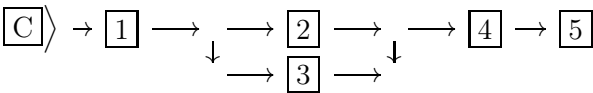
№ элемента	$\lambda_i(t), \text{ч}^{-1}$
1	0,04
2	0,05
3	0,06
4	0,07
5	0,08
6	0,09

2. Письменно ответить на следующие вопросы:

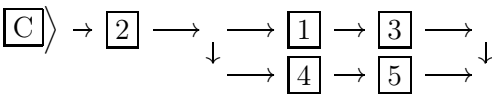
- Можно ли повысить наработку системы на отказ вдвое за счёт повышения надёжности элемента номер 1? Если можно, то какой при этом станет безотказность системы?
- Какой (в пределе) безотказности системы можно добиться таким путём, если возможности совершенствования элемента номер 1 не ограничены?

Варианты структурных схем

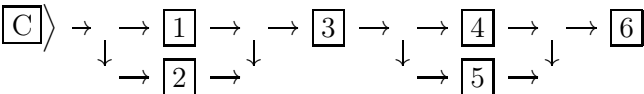
Вариант 1



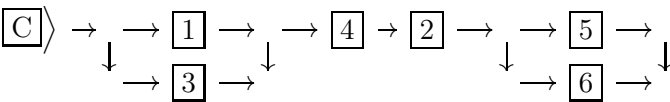
Вариант 2



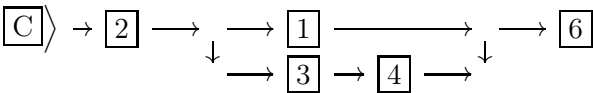
Вариант 3



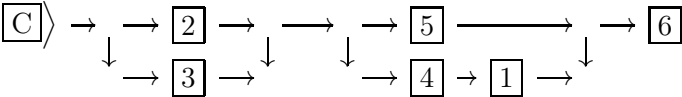
Вариант 4



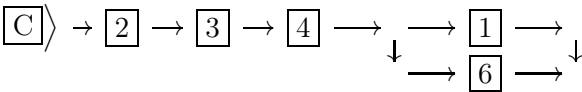
Вариант 5



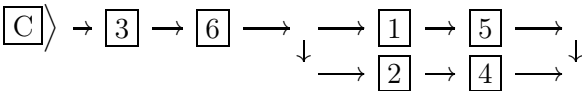
Вариант 6



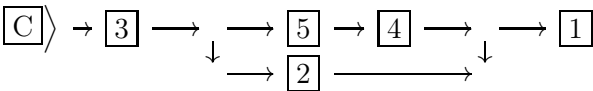
Вариант 7



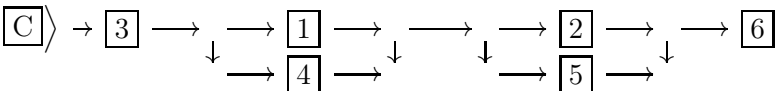
Вариант 8



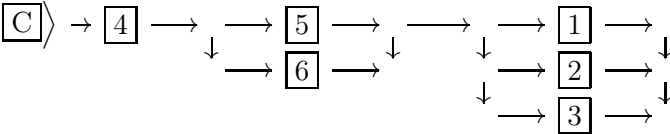
Вариант 9



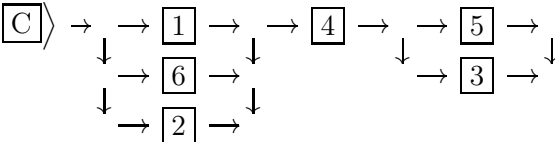
Вариант 10



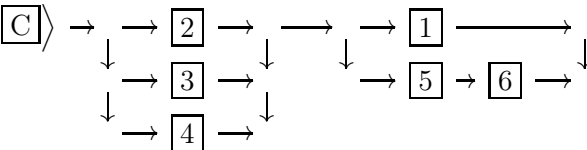
Вариант 11



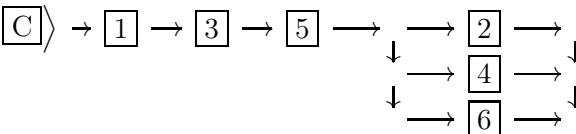
Вариант 12



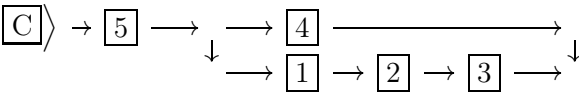
Вариант 13



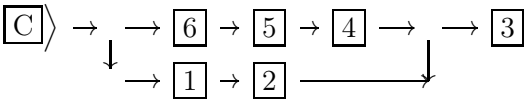
Вариант 14



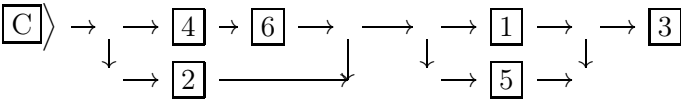
Вариант 15



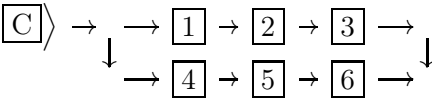
Вариант 16



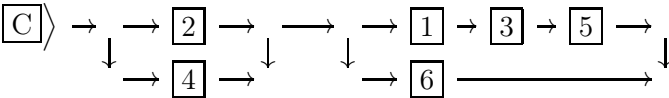
Вариант 17



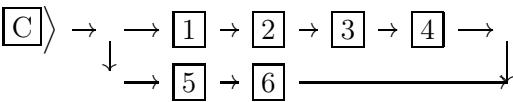
Вариант 18



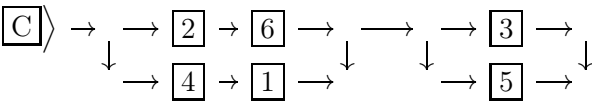
Вариант 19



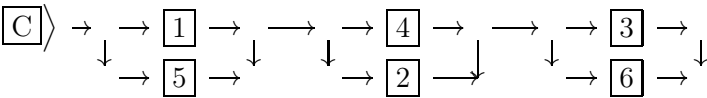
Вариант 20



Вариант 21



Вариант 22



№2

Анализ надёжности системы самолёта на этапе проектирования

Цель работы: приобретение студентами практических навыков анализа надёжности систем самолёта на этапе его проектирования.

Задачи работы:

1. Исследование принципиальной схемы.
2. Составление структурных схем системы и расчёт показателей надёжности.
3. Оценка результатов анализа и усовершенствование принципиальной схемы системы.

Исследование принципиальной схемы. По полученной в задании принципиальной схеме устройства или системы (см. рис. 1–15 в Прил. 1 [3]) и времени полёта студент самостоятельно определяет тип самолёта (если он не определен в задании), основные условия его эксплуатации, решаемые им задачи и анализирует влияние различных типов отказов данной системы в целом на результаты полёта (катастрофа, потеря самолёта, авария, невыполнение задания, вынужденная посадка и т.д.).

Далее проводится анализ возможных отказов каждого элемента системы (обрыв, заклинивание, короткое замыкание и т.д.), их влияние на работоспособность системы и исход полёта. Результаты исследований сводятся в таблицу и обсуждаются с преподавателем.

Составление структурных схем системы и расчёт показателей надёжности. Поскольку одним из условий возможности применения метода структурных схем является наличие у элементов только одного вида отказа, из результатов анализа на первом этапе студент выбирает две комбинации отказов, приводящих к двум наиболее тяжёлым последствиям, и составляет соответствующие структурные схемы.

После проверки структурных схем преподавателем студент проводит расчёт показателей надёжности: вероятности безотказной работы системы за время полёта и наработки на отказ.

Возникновение различного вида отказов каждого элемента принимаем равновероятным в соответствии с таблицей в Прил. 2.

Оценка результатов анализа и усовершенствование принципиальной схемы системы. Как заниженные, так и завышенные показатели надёжности по сравнению с заданными говорят о неоптимальности имеющейся системы. Изменяя степень резервирования или количество элементов в схеме и просчитывая показатели надёжности по изменённой структурной схеме, студент должен добиться соответствия расчётных показателей надёжности системы заданным показателям. Окончательный вариант сдаётся на проверку преподавателю.

Исходным документом при оценке результатов анализа являются «Авиационные правила» [4]. В первом приближении можно воспользоваться условным разбиением самолёта на подсистемы и статистическими данными по наработке на отказ по таблице в Прил. 3. Для случаев аварии (потери самолета) и катастрофы наработка на отказ увеличивается на два и три порядка соответственно.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. с 01.07.90.
2. *Анцилович Л. Л.* Надёжность, безопасность и живучесть самолёта: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Самолётостроение». — М.: Машиностроение, 1985. — 296 с.
3. Лабораторные работы по курсу «Надёжность, живучесть и эксплуатация самолётов»/ сост. *Л. Л. Анцилович, Ю. Н. Егоров, А. И. Ендогур, В. А. Маслов.* — М.: МАИ, 1984 — 37 с.
4. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории/ гл. ред. *Л. М. Берестов*, отв. ред. *А. Н. Степаненко.* — Жуковский: Лётно-исследовательский институт им. М. М. Громова, 1994. — 322 с.

Приложение 1. Принципиальные схемы систем

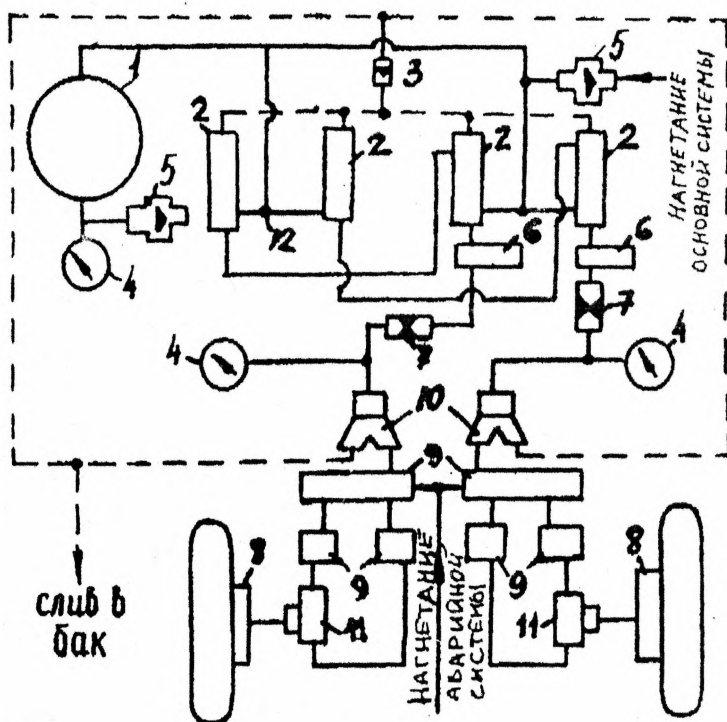


Рис. 1. Схема гидравлической системы торможения колес:

- 1 — гидроаккумулятор; 2 — редукционный клапан; 3 — обратный клапан; 4 — манометр; 5 — зарядный штуцер; 6 — выключатель гидравлический; 7 — дроссель; 8 — тормозная камера; 9 — гидрошарниры; 10 — электрогидравлический кран; 11 — челночный клапан; 12 — соединение трубопроводов

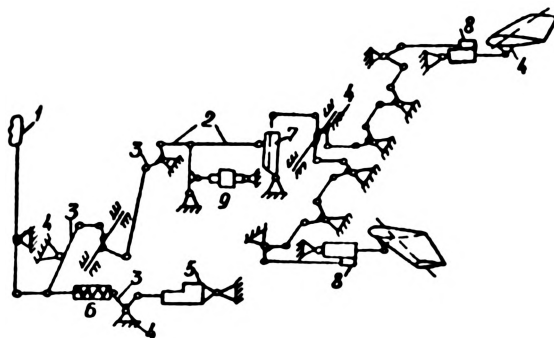


Рис. 2. Схема канала тангажа системы управления: 1 — ручка управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — АРУ; 8 — бустер; 9 — рулевая машина автопилота

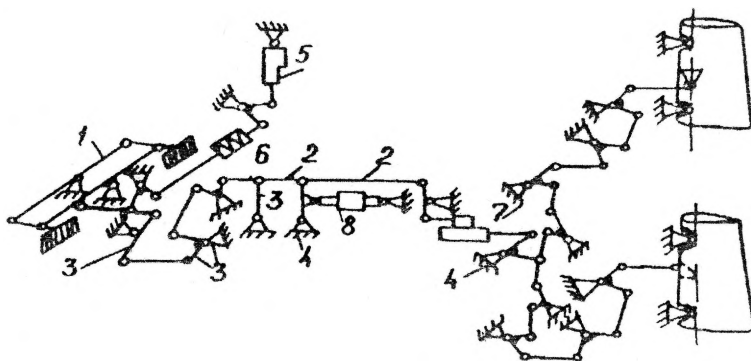


Рис. 3. Схема канала управления рулями направления: 1 — ножной пост управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — бустер; 8 — рулевая машина автопилота

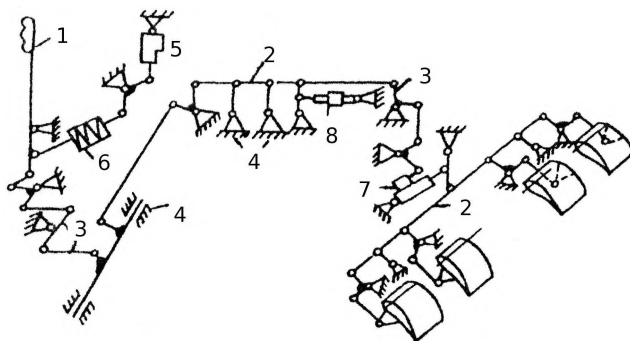


Рис. 4. Схема канала крена системы управления: 1 — ручка управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — бустер; 8 — рулевая машина автопилота

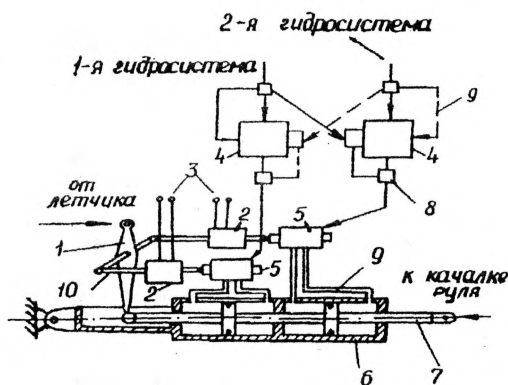


Рис. 5. Схема питания камер двухкамерного гидроусилителя: 1 — входной рычаг; 2 — пружинные тяги; 3 — электросигнализация заклинивания золотника; 4 — клапаны переключения гидросистем; 5 — золотниковый распределитель; 6 — цилиндр гидроусилителя; 7 — шток с поршнями; 8 — соединение трубопроводов; 9 — трубопроводы; 10 — жёсткие тяги

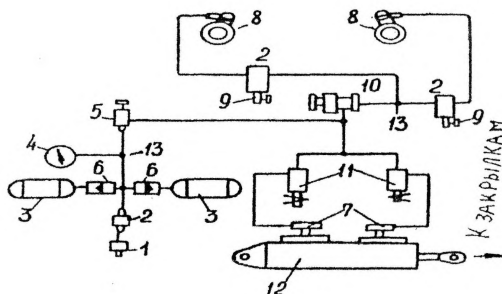


Рис. 6. Схема воздушной системы управления закрылками: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — кран; 6 — обратный клапан; 7 — золотниковый распределитель; 8 — компрессор; 9 — стравливающий клапан; 10 — автомат давления; 11 — электромагнитный клапан; 12 — воздушный цилиндр; 13 — соединение трубопроводов

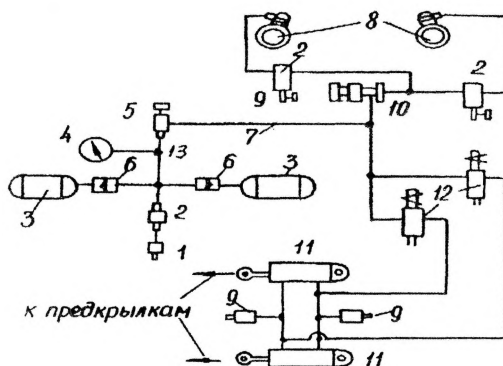


Рис. 7. Схема воздушной системы управления предкрылками: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — кран; 6 — обратный клапан; 7 — трубопровод; 8 — компрессор; 9 — стравливающий клапан; 10 — автомат давления; 11 — воздушный цилиндр; 12 — электромагнитный клапан; 13 — соединение трубопроводов

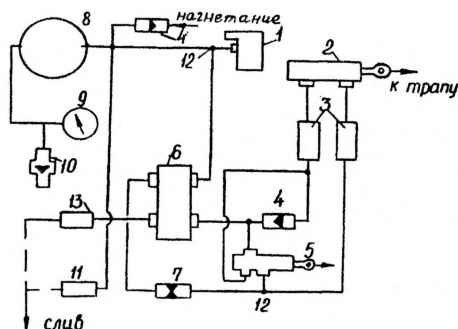


Рис. 8. Магистраль выпуска и уборки бортового трапа: 1 — реле давления; 2 — гидроусилитель; 3 — гидрошарнир; 4 — обратный клапан; 5 — гидроцилиндр замка трапа; 6 — электромагнитный клапан; 7 — дроссель; 8 — гидроаккумулятор; 9 — манометр; 10 — зарядный штуцер; 11 — стравливающий клапан; 12 — соединение трубопроводов; 13 — сливной кран

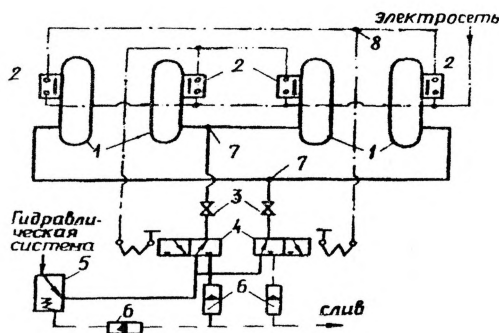


Рис. 9. Принципиальная схема тормозной системы: 1 — тормозное колесо; 2 — инерционный датчик автомата торможения; 3 — дроссель; 4 — электромагнитный кран автомата торможения; 5 — редукционный клапан торможения; 6 — обратный клапан слива; 7 — соединение трубопроводов; 8 — соединение электросети

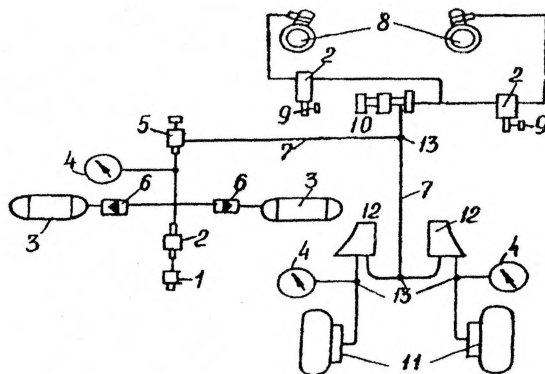


Рис. 10. Схема воздушной системы торможения колес: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — электрогидравлический кран; 6 — обратный клапан; 7 — трубопровод; 8 — компрессор; 9 — фильтр; 10 — автомат давления; 11 — тормозная камера; 12 — редукционный клапан; 13 — соединение трубопроводов

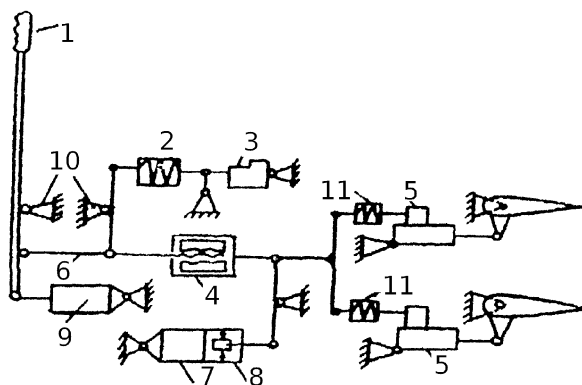


Рис. 11. Принципиальная схема системы управления сверхзвукового самолёта: 1 — ручка управления; 2 —загрузочное устройство; 3 — механизм триммерного эффекта; 4 — исполнительный механизм системы улучшения устойчивости и управляемости; 5 — гидроусилитель; 6 —жёсткая тяга; 7 — исполнительный механизм системы траекторного управления; 8 — механизм отключения исполнительного механизма; 9 — механизм ограничения предельных режимов; 10 — кронштейны; 11 — пружинная тяга

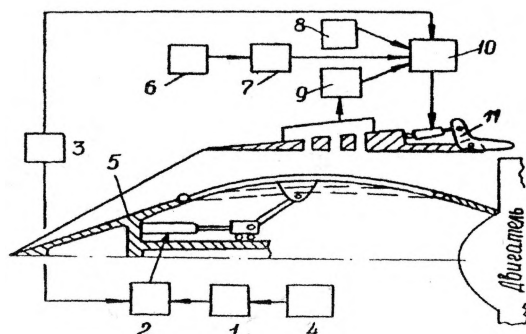


Рис. 12. Схема регулирования сверхзвукового воздухозаборника:
 1 — датчик числа M в горле; 2 — регулятор центрального тела;
 3 — ручное управление; 4 — датчик помпажа; 5 — центральное тело с механизмом регулировки; 6 — датчик «срыва»; 7 — система управление запуском; 8 — датчик числа M полета; 9 — датчик положения скачка; 10 — регулятор перепускных створок; 11 — перепускные створки с механизмом управления

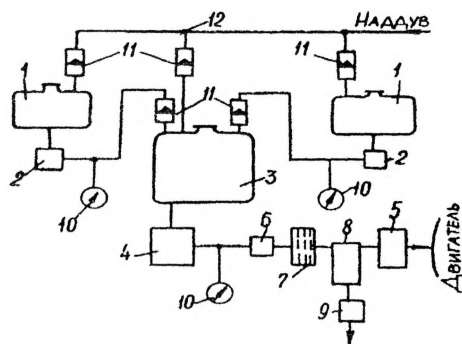
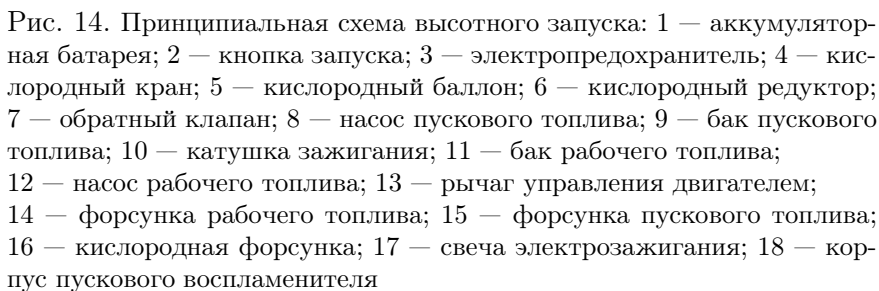


Рис. 13. Схема насосной подачи топлива к двигателю: 1 — топливные баки; 2 — перекачивающие насосы; 3 — расходный бак; 4 — самолётный подкачивающий насос; 5 — двигательный подкачивающий насос; 6 — отсеchnый клапан; 7 — фильтр; 8 — отстойник; 9 — сливной клапан; 10 — манометры; 11 — обратный клапан; 12 — соединение трубопроводов



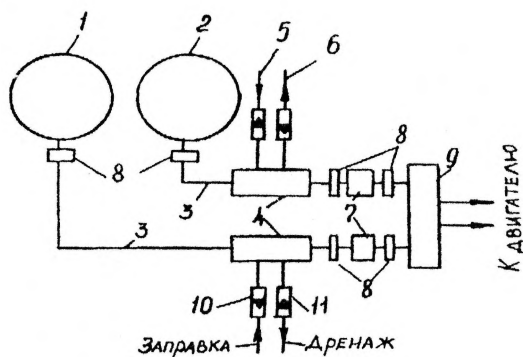


Рис. 15. Принципиальная схема топливной системы двухкомпонентного стартового ускорителя: 1 — бак горючего; 2 — бак окислителя; 3 — магистральный трубопровод; 4 — отсечной клапан; 5 — заправочный трубопровод; 6 — дренажный трубопровод; 7 — сифон; 8 — фланцевые соединения; 9 — турбонасосный агрегат; 10 — обратный клапан; 11 — дренажный клапан

Приложение 2. Параметры потока отказов элементов систем

Наименование элемента	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
1. Общие элементы систем	
Ручка управления	0,2
Ножной пост управления	0,3
Исполнительный механизм системы	5,0
улучшения устойчивости и управляемости	
Исполнительный механизм системы	4,0
траекторного управления	
Механизм отключения исполнительного	1,0
механизма	
Механизм ограничения предельных	2,0
режимов	
Механизм триммерного эффекта	1,0
Загрузочное устройство	0,5
Автомат регулирования усилий	2,5
Рулевая машина автопилота	3,0
Тормозная камера	0,4
2. Элементы гидравлической системы	
Гидроусилитель	5,0
Цилиндр гидроусилителя	0,5
Золотниковый распределитель	2,0
Шток с поршнями	0,2
Реле давления	0,6
Гидроаккумулятор	0,5
Гидрошарнир	1,0
Клапан переключения гидросистемы	0,2
Выключатель гидравлический	0,1
Челночный клапан	0,3
Дроссель	0,2
Обратный клапан	0,5
Зарядный штуцер	0,1
Редукционный клапан	0,2
Манометр гидравлический	0,05
Сливной кран	0,05
Стравливающий клапан	0,2
Трубопровод гидросистемы, 1 м погонный	0,01
Соединение трубопроводов гидросистемы	0,1

Продолжение	
Наименование элемента	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
3. Элементы воздушной системы	
Автомат давления	2,2
Воздушный баллон	1,5
Воздушный цилиндр	1,5
Золотниковый распределитель воздушного цилиндра	2,0
Воздушный фильтр	1,0
Стравливающий клапан	0,8
Зарядный штуцер	0,3
Обратный клапан	0,5
Манометр воздушный	0,2
Редукционный клапан	1,0
Воздушный трубопровод, 1 м погонный	0,02
Соединение воздушных трубопроводов	0,2
4. Элементы электросистемы	
Электрогидравлический кран	0,5
Электромагнитный клапан	0,5
Инерционный датчик автомата торможения	0,4
Электросигнализация заклинивания золотника	0,3
Соединение электросети	0,05
5. Тяги, кронштейны, рычаги	
Жесткая тяга	0,05
Пружинная тяга	0,1
Кронштейн	0,04
Входной рычаг	0,05
Качалка	0,05
6. Система управления воздухозаборником	
Система управления запуском	10,0
Центр. тело с механизмом регулировки	8,0
Регулятор центрального тела	1,5
Ручное управление	2,0
Перепуск. створки с механизмом управл.	2,0
Регулятор перепускных створок	1,5
Датчик числа М в горле	0,8
Датчик числа М полета	0,5
Датчик положения скачка	1,0
Датчик помпажа	0,5
Датчик «срыва»	1,0

Наименование элемента	Окончание
	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
7. Топливная система, система запуска двигателя	
Топливные баки	5,0
Перекачивающие насосы	2,0
Расходный бак	3,0
Самолетный подкачивающий насос	2,0
Двигательный подкачивающий насос	2,0
Бак горючего	5,0
Бак окислителя	10,0
Турбонасосный агрегат	20,0
Насос рабочего топлива	10,0
Насос пускового топлива	12,0
Аккумуляторная батарея	1,0
Кислородный баллон	0,5
Кислородный редуктор	1,0
Форсунка рабочего топлива	0,5
Форсунка пускового топлива	0,5
Форсунка кислородная	0,5
Кислородный электрокран	2,5
Корпус пускового воспламенителя	0,05
Отсечной клапан	0,1
Фильтр	1,0
Отстойник	0,5
Сливной кран	0,8
Манометр	0,05
Обратный клапан	0,1
Магистральный трубопровод	0,1
Заправочный трубопровод	0,05
Дренажный трубопровод	0,05
Соединение трубопроводов	0,5
Сильфон	0,5
Фланцевое соединение	0,1
Дренажный клапан	0,2
Кнопка запуска	0,01
Электропредохранитель	0,5
Катушка напряжения	0,8
Свеча электрозажигания	1,0

Приложение 3. Нарботка на отказ подсистем самолёта

Подсистема	Нарботка на отказ, приведшая к невыполнению задания $\times 10^{-6}$, ч
1. Планер:	
- крыло	8,6
- фюзеляж	6,9
- оперение	8,7
2. Силовая установка:	
- двигатели (с воздухозаборником и системой выхлопа)	0,65
- топливная система	0,1
- система запуска	6,8
3. Взлётно-посадочные устройства:	
- шасси	0,08
- механизация	0,1
4. Система управления	0,3
5. Пилотажно-навигационное оборудование	3,4
6. Электрооборудование	0,5
7. Радиотехническое оборудование	0,6
8. Энергосистема:	
- гидросистема	0,9
- ВСУ	4,4
9. Система жизнеобеспечения:	
- кондиционирование	1,1
- кислородная система	3,4
10. Система защиты:	
- ПОС	6,8
- противопожарная система	8,6
11. Прочие системы	0,2