

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по курсу
«ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ»
для студентов специальности 1-36 07 01

Составители
О. Н. Жаркова, В. Э. Завистовский

Новополоцк 2007

УДК 66.023(075.8)
ББК 35.11я73
Н 17

Рекомендован к изданию методической комиссией
технологического факультета

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А. Л. ЛИСОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент;
Л. В. ПЕРВИЦКИЙ, канд. техн. наук, доцент

Надежность систем технологического оборудования : конспект лекций /
Н 17 сост. О. Н. Жаркова, В. Э. Завистовский. – Новополоцк : ПГУ, 2007. – 64 с.
ISBN 978-985-418-512-5

Предназначен для студентов специальности 1-36 07 01 и содержит теоретические сведения по второй части курса «Основы надежности и долговечности химического оборудования». Будет также полезен студентам специальности 1-36 01 04, изучающим курс «Физика отказов и основы надежности машин», магистрантам и аспирантам.

УДК 66.023(075.8)
ББК 35.11я73

ISBN 978-985-418-512-5

© Жаркова О. Н., Завистовский В. Э., составление, 2007
© Оформление. УО «ПГУ», 2007

ВВЕДЕНИЕ

Надежность – один из основных показателей качества объекта, проявляющийся со временем и отражающий изменения, происходящие в аппарате на протяжении всего периода его эксплуатации.

Для современных машин и аппаратов, представляющих собой сложные системы, состоящие из большого количества взаимосвязанных деталей, узлов и блоков, характерны увеличение степени автоматизации, повышение рабочих параметров (нагрузок, скоростей, температур), борьба за малые габариты и массу, повышение требований к точности функционирования, к эффективности их работы (производительности, мощности, КПД). Непрерывно усиливаются тенденции к автоматизации установок, растут ограничения в смысле доступа к агрегатам и узлам. Усложнение машин и аппаратов химических производств и ужесточение требований к ним приводят к необходимости повышения требований к их надежности и долговечности.

В курсе «Основы надежности и долговечности химического оборудования» будущие инженеры-механики получают необходимые сведения о структурном анализе систем технологического оборудования, методах расчета их надежности в любой отрасли химической промышленности.

После изучения курса студент должен знать основные показатели надежности, основы математического аппарата теории надежности, количественные характеристики, вероятностно-аналитические методы прогноза надежности; должен уметь выбирать нормируемые показатели надежности, рассчитывать надежность технологических систем, а также отдельных машин и аппаратов, решать задачи оптимального резервирования, учитывать надежность оборудования химических производств на стадии проектирования, изготовления и технического обслуживания.

Предлагаемый конспект лекций представляет собой вторую часть курса «Основы надежности и долговечности химического оборудования» – «Надежность систем технологического оборудования». Кроме того, в конспекте приведены контрольные вопросы, задания для самостоятельного решения, рекомендуемая литература.

Лекция 1

НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

При создании новой машины (на этапах ее проектирования и изготовления) необходимо установить и обеспечить такой уровень надежности, чтобы при эксплуатации машины были гарантированы безопасность и высокая эффективность работы.

Установление в нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надежности – *нормирование надежности*.

Одной из главных задач нормирования надежности является выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности.

Нормируемый показатель надежности – показатель надежности, значение которого регламентировано нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией на объект.

При выборе номенклатуры нормируемых показателей надежности необходимо учитывать:

- назначение объекта;
- степень его ответственности;
- условия эксплуатации;
- характер отказов;
- возможные последствия отказов.

При этом целесообразно, чтобы общее число нормируемых показателей надежности было минимально; нормируемые показатели имели простой физический смысл, допускали возможность расчетной оценки на этапе проектирования, статистической оценки и подтверждения по результатам испытаний и (или) эксплуатации.

Эксплуатация машины – сложный процесс, который состоит из различных периодов, во время которых работоспособность машины либо снижается, либо восстанавливается (табл. 1).

Для различных машин в зависимости от их назначения характерны определенные сочетания перечисленных периодов и различная их длительность.

При расчете показателей надежности большое значение имеет вид и характер возникающих или возможных отказов.

Таблица 1

Периоды эксплуатации машины

Период эксплуатации	Работоспособность
1. Простой машины: консервация и хранение; транспортировка; проверка работоспособности (диагностика) или наладка (подготовка к работе); простои (ожидание работы или ремонта)	Как правило, изменяется незначительно
2. Работа машины: при нормальных режимах и условиях эксплуатации; при повышенных режимах и экстремальных ситуациях; при пониженных режимах (недоиспользование машины); при проверках и испытаниях	Снижается
3. Ремонт машины: ремонты по состоянию; плановые периодические ремонты; техническое обслуживание и диагностика; аварийные ремонты	Восстанавливается

Основными признаками, определяющими различные виды отказов, являются:

- характер возникновения и протекания процессов, приводящих к отказу;
- последствия отказов;
- методы устранения отказов.

С этой точки зрения существуют следующие основные виды отказов.

1. Постепенные и внезапные отказы.

Постепенные (износные) *отказы* возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия.

К этому виду относится большинство отказов машины. Они связаны с изнашиванием, коррозией, усталостью и другими процессами старения материалов, из которых созданы изделия.

Внезапные отказы – это те, причиной которых являются процессы, возникшие в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности изделия к их восприятию.

Примерами таких отказов могут служить тепловые трещины, возникшие в детали вследствие прекращения подачи смазки; поломки детали из-за неправильных методов эксплуатации машины или возникновения перегрузок; деформация или поломка деталей, попавших в непредусмотренные условия работы.

Отказ при этом происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов разрушения и не зависит от степени изношенности изделия.

2. Отказы функционирования и параметрические отказы.

Отказ функционирования приводит к тому, что изделие не может выполнять возложенные на него функции. Например, в результате отказа насос не подает масла, двигатель внутреннего сгорания не запускается и т.п. Часто отказ функционирования связан с поломками или заклиниванием отдельных элементов изделия.

Параметрический отказ возникает при выходе параметров (характеристик) изделия за допустимые пределы. Изделие становится неработоспособным с точки зрения требований, установленных техническими условиями.

Продолжение использования изделия, имеющего параметрический отказ, может привести к весьма тяжелым экономическим и иным последствиям, например, к выпуску некачественной продукции.

3. Фактические и потенциальные отказы.

При эксплуатации изделия рано или поздно наступит его первый, а затем и последующие отказы. Если эти отказы предотвращаются заблаговременным выполнением ремонта и регулировок, то они воспринимаются не как фактические, а как потенциально возможные события. Такие отказы называются *потенциальными*.

4. Допустимые и недопустимые отказы.

Допустимые отказы связаны обычно с процессами старения, которые нельзя предотвратить и которые приводят к постепенному ухудшению выходных параметров изделия. Сюда же следует отнести внезапные отказы, которые вызваны неблагоприятным сочетанием факторов, если последние находятся в пределах, указанных в технических условиях.

Недопустимые отказы связаны с нарушением условий производства и эксплуатации и с неучтенными факторами. Например, это отказы, связанные с нарушением технических условий при изготовлении и сборке изделий.

Анализ принадлежности каждого отказа к той или иной категории классификации позволит выбрать показатели надежности и модель расчета, правильно отражающую реальную ситуацию, в которой используется изделие.

Анализ причин отказов проводится с целью обоснованной разработки мероприятий по их предотвращению как в серийно изготавливаемых изделиях, так и во вновь разрабатываемых видах техники с конструктивно-технологическим подобием. Результаты анализа причин отказов могут использоваться:

- для установления или уточнения критериев отказов;
- для определения и учета влияния на надежность отдельных особенностей и факторов конструкции, технологии изготовления, режимов и условий эксплуатации, внешних воздействующих факторов, различного вида ремонтов;
- для оценки эффективности мероприятий по обеспечению надежности;
- для выбора или уточнения системы контроля качества изготовления или диагностирования изделий;
- для определения или уточнения периодичностей технического обслуживания, ремонта и объемов видов работ при этих операциях.

Анализ причин отказов машин можно проводить в следующем порядке:

- установление факта отказа;
- установление внешних проявлений отказа;
- установление вида отказа;
- установление технической сущности отказа;
- установление причин отказа.

Факт отказа определяют на основании критериев отказа, установленных в нормативно-технической документации. Внешние проявления отказов устанавливают органолептическими методами без использования диагностических средств (шум в коробке передач, течь масла, запах горелого при работе электродвигателя, появление дыма и т.д.). Вид отказа устанавливают после проведения диагностических процедур (износ зубов шестерни, разрушение подшипника и т.д.). Техническая сущность характеризует физико-технические факторы, приводящие к данному виду отказа (технической сущностью износа зубьев шестерни является перекос, отсутствие приработки, попадание постороннего предмета в зацепление и т.д.).

По завершению анализа причины отказа детали (узла, машины) составляется соответствующий акт (рекламация).

Причина отказа – это явление, процессы, события и состояния, обуславливающие возникновение отказа объекта. Например, причиной отказа системы поддержания уровня масла в шлицевом соединении могут быть: нарушения правил затяжки болтов крепления крышек и корпусов коробки передач; срез резьбы болта при ремонте; низкое качество сальника; нарушение правил заправки маслом и т.д.

Наглядной формой анализа причин отказов является схема причинно-следственных связей (диаграмма Исикавы). В этой схеме конечный ре-

зультат (критерий отказа, показатель надежности) изображается центральной стрелкой. Явления (факторы, принципы), влияющие на результат, изображают стрелками, направленными к центральной линии (рис. 1).

Для составления такой схемы можно использовать мнения экспертов.

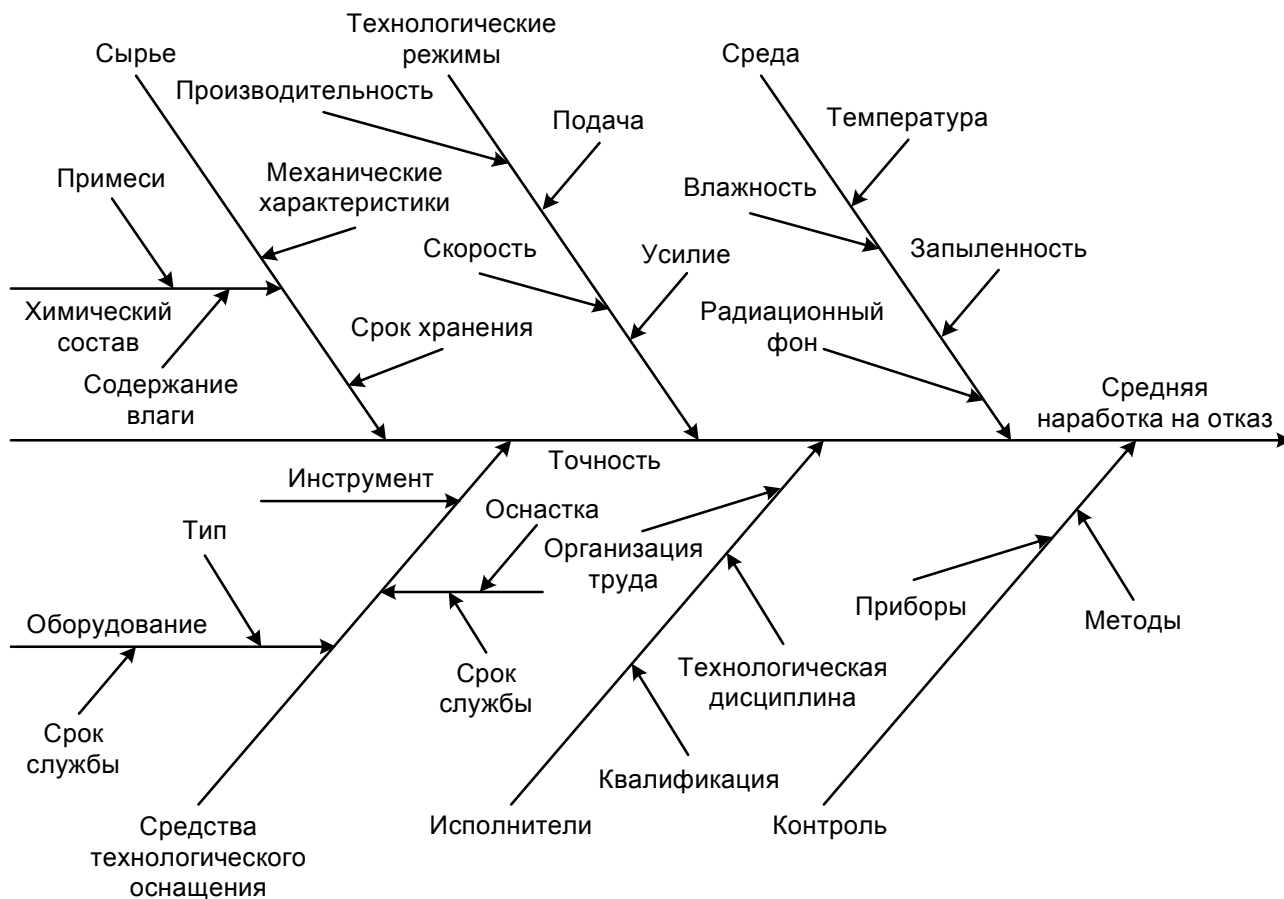


Рис. 1. Схема «рыбий скелет» (диаграмма проф. Исикавы)

Компанией «Клейтон Девандре Хойллинг» (США) разработан и активно используется метод анализа характера потенциальных дефектов и причин, их вызывающих (Potential Failure Mode and Effects Analysis – FMEA).

Сущность метода сводится к тому, что еще на начальных стадиях создания техники проводится анализ, и количественно определяются все потенциальные причины и последствия отказов. Система предполагает, что анализу по FMEA будут подвергнуты все детали, которые могут отказать в процессе эксплуатации, и его проводят на основе формы, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Форма записей результатов исследований по методу FMEA

Наименование или номер элемента изделия	Назначение элемента	Потенциальный вид отказа	Последствия отказа	Причина отказа	Существующие средства контроля	Номер частоты отказа	Значимость отказа	Степень обнаруживаемости отказа	Число приоритета риска	Рекомендуемые действия
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Проектировщики используют результаты проведенных ими расчетов, испытаний опытных образцов, а также предыдущий опыт по изделиям-аналогам. Инженер-технолог заполняет форму на основе своего опыта, знания особенностей используемого оборудования. В форму записей результатов заносят следующее данные:

1. наименование элемента (детали, узла) или его номер;
2. функцию элемента. Указывается целевое назначение (функция) элемента. Если элемент выполняет несколько функций, то указываются все функции, невыполнение которых связано с отказом изделия;
3. потенциальный вид отказа. Перечисляются возможные виды отказов по каждой функции. В качестве исходной информации для установления потенциальных видов отказов могут использоваться данные об изделиях-аналогах, результаты испытаний, контроля качества, знание физических процессов разрушения. Вид отказа указывается в технических терминах (износ, усталость и т.п.);
4. последствия отказов. Допускается, что имеет место определенный вид отказа, указанный в колонке 3. Записываются те последствия, которые вызовут данный вид отказа при его появлении у заказчика (потребителя);
5. причину отказа. Перечисляются все причины, приводящие к каждому виду отказа. Ими могут быть ошибки расчета, отклонения от изготовления, сборки, некачественный материал и т.п.;
6. существующие средства контроля. Перечисляются средства контроля, которые предназначены для предотвращения возникновения отказа или причины отказа и которые предусмотрены техни-

ческой документацией. Если требуются другие средства контроля, то они указываются в колонке 11;

7. классификацию частоты отказов. Указывается классификационный номер частоты отказа определенного вида в соответствии с табл. 3. Частота отказов характеризуется цифрой от 1 до 10. При выборе классификационного номера следует учитывать вероятность того, что потенциальные причины будут иметь место, что они не будут обнаружены существующей системой контроля;

Таблица 3

Классификация частоты отказов

Классификация, номер	Критерий	Вероятность отказа
1	Практически недостоверное событие; отказа в течение времени t ожидать не следует	0
2	Низкая вероятность отказа	0,00005
3	Возможность появления отказа ассоциируется только с методами расчета	0,0001
4	Умеренная вероятность отказа	0,0005
5	Возможность появления отказа ассоциируется только с методами расчета	0,001
6	Практически отказы можно ожидать	0,005
7	Высокая вероятность отказа	0,01
8	Ассоциируется с методами расчета аналогов и отказами в небольших количествах при предыдущих наблюдениях	0,05
9	Высокая вероятность отказа	0,1
10	Известно, что будет иметь место большое число отказов	$\geq 0,5$

8. значимость отказа. Проставляется значимость отказа с точки зрения потребителя, выбирается в соответствии с табл. 4 и характеризуется одной из цифр от 1 до 10. Эта оценка не связана с потенциальными причинами отказов;
9. степень обнаруживаемости дефекта. Цифрами от 1 до 10 характеризуется вероятность обнаружения при контроле причины отказа или отказа определенного вида. Оценка обнаруживаемости дефекта проводится в предположении, что причина отказа имеет место (табл. 5);

Таблица 4

Значимость отказов

Классификационный номер (значение показателя)	Критерий значимости
1	Отказ не приводит к заметным последствиям: потребитель, вероятно, не обнаружит и не заметит такой отказ
2 – 3	Последствия отказа незначительны: у потребителя от может вызвать только неудовольствие
4 – 6	Отказ приводит к неудобству использования изделия; у потребителя он вызывает раздражение. Потребитель замечает снижение эксплуатационных характеристик изделия
7 – 8	Высокая степень недовольства потребителя: изделие не работает или непригодно к использованию из-за отказа; отказ не связан с безопасностью человека
9 – 10	Отказ связан с угрозой опасности человеку или окружающей среде

Таблица 5

Классификации степени обнаружения дефекта

Оценка показателя	Критерий	Вероятность необнаружения дефекта и его наличия в изделии
1	Практически малая вероятность, что дефект не будет выявлен при контроле, сборке или испытаниях	0 – 0,05
2 3	Небольшая вероятность того, что дефект не будет выявлен, а дефектное изделие поставлено потребителю	0,06 – 0,07 0,08 – 0,15
4 5 6	Умеренная вероятность того, что дефектное изделие дойдет до потребителя	0,26 – 0,35 0,36 – 0,45 0,46 – 0,55
7 8	Высокая вероятность того, что дефектное изделие достигнет потребителя	0,56 – 0,65 0,66 – 0,75
9 10	Очень высокая вероятность того, что дефектное изделие достигнет потребителя	0,76 – 0,86 0,86 – 1,00

10. число приоритета риска. Это число представляет собой произведение цифр, указанное в строках 7 – 9 и должно вычисляться для всех причин отказов. Оно используется для установления приоритетности в устранении причин отказов и при проведении управляющих воздействий. Специальное внимание следует уделять причинам отказов с числом риска ≥ 125 , а также отказам, значимость которых оценена баллами 9 и 10;

11. рекомендуемые действия. Дается краткое описание рекомендуемых корректируемых воздействий, предусматривающих: изменение конструкции детали или узла; изменение технологического процесса; совершенствование процесса контроля качества.

Допустимое значение вероятности безотказной работы является мерой для оценки последствий отказа, которые могут быть самыми разнообразными (от незначительного материального ущерба до катастрофического).

Все особенности отказа и его последствий следует характеризовать допустимой вероятностью безотказной работы, которая аккумулирует в себе и численно оценивает опасность последствий отказа.

Применяют шесть классов надежности в зависимости от допустимых значений вероятности безотказной работы $P(t)$ (табл. 6).

Таблица 6

Классы надежности по допустимому значению вероятности безотказной работы $P(t)$

Класс надежности	Допустимое значение $P(t)$	Последствия отказа	Примеры машин
0	$<0,9$	Без существенных последствий	Элементы машины, не влияющие на ее технические характеристики
1	$\geq 0,9$	Экономические потери	Технологическое оборудование неавтоматизированных производств
2	$\geq 0,99$	Значительные экономические потери	Технологическое оборудование в автоматизированных системах. Сельскохозяйственная техника
3	$\geq 0,999$	Моральный ущерб	Бытовые машины
4	$\geq 0,9999$	Авария, катастрофа, невыполнение ответственного задания	Подъемно-транспортные машины, летательные аппараты, машины химического производства, медицинское оборудование, военная техника
5	1		

В нулевой класс входят малоответственные детали и узлы, отказ которых остается практически без последствий.

Классы 1 – 4 характеризуются повышенными требованиями к безотказности (номер класса соответствует числу девяток после запятой у значения $P(t)$).

В пятый класс включаются высоконадежные изделия, отказ которых в заданный период недопустим.

По мере развития техники наблюдается тенденция обеспечения все более высоких значений $P(t)$, что связано как с экономическими причинами, так и с престижными соображениями в условиях конкуренции.

Наиболее полную характеристику надежности объекта дает функциональная зависимость показателя эффективности работы объекта от времени. Чтобы найти такой показатель надежности для характеристики объекта необходимо построить математическую модель его функционирования и принять в качестве нормируемого показателя тот, который войдет в выражение математической модели.

Для построения математической модели необходимо иметь две зависимости: плотность распределения вероятностей $f(t)$ и эффективность функционирования объекта $c(t)$. Эффективность может быть выражена через некоторый «доход», например, в деньгах или в какой-либо другой наработке.

Рассмотрим функционирование N штук невосстанавливаемых объектов.

Число объектов, отказавших к моменту времени t_1 (по определению плотности распределения вероятностей отказов), равно

$$N_1 = N \cdot f(t_1) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $f(t_1)$ – значение плотности распределения вероятностей отказов к моменту времени t_1 ;

Δt – рассматриваемый отрезок времени.

Очевидно, что «доход» ΔS_1 , образовавшийся к моменту времени t_1 от числа объектов, отказавших к этому времени, равен

$$\Delta S_1 = N_1 \cdot c(t_1) = N \cdot f(t_1) \cdot c(t_1) \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Для моментов времени $t_2, t_3, \dots, t_i$ по аналогии с (2) можно записать

$$\begin{aligned} \Delta S_2 &= N \cdot f(t_2) \cdot c(t_2) \cdot \Delta t; \\ \Delta S_3 &= N \cdot f(t_3) \cdot c(t_3) \cdot \Delta t; \\ &\dots \\ \Delta S_i &= N \cdot f(t_i) \cdot c(t_i) \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (3)$$

Суммарный «доход» S_N на всем участке времени функционирования N объектов определится интегралом

$$S_N = \int_0^{\infty} \Delta S_i = N \cdot \int_0^{\infty} f(t) \cdot c(t) \cdot dt. \quad (4)$$

Определим средний «доход» на один объект

$$S = \frac{S_N}{N} = \int_0^{\infty} f(t) \cdot c(t) \cdot dt. \quad (5)$$

Рассчитаем интеграл (5) для некоторых частных случаев.

Пример 1. Пусть невосстанавливаемый объект работает в непрерывном режиме и «доход» от его функционирования линейно зависит от времени (рис. 2)

$$c(t) = -\beta + \gamma \cdot t. \quad (6)$$

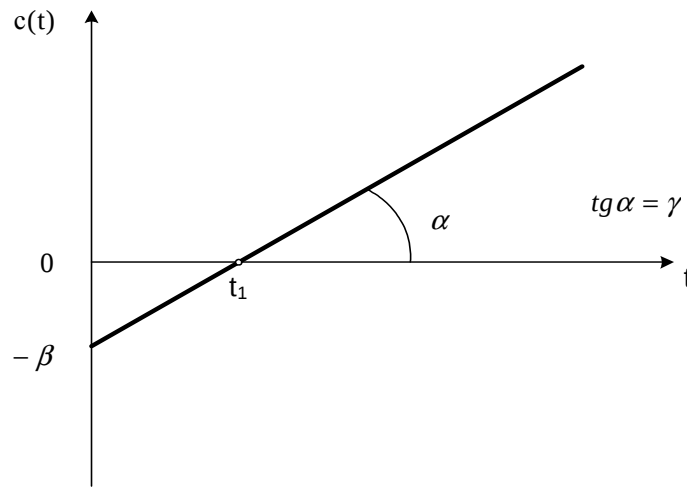


Рис. 2. Линейная зависимость «дохода» от времени

Из рис. 2 видно, что при $t = 0$ $c(t) = -\beta$ (это затраты на создание объекта); период $0 < t < t_1$ – период окупаемости, а при $t > t_1$ изделие приносит «доход».

Подставим выражение (6) в выражение (5). Получим

$$S = \int_0^{\infty} (-\beta + \gamma t) \cdot f(t) \cdot dt. \quad (7)$$

Проведем интегрирование

$$S = -\beta \cdot \int_0^{\infty} f(t) \cdot dt + \gamma \cdot \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt. \quad (8)$$

Рассмотрим интегралы в отдельности. Из теории вероятностей известно, что вся площадь под кривой плотности распределения вероятностей равна единице

$$\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1. \quad (9)$$

Второй интеграл в выражении (8) представляет математическое ожидание случайной величины t , т.е. среднюю наработку до отказа.

$$\int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = t_{cp}. \quad (10)$$

Окончательно получим

$$S = -\beta + \gamma \cdot t_{cp}. \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что эффективность функционирования объекта зависит от средней наработки до отказа t_{cp} , которая и принимается в качестве нормируемого показателя надежности.

Пример 2. Рассмотрим модель функционирования объекта при скачкообразной зависимости «дохода» от времени (рис. 3).

Такой вид зависимости «дохода» от времени характерен для невосстанавливаемых изделий, выполняющих одну определенную задачу, причем «доход» проявляется скачком в момент t_p выполнения задачи и в дальнейшем остается постоянным, равным γ , а до момента t_p имеются затраты $-\beta$.

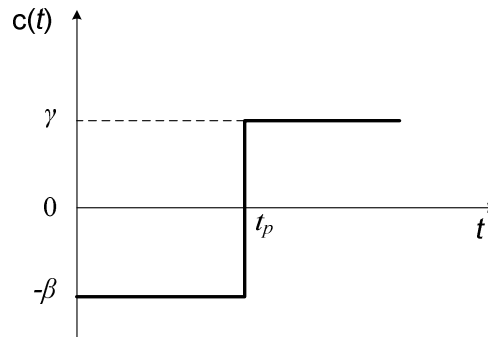


Рис. 3. Скачкообразная зависимость «дохода» от времени

Аналитически это запишется так:

$$\begin{aligned} c(t) &= -\beta \text{ при } t < t_p; \\ c(t) &= \gamma \text{ при } t \geq t_p. \end{aligned} \quad (12)$$

Поставим (12) в выражение (5)

$$S = -\beta \cdot \int_0^{t_p} f(t) \cdot dt + \gamma \cdot \int_{t_p}^{\infty} f(t) \cdot dt. \quad (13)$$

Рассмотрим интегралы уравнения (13):

- $\int_0^{t_p} f(t) \cdot dt = F(t_p)$ – функция отказов за время t_p ;
- $\int_{t_p}^{\infty} f(t) \cdot dt = P(t_p)$ – вероятность безотказной работы за время t_p .

Учитывая, что $F(t_p) = 1 - P(t_p)$, имеем

$$S = -\beta \cdot [1 - P(t_p)] + \gamma \cdot P(t_p). \quad (14)$$

Таким образом, в случае «скачкообразной» зависимости дохода от времени нормируемым показателем надежности является вероятность безотказной работы $P(t_p)$.

Пример 3. Рассмотрим модель эффективности функционирования восстанавливаемого изделия. Процесс функционирования восстанавливаемых изделий удобно описывать единичной функцией $\varepsilon(t)$, которая может принимать значения только единицы или нуля.

На рис. 4 представлен график функции $\varepsilon(t)$. Когда единичная функция равна единице $\varepsilon(t) = 1$, изделие работает, и это соответствует интервалам времени $t_1, t_2, \dots, t_n$. При $\varepsilon(t) = 0$ изделие не работает (перерывы на ремонт и техническое обслуживание), и это соответствует интервалам времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. Таким образом, функция $\varepsilon(t)$ представляет собой функцию состояния восстанавливаемых изделий.

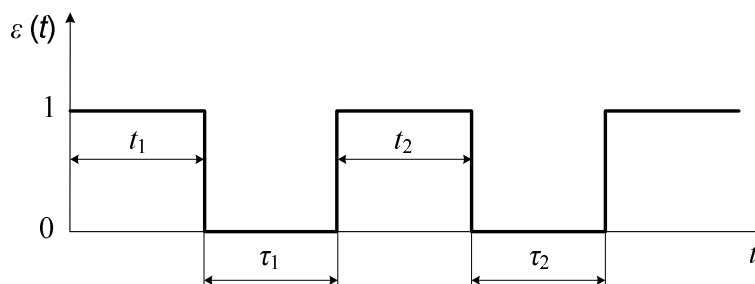


Рис. 4. График единичной функции $\varepsilon(t)$

Средний «доход» в единицу времени за период, равный ресурсу t_p

$$S_{t_p} = \frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} c'(t) \cdot dt, \quad (15)$$

где $c'(t)$ – функция текущей эффективности восстанавливаемого изделия (текущие «затраты» или текущий «доход»).

При эксплуатации многих изделий найдем математическое ожидание среднего дохода в единицу времени

$$M(S_{t_p}) = M \left[\frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} c'(t) \cdot dt \right]. \quad (16)$$

В соответствии с графиком, приведенным на рис. 4, построим график функции текущей эффективности $c'(t)$ (рис. 5).

Текущие «доходы» могут быть описаны зависимостью

$$c'(t) = (\gamma + \beta) \cdot \varepsilon(t) - \beta. \quad (17)$$

При $\varepsilon(t) = 1$ $c'(t) = \gamma$ изделие работает и приносит «доход» γ .

При $\varepsilon(t) = 0$ $c'(t) = -\beta$ изделие не работает, имеются убытки β из-за простоя.

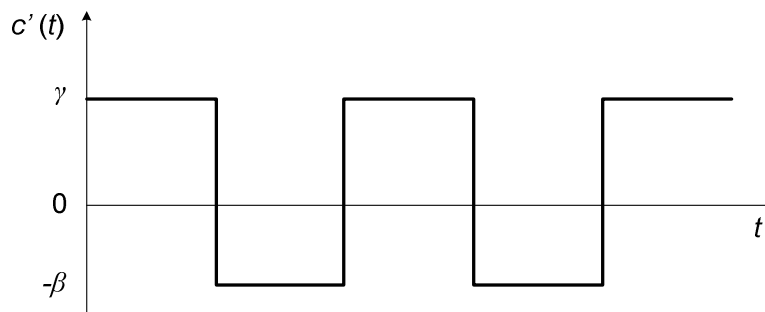


Рис. 5. Зависимость текущих «доходов» от времени

Тогда выражение (16) запишется как

$$M(S_{t_p}) = M \left[\frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} [(\gamma + \beta) \cdot \varepsilon(t) - \beta] \cdot dt \right] \quad (18)$$

или

$$M(S_{t_p}) = \frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} \{(\gamma + \beta) \cdot M[\varepsilon(t)] - \beta\} \cdot dt, \quad (19)$$

где $M[\varepsilon(t)]$ – математическое ожидание вероятности того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

Это коэффициент текущей готовности

$$K_{m.z.}(t) = M[\varepsilon(t)]. \quad (20)$$

Обозначим $M(S_{t_p}) = S_{cp}$.

Тогда запишем

$$S_{cp} = \frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} \{(\gamma + \beta) \cdot K_{m.z.}(t) - \beta\} \cdot dt. \quad (21)$$

Обозначим $\frac{1}{t_p} \cdot \int_0^{t_p} \{K_{m.z.}(t)\} \cdot dt = K_z$ – среднее значение коэффициента

текущей готовности, т.е. это коэффициент готовности – комплексный показатель надежности, устанавливающий соотношение между временем работы и временем восстановления.

Окончательно получим

$$S_{cp} = \psi(K_z). \quad (22)$$

Таким образом, нормируемым показателем надежности для восстанавливаемых изделий является коэффициент готовности.

Методика определения нормируемых показателей надежности для других видов изделий аналогична методикам, рассмотренным выше.

Ниже приведены нормируемые показатели надежности по ГОСТ 27.002-89.

Показатели безотказности

1. *Вероятность безотказной работы $P(t)$* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.
2. *Гамма-процентная наработка до отказа T_γ* – наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.
3. *Средняя наработка до отказа T_{cp}* – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.
4. *Средняя наработка на отказ T_o* – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.
5. *Интенсивность отказов $\lambda(t)$* – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.
6. *Параметр потока отказов $\omega(t)$* – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

Показатели долговечности

1. *Гамма-процентный ресурс* $T_{p,\gamma}$ – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.
2. *Средний ресурс* T_p – математическое ожидание ресурса.
3. *Гамма-процентный срок службы* $T_{cl,\gamma}$ – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.
4. *Средний срок службы* T_{cl} – математическое ожидание срока службы.

Показатели ремонтпригодности

1. *Вероятность восстановления* $P_e(t)$ – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение
2. *Гамма-процентное время восстановления* $T_{e,\gamma}$ – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах.
3. *Среднее время восстановления* T_e – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.
4. *Интенсивность восстановления* $\lambda_e(t)$ – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.
5. *Средняя трудоемкость восстановления* ρ_e – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Показатели сохраняемости

1. *Гамма-процентный срок сохраняемости* $T_{c,\gamma}$ – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.
2. *Средний срок сохраняемости* T_c – математическое ожидание срока сохраняемости.

Комплексные показатели надежности

1. *Коэффициент готовности K_g* – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени.

2. *Коэффициент оперативной готовности $K_{o.г}$* – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени.

3. *Коэффициент технического использования $K_{т.и}$* – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

4. *Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$* – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению.

Лекция 2

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Большинство объектов химического машиностроения являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов и т.п.

Сложная система – это объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

Понятие сложной системы условно. Сложная система работает, как правило, в широком диапазоне условий эксплуатации и при различных режимах.

С позиций надежности сложная система обладает как отрицательными, так и положительными свойствами.

Факторы, *отрицательно* влияющие на надежность сложных систем:

1. большое число узлов, агрегатов, элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;
2. сложные системы часто являются уникальными или имеются в нескольких экземплярах, и статистические данные не могут быть использованы для оценки их работоспособности;
3. каждый экземпляр системы и машины одинакового конструктивного оформления имеет индивидуальные черты; незначительные вариации свойств отдельных элементов сказываются на выходных параметрах системы.

Факторы, *положительно* влияющие на надежность сложных систем:

1. сложным системам свойственна самоорганизация, саморегулирование, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;
2. для сложной системы возможно восстановление работоспособности по частям, без прекращения ее функционирования;
3. не все элементы одинаково влияют на надежность сложной системы, и можно выделить ограниченное число тех элементов, которые в основном определяют ее работоспособность.

При рассмотрении сложных систем их разделяют на элементы для того, чтобы вначале определить параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы.

Теоретически любую машину можно условно разделить на сколько угодно большое число элементов, понимая под элементом узел, агрегат, деталь, часть детали.

Элемент – это составная часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.

Элемент обладает следующими особенностями:

1. состав элемента устанавливается в зависимости от поставленной задачи, и сам элемент может быть достаточно сложным и состоять из отдельных деталей и узлов;
2. при определении надежности системы элемент не расчленяется на составные части;
3. возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

Расчет надежности включает теоретическое определение всех основных количественных характеристик (показателей надежности) элемента или системы.

На стадии проектирования такой расчет позволяет ориентировочно оценить ожидаемую надежность основных узлов и блоков. Если окажется, что расчетные значения показателей надежности окажутся ниже требуемых, то можно своевременно принять меры по их повышению как в процессе проектирования, так и в процессе разработки технологии.

Оценка показателей надежности уже существующих аппаратов и линий позволяет грамотно решать вопросы технической эксплуатации, профилактики и текущего ремонта. Можно заблаговременно предусмотреть появление тех или иных неисправностей, повысив тем самым вероятность безотказной работы машины.

Различают две группы расчетов надежности систем: приближенный (ориентировочный) и полный (окончательный).

Инженерные методы полного расчета до настоящего времени неизвестны. Ввиду этого на практике ограничиваются определением одной или двух количественных характеристик надежности, являющихся наиболее важными для данной системы или объекта, например:

- вероятность безотказной работы аппарата или линии

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt ; \quad (1)$$

- среднее время безотказной работы

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt ; \quad (2)$$

- интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (3)$$

а далее сравнивают эти характеристики с данными технических условий.

Надежность системы в целом зависит от надежности входящих в нее элементов, а также способа их включения в систему.

В теории надежности различают два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное (рис. 1, 2).

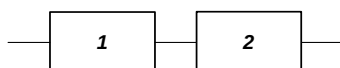


Рис. 1. Последовательное соединение элементов

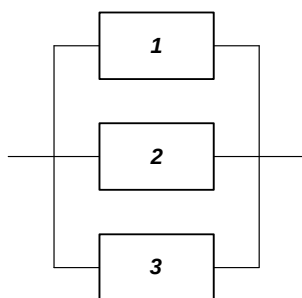


Рис. 2. Параллельное соединение элементов

Последовательное соединение элементов – соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента вызывает отказ всей системы.

Последовательное соединение есть совокупность элементов, для которой необходимым и достаточным условием отказа является отказ хотя бы одного элемента, входящего в данную систему. В этом случае при условии, что отказ каждого из n элементов системы является событием независимым, будем иметь

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4)$$

Пример 1. На рис. 3 представлена схема надежности реактора с приводом.

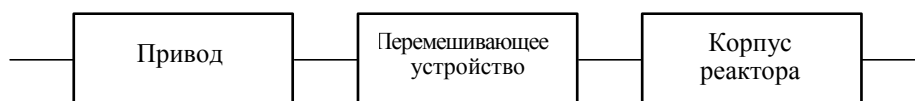


Рис. 3. Схема надежности реактора

При рассмотрении схемы видно, что при отказе любого элемента произойдет отказ функционирования всей системы. Тогда, если считать отказы этих элементов (узлов) независимыми событиями, то вероятность безотказной работы реактора $P_C(t)$ равна

$$P_C(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t), \quad (5)$$

где $P_1(t)$ – вероятность безотказной работы привода;

$P_2(t)$ – вероятность безотказной работы перемешивающего устройства;

$P_3(t)$ – вероятность безотказной работы корпуса реактора.

Обратимся к теоретико-множественным представлениям. На рис. 4 в прямоугольнике универсального множества U представлены множества P_1, P_2, P_3 , представляющие собой функционирование соответствующего элемента по рис. 3. Т.е., если вероятность безотказной работы (надежность) привода – это попадание точки в область P_1 , вероятность безотказной работы (надежность) перемешивающего устройства – попадание точки в область P_2 и вероятность безотказной работы (надежность) корпуса – попадание точки в область P_3 , то множество работоспособных состояний всей системы соответствует пересечению множеств P_1, P_2, P_3 .

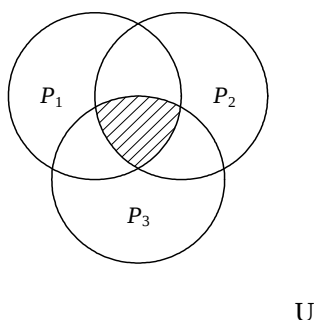


Рис. 4. Последовательное соединение элементов

Тогда для надежности системы можно записать

$$P_C = P_1 \cap P_2 \cap P_3. \quad (6)$$

Если система состоит из n элементов, получим

$$P_C = P_1 \cap P_2 \cap \dots \cap P_n = \bigcap_{i=1}^n P_i \quad (7)$$

или в алгебраической записи

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (8)$$

Т.к. показатель надежности зависит от времени, выражение (8) можно записать в виде

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (9)$$

т.е. получим (4).

Формула (4) является расчетной для определения показателя надежности системы с последовательным соединением элементов. Из этой формулы можно сделать следующие выводы:

1. надежность системы с последовательно соединенными элементами всегда будет ниже надежности самого ненадежного элемента системы

$$P_c(t) < P_{i_{\min}}(t); \quad (10)$$

2. чем сложнее система с последовательным соединением элементов, тем ниже ее надежность.

Если случайная величина t (например, наработка до отказа) имеет экспоненциальный закон распределения, то на основании (9) имеем

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-\lambda_c t}, \quad (11)$$

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

В частном случае, если система с последовательным соединением элементов состоит из одинаковых элементов, (9) приобретает вид

$$P_c(t) = [P(t)]^n. \quad (12)$$

Если имеет место экспоненциальный закон распределения случайной величины

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (13)$$

то (11) запишется в виде

$$P_c(t) = e^{-n \cdot \lambda \cdot t} = e^{-\lambda_c t}; \quad \lambda_c = n \cdot \lambda. \quad (14)$$

Но для экспоненциального закона

$$\lambda = \frac{1}{t_{cp}}. \quad (15)$$

Тогда

$$T_{cp} = \frac{t_{cp}}{n}, \quad (16)$$

т.е. средняя наработка до отказа (показатель долговечности) T_{cp} системы с последовательно соединенными одинаковыми элементами ниже средней наработки до отказа t_{cp} элемента в n раз.

На рис. 5 представлены графики зависимости надежности системы с одинаковыми последовательно соединенными элементами от времени при различных значениях показателя надежности $P(t)$ отдельного элемента.

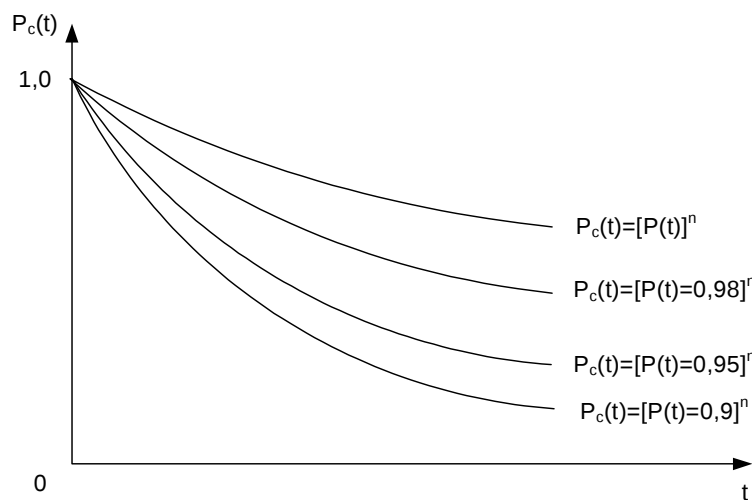


Рис. 5. Зависимость надежности системы $P_c(t)$ от времени t и надежности ее элементов $P(t)$

Пример 2. Сложная система состоит из двух последовательно соединенных элементов (рис. 6). Система откажет, если откажет хотя бы один из входящих в нее элементов.

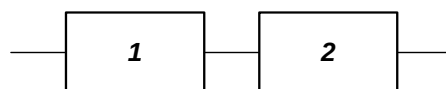


Рис. 6. Сложная система с двумя последовательно соединенными элементами

Допустим, что для элементов системы известно

$$f_1(t), P_1(t), \lambda_1(t) \text{ и } f_2(t), P_2(t), \lambda_2(t).$$

Найдем эти показатели для системы $f(t), P(t), \lambda(t)$

$P(t)$ находится по формуле

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t). \quad (17)$$

Дифференцируем обе части уравнения (17) по t

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dP_1(t)}{dt} \cdot P_2(t) + \frac{dP_2(t)}{dt} \cdot P_1(t).$$

Но $\frac{dP(t)}{dt} = -f(t)$, тогда

$$f(t) = f_1(t) \cdot P_2(t) + f_2(t) \cdot P_1(t). \quad (18)$$

Но $P(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt$, тогда

$$f(t) = f_1(t) \cdot \int_t^{\infty} f_2(t) \cdot dt + f_2(t) \cdot \int_t^{\infty} f_1(t) \cdot dt. \quad (19)$$

Разделим уравнение (18) на (17)

$$\frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f_1(t) \cdot P_2(t)}{P_1(t) \cdot P_2(t)} + \frac{f_2(t) \cdot P_1(t)}{P_1(t) \cdot P_2(t)}.$$

Учитывая, что $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$, получим

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t). \quad (20)$$

Уравнения (17), (19) и (20) показывают, как функции $f(t), P(t), \lambda(t)$ системы с последовательным соединением выражаются через такие же функции элементов. Аналогичные формулы получаются при любом числе составляющих.

Параллельное соединение элементов – соединение, при котором система отказывает, если отказали все ее элементы.

Пример такой системы представлен на рис. 7: *a* – частный случай – дублирование элементов; *b* – система, состоящая из трех элементов. Если отказывает любой из трех элементов, система остается работоспособной. Она будет работать и в том случае, если откажут любые два элемента, т.к.

для обеспечения нормального функционирования системы достаточно функционирования всего одного элемента.

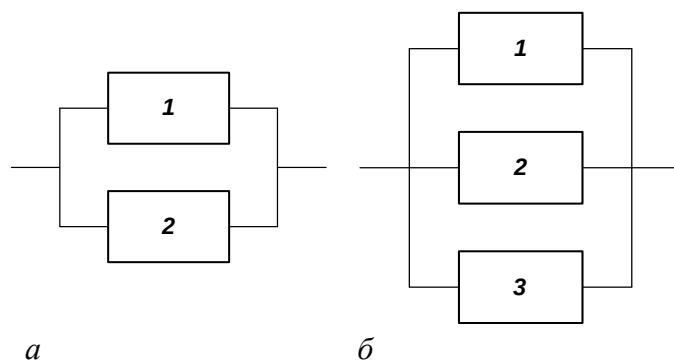


Рис. 7. Система с параллельным соединением n элементов:
 $a - n = 2$; $б - n = 3$

Определим вероятность безотказной работы системы, представленной на рис. 7, a , если известна вероятность безотказной работы каждого ее элемента.

Пусть $P_1(t)$ – вероятность безотказной работы первого элемента, а $P_2(t)$ – вероятность безотказной работы второго элемента. Тогда $1 - P_1(t)$ – вероятность отказа первого элемента, а $1 - P_2(t)$ – вероятность отказа второго элемента.

Вероятность отказа системы (событие – отказ и 1-го, и 2-го элемента – по теореме умножения вероятностей) будет

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) = [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)].$$

Вероятность безотказной работы системы будет:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)]. \quad (21)$$

В частном случае, если параллельно соединенные элементы имеют одинаковое значение вероятности безотказной работы, т.е.

$$P_1(t) = P_2(t) = P(t),$$

получим выражение

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^2. \quad (22)$$

Если система состоит из n элементов, (22) приобретает вид

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^n. \quad (23)$$

Обратимся к теоретико-множественным представлениям.

Пусть в системе из трех элементов вероятность безотказной работы каждого из элементов будет P_1, P_2, P_3 . Интерпретируем эти значения геометрически. На рис. 8 в прямоугольнике универсального множества U показана система кругов P_1, P_2, P_3 , все точки которых соответствуют безотказной работе элементов системы 1, 2, 3, т.е. любая точка заштрихованного множества объединения отвечает состоянию безотказной работы системы.

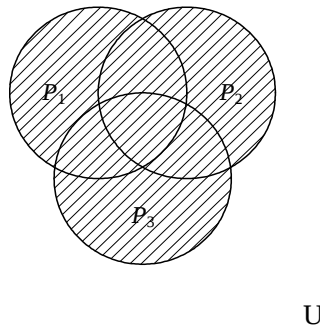


Рис. 8. Система с параллельным соединением элементов

$$P_c = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \quad (24)$$

или в алгебраической записи

$$P_c = 1 - [1 - P_1] \cdot [1 - P_2] \cdot [1 - P_3]. \quad (25)$$

Если система состоит из n элементов с одинаковой вероятностью безотказной работы каждого элемента, то получим

$$P_c = 1 - [1 - P]^n. \quad (26)$$

Т.к. показатель надежности зависит от времени, выражение (26) можно записать в виде

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^n,$$

т.е. получаем (23).

Для системы с параллельным соединением элементов можно сделать выводы:

1. надежность системы выше надежности отдельного элемента, включенного в систему;
2. надежность системы увеличивается с увеличением числа элементов.

Комбинированное соединение элементов. В химической промышленности и родственных отраслях в большинстве случаев встречаются машины, аппараты и технологические схемы, которые невозможно интерпретировать как системы с последовательным или параллельным соединением элементов. Как правило, это системы с комбинированным соединением элементов.

Определим вероятность безотказной работы системы с комбинированным соединением элементов, зная вероятности безотказной работы отдельных элементов.

Сначала на основании технологической схемы необходимо составить структурную схему надежности. Для этого надо, перечисляя последовательно каждый структурный элемент, задавать вопрос: «Что будет, если данный элемент откажет?» Если откажет вся система, значит данный элемент (в смысле надежности) включен последовательно, а если отказа системы не последует, то этот элемент включен параллельно. В соответствии с данной методикой составлена структурная схема, представленная на рис. 9.

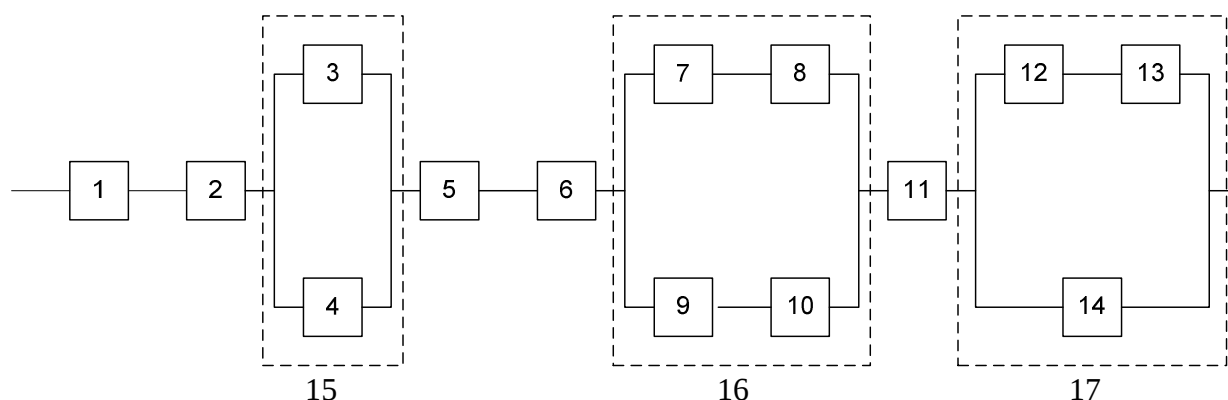


Рис. 9. Система с комбинированным соединением элементов

Для упрощения записи расчетных выражений надежности схемы воспользуемся теоретико-множественной записью формулы надежности рассматриваемого производства

$$P_c = P_1 \cap P_2 \cap P_{15} \cap P_5 \cap P_6 \cap P_{16} \cap P_{11} \cap P_{17}. \quad (27)$$

В выражение (27) введены для удобства вспомогательные элементы 15, 16 и 17 с вероятностями безотказной работы P_{15}, P_{16} и P_{17} , и получена система с последовательно соединенными элементами. Для каждого вспомогательного элемента можно записать выражение для его вероятности безотказной работы.

$$P_{15} = P_3 \cup P_4, \quad (28)$$

$$P_{16} = (P_7 \cap P_8) \cup (P_9 \cap P_{10}), \quad (29)$$

$$P_{17} = (P_{12} \cap P_{13}) \cup P_{14}. \quad (30)$$

Подставим (28), (29) и (30) в (27)

$$P_c = P_1 \cap P_2 \cap (P_3 \cup P_4) \cap P_5 \cap P_6 \cap [(P_7 \cap P_8) \cup (P_9 \cap P_{10})] \cap P_{11} \cap \\ \cap [(P_{12} \cap P_{13}) \cup P_{14}]. \quad (31)$$

Теперь перейдем от теоретико-множественных обозначений к обычной алгебраической записи. Теоретико-множественное пересечение в алгебраическом смысле записывается как произведение – $P_1 \cap P_2 = P_1 \cdot P_2$, а объединение представляется формулой $P_1 \cup P_2 = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)$.

Следовательно, получим

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot [1 - (1 - P_3) \cdot (1 - P_4)] \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot [1 - (1 - P_7 \cdot P_8) \cdot (1 - P_9 \cdot P_{10})] \cdot P_{11} \cdot \\ \cdot [1 - (1 - P_{12} \cdot P_{13}) \cdot (1 - P_{14})]. \quad (32)$$

Выражение (32) дает возможность определить надежность структурной схемы, представленной на рис. 9.

Если предположить, что наработку до отказа (или наработку на отказ) можно оценить экспоненциальным законом распределения, и для каждого элемента данной системы известны интенсивности отказов λ_i (или параметры потока отказов ω_i), то получим выражение типа

$$P_c = f(\lambda_i, t), \text{ если } P_i = e^{-\lambda_i t}. \quad (33)$$

В частном случае для системы, приведенной на рис. 9, $\lambda_3 = \lambda_4; \lambda_7 = \lambda_9; \lambda_8 = \lambda_{10}$, что может быть, когда оборудование, например, насосы из одной партии, выпущено одним заводом в одно и то же время. Тогда (32) примет вид

$$P_c(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_{11})t} \cdot [1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2] \cdot \\ \cdot [1 - (1 - e^{-(\lambda_7 + \lambda_8)t})^2] \cdot \\ \cdot [1 - (1 - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{14} t})]. \quad (34)$$

Если известны значения λ_i и время, то нужно подставить эти значения в выражение (34) и определить $P_c(t)$.

Если необходимо найти среднюю наработку до отказа T_{cp} , то можно воспользоваться выражением

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P_c(t) \cdot dt, \quad (35)$$

которое предварительно приводится к удобному для интегрирования виду.

Для упрощения расчетов (34) можно разделить на блоки:

$$R_1 = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_{11})t}, \quad (36)$$

$$R_2 = 1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2, \quad (37)$$

$$R_3 = 1 - (1 - e^{-(\lambda_7 + \lambda_8)t})^2, \quad (38)$$

$$R_4 = 1 - (1 - e^{(\lambda_{12} + \lambda_{13})t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{14}t}). \quad (39)$$

Тогда (34) запишется так

$$P_c = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4. \quad (40)$$

Расчет по (40) сводится в табл. 1.

На основании данных табл. 1 можно сделать вывод о «слабом звене» в этой технологической схеме, т.е. определить звено с низким значением показателя надежности. Следовательно, для повышения надежности всей системы надо позаботиться о повышении надежности «слабого звена». Повысить надежность системы можно за счет установки более надежных единиц оборудования либо за счет увеличения резерва.

Таблица 1

Расчет надежности системы P_c

$t, \text{ч}$	R_1	R_2	R_3	R_4	P_c
200					
400					
600					
800					
1 000					
2 000					

Изменение вероятности безотказной работы данной сложной технологической системы во времени можно представить в виде кривой (рис. 10).

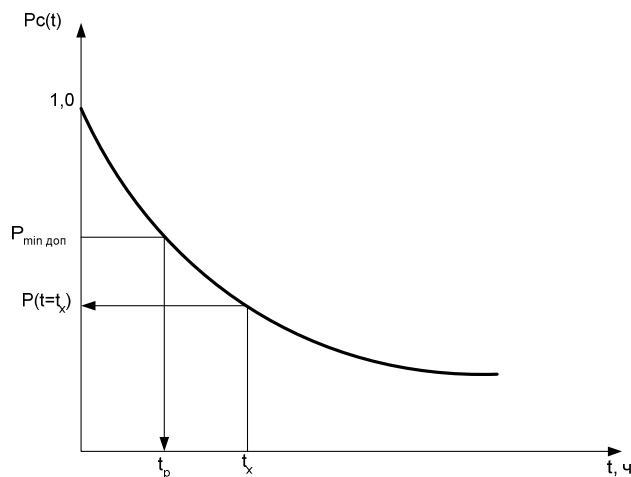


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы системы $P_c(t)$ от времени t

Используя рис. 10, можно решить следующие задачи.

1. Определить вероятность безотказной работы системы после ее непрерывного функционирования в течение заданного числа часов t_x . Ответом будет значение $P(t=t_x)$, построенное так, как это показано на рис. 10. Если необходимо определить вероятность отказа $Q(t=t_x)$, то $Q(t=t_x) = 1 - P(t=t_x)$.

2. Определить ресурс функционирования сложной системы при условии, что вероятность ее безотказной работы к концу этого срока не должна быть ниже заданного допустимого уровня $P_{\min \text{ доп}}$.

Эта задача является обратной к предыдущей. На рис. 10 показано определение ресурса t_p по заданному минимально допустимому уровню $P_{\min \text{ доп}}$.

Если в справочных данных о надежности элементов системы даны возможные минимальные и максимальные значения интенсивности отказов ($\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$) или параметра потока отказов ($\omega_{\min}$ и $\omega_{\max}$), то задачу о надежности необходимо решать дважды: один раз для минимальных, второй раз для максимальных значений показателя надежности. Соответственно этому будут получены минимальные и максимальные значения показателя надежности системы.

На рис. 11 показана зона возможных значений показателей надежности системы $P_c(t)$ (заштрихованная область).

$$P_{c \max}(t) > P_c(t) > P_{c \min}(t).$$

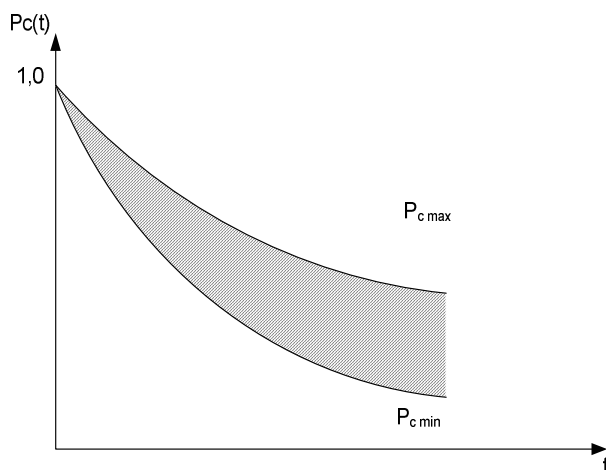


Рис. 11. Возможные значения показателя надежности системы $P_c(t)$

Лекция 3

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Существуют сложные системы, которые невозможно интерпретировать в виде набора элементов с последовательным или параллельным соединением.

На рис. 1, а показана система, которая нормально функционирует только в том случае, если в работоспособном состоянии находятся два любых ее элемента. Отказ системы наступает, когда отказывают два или три элемента. Такие системы обычно именуют системами «2 из 3-х».

На рис. 1, б представлена система, которая нормально функционирует, если в работоспособном состоянии находятся 2 из 4 или 3 из 4 элементов. В общем виде такие системы называют системами « m из n » элементов.

На рис. 2 представлена так называемая «мостиковая» система. Система откажет, если откажут элементы 1 и 2 или 4 и 5. Если откажут элементы 2 и 4, то процесс пойдет по пути 1, 3, 5. Если откажут элементы 1 и 5, то процесс пойдет по пути 2, 3, 4. Если откажут элементы 1, 3, 5 или 2, 3, 4, то проведение процесса невозможно.

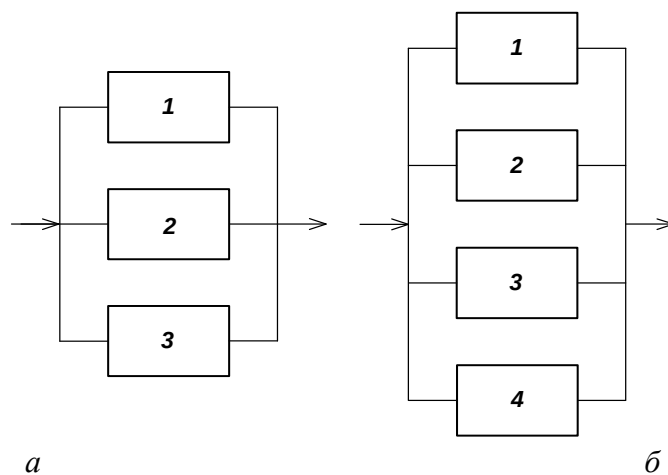


Рис. 1. Системы « t из n »

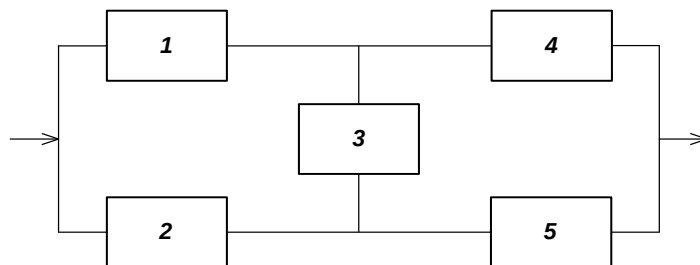


Рис. 2. «Мостиковая» система

На рис. 3 представлена система разветвляющегося типа. Эта система перестает функционировать в тех случаях, если отказали, например, элементы 2 и 3; 2, 6 и 7 и т.д.

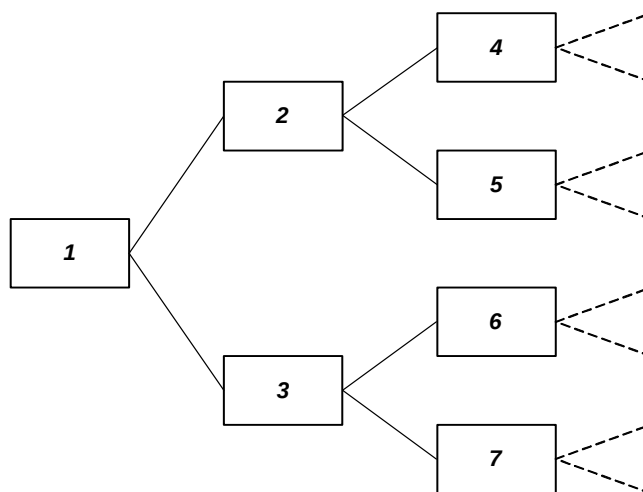


Рис. 3. Система разветвляющегося типа

Остановимся более подробно на анализе надежности системы «2 из 3-х», представленной на рис. 1, а.

В теории надежности существуют следующие методы расчета надежности сложных технических систем:

1. метод прямого перебора всех возможных состояний элементов;
2. комбинаторно-аналитический метод;
3. метод минимальных путей;
4. метод минимальных сечений.

Рассмотрим подробнее все эти методы.

Метод прямого перебора всех возможных состояний элементов, т.е. работоспособного и неработоспособного.

Основная идея этой методики заключается в том, что множество всех возможных состояний элементов разбивают на два подмножества: подмножество работоспособных состояний и подмножество неработоспособных состояний. Затем вычисляют вероятности всех возможных работоспособных состояний (или неработоспособных; смотря, каких состояний меньше, чтобы уменьшить объем вычислительных работ) и складывают их. Сумма всех этих вероятностей и будет вероятностью работоспособного состояния системы (числовым показателем надежности, например, вероятности безотказной работы системы).

Пусть вероятности безотказной работы всех элементов системы будут одинаковыми, обозначим их буквой P . Тогда вероятность отказа будет

$$Q = 1 - P. \quad (1)$$

Известно, что число всех возможных вариантов сочетания элементов будет

$$N = 2^n, \quad (2)$$

где n – число элементов в системе.

Тогда для системы (рис.1, а) имеем $n = 3$ и $N = 2^3 = 8$.

Составим расчетную табл. 1.

В колонке 1 – номера вариантов: с 1-го по 8-й. В колонке 2 записаны номера отказавших элементов. В колонках 3, 4 и 5 – состояние 1, 2 и 3-го элементов. Элементы могут быть только в двух состояниях: работоспособном и отказа. Символом «1» обозначено работоспособное состояние элемента, а символом «0» – состояние отказа. В колонке 6 указано состояние системы с такой же символикой. Система работоспособна, если работоспособны 2 из 3-х ее элементов. В колонке 7 вероятность состояния системы получена перемножением вероятностей состояний элементов данного варианта системы.

Таблица 1

№ варианта	Номера отказавших элементов	Состояние элемента			Состояние системы	Вероятность состояния системы
		1-го	2-го	3-го		
1	0	1	1	1	1	P^3
2	1	0	1	1	1	$P^2 \cdot Q$
3	2	1	0	1	1	$P^2 \cdot Q$
4	3	1	1	0	1	$P^2 \cdot Q$
5	1, 2	0	0	1	0	–
6	1, 3	0	1	0	0	–
7	2, 3	1	0	0	0	–
8	1, 2, 3	0	0	0	0	–

Просуммируем все вероятности работоспособных состояний системы:

$$P_c = P^3 + 3 \cdot P^2 \cdot Q. \quad (3)$$

Учитывая (1), имеем

$$P_c = P^3 + 3 \cdot P^2 \cdot (1 - P) = P^3 + 3 \cdot P^2 - 3 \cdot P^3 = 3 \cdot P^2 - 2 \cdot P^3. \quad (4)$$

Если $P_c(t)$ – вероятность безотказной работы системы, то вычисляется и среднее значение времени функционирования системы до отказа

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P_c(t) \cdot dt. \quad (5)$$

Комбинаторно-аналитический метод расчета надежности сложных систем.

Согласно формуле Бернулли вероятность функционирования m из n элементов $P_{m,n}$ имеет вид

$$P_{m,n} = C_n^m \cdot P^m \cdot (1 - P)^{n-m}, \quad (6)$$

где C_n^m – число вариантов по m элементов из общего числа n элементов.

Для определения надежности системы надо просуммировать вероятности, обеспечивающие ее работоспособное состояние

$$P_c = P_m + P_{m+1} + \dots + P_{n-2} + P_{n-1} + P_n = \sum_{i=m}^n P_i, \quad (7)$$

$$i \in \{m, m+1, \dots, n-1, n\}.$$

Подставим в (7) выражение (6)

$$P_c = C_n^m \cdot P^m \cdot (1-P)^{n-m} + C_n^{m+1} \cdot P^{m+1} \cdot (1-P)^{n-m-1} + \dots \\ + C_n^{n-1} \cdot P^{n-1} \cdot (1-P)^{n-(n-1)} + C_n^n \cdot P^n \cdot (1-P)^{n-n}$$

или сокращенно

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot P^i \cdot (1-P)^{n-i}, \\ i \in \{m, m+1, \dots, n-1, n\} \quad (8)$$

Для системы, представленной на рис. 1, а, $m=2$, $n=3$. Тогда запишем

$$P_c = C_3^2 \cdot P^2 \cdot (1-P)^{3-2} + C_3^3 \cdot P^3 \cdot (1-P)^{3-3}.$$

Т.к. $C_3^2 = 3$; $C_3^3 = 1$; $(1-P)^{3-3} = 1$, то получим

$$P_c = 3 \cdot P^2 \cdot (1-P) + P^3.$$

После преобразований получаем

$$P_c = 3 \cdot P^2 - 2 \cdot P^3. \quad (9)$$

Получаем совпадение с (4), полученной методом прямого перебора всех возможных состояний элементов.

Методы минимальных путей и минимальных сечений

Минимальным путем называется последовательный минимальный набор работоспособных элементов данной системы, который обеспечивает функционирование системы, а отказ любого одного из этих элементов приводит к отказу системы.

Минимальным сечением называется последовательный минимальный набор неработоспособных элементов, который приводит к отказу системы, а восстановление одного из них приводит к восстановлению работоспособности всей системы.

В сложных системах может быть несколько минимальных путей и минимальных сечений.

Для системы, приведенной на рис. 1, а:

- минимальные пути: 1. 1, 2; 2. 1, 3; 3. 2, 3;
- минимальные сечения: 1. 1, 2; 2. 1, 3; 3. 2, 3.

Для системы с последовательным соединением элементов имеется всего один путь и n сечений, если n – число элементов системы.

Для системы с параллельным соединением n элементов число путей n , т.е. равно числу элементов системы, а сечений – одно.

Для исследуемой системы необходимо выявить все минимальные пути или минимальные сечения. Далее необходимо составить фиктивную структурную схему соединения: для минимальных путей – параллельное соединение всех минимальных путей; для минимальных сечений – последовательное соединение всех минимальных сечений.

Составим фиктивные структурные схемы на основе минимальных путей (рис. 4) и минимальных сечений (рис. 5) для системы, приведенной на рис. 1, а.

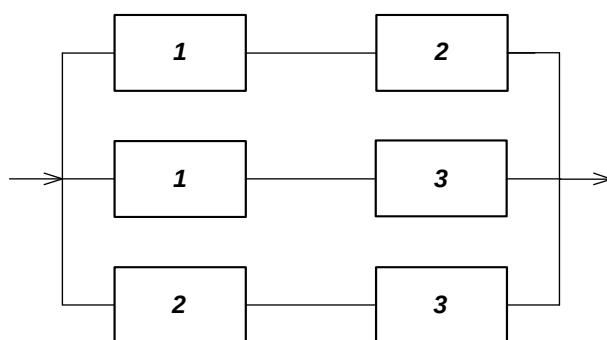


Рис. 4. Фиктивная структурная схема на основе минимальных путей

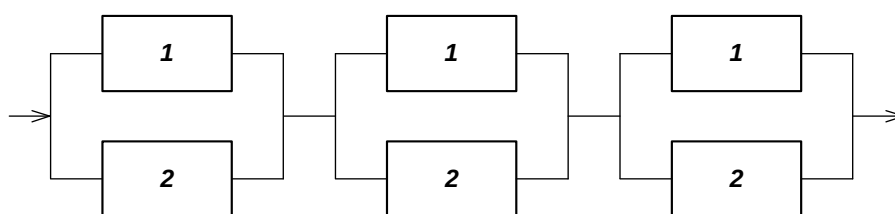


Рис. 5. Фиктивная структурная схема на основе минимальных сечений

Составим условные системные функции для фиктивных схем, представленных на рис. 4 и 5.

Условная системная функция по рис. 4 имеет вид

$$\Phi_{\text{пут}}(X) = 1 - (1 - X_1 \cdot X_2) \cdot (1 - X_1 \cdot X_3) \cdot (1 - X_2 \cdot X_3), \quad (10)$$

где X_i – показатель надежности элемента; $X_i = 1$, если элемент работоспособен, и $X_i = 0$, если элемент неработоспособен;

i – номера элементов, $i \in \{1, 2, 3\}$.

Условная системная функция по рис. 5 имеет вид

$$\Phi_{сеч}(X) = [1 - (1 - X_1) \cdot (1 - X_2)] \cdot [1 - (1 - X_1) \cdot (1 - X_3)] \cdot [1 - (1 - X_2) \cdot (1 - X_3)]. \quad (11)$$

Особенностью условной системной функции является то, что она составлена на использовании альтернативных переменных, которые могут принимать значения 1 или 0. Следовательно, условная системная функция $\Phi(X)$ тоже может принимать значения 1 или 0. А это значит, что при решении уравнений (10) и (11) степени при X_i не имеют значения, т.к. 1 и 0 в любых степенях дают 1 и 0.

Преобразование (10) и (11) и удаление степеней приведет к следующему

$$\Phi_{нут}(X) = \Phi_{сеч}(X) = \Phi_c(X) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3 - 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (12)$$

Далее условная системная функция, составленная для фиктивной схемы, заменяется функцией надежности первоначальной структурной схемы системы $P_c(t)$. Переменные X_i заменяются соответствующими функциями $P_i(t)$, т.е. функциями надежности элементов. После замены функции и переменных в (12) приходим к выражению следующего вида

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) + P_1(t) \cdot P_3(t) + P_2(t) \cdot P_3(t) - 2 \cdot P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t). \quad (13)$$

К выражению (13) можно прийти как через минимальные пути, так и через минимальные сечения.

В частном случае, если

$$P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P(t) = P,$$

уравнение (13) можно записать в виде

$$P_c = 3 \cdot P^2 - 2 \cdot P^3. \quad (14)$$

Такое же уравнение было получено и методом прямого перебора всех возможных состояний элементов и комбинаторно-аналитическим методом.

Пример. На рис. 6 представлены различные варианты схем соединения компрессоров в компрессорном отделении установки. В схемах используются компрессоры производительностью Q , $Q/2$, $Q/3$. Производству требуется сжатый газ в количестве Q . Требуется определить:

1. вид системы (в смысле надежности);
2. произвести расчет надежности каждой системы, имея в виду, что надежность всех элементов одинакова и равна $P = 0,9$.

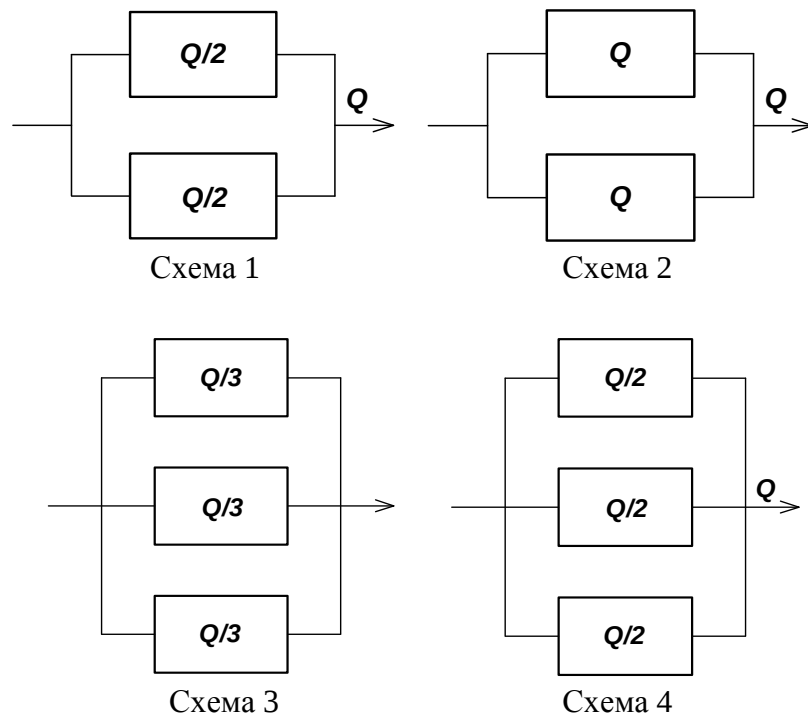


Рис. 6. Схемы соединений компрессоров

Схема 1. Чтобы иметь на выходе из системы производительность Q , необходимо, чтобы работали оба компрессора. Следовательно, элементы (в смысле надежности) соединены последовательно.

Надежность системы: $P_c = P \cdot P = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$.

Схема 2. Чтобы иметь на выходе из системы производительность Q , достаточно, чтобы работал один из компрессоров. Следовательно, элементы соединены параллельно.

Надежность системы: $P_c = 1 - (1 - P)^2 = 1 - (1 - 0,9)^2 = 0,99$.

Схема 3. Чтобы иметь на выходе системы производительность Q , необходимо, чтобы работал каждый из компрессоров. Следовательно, элементы соединены последовательно.

Надежность системы: $P_c = P \cdot P \cdot P = 0,9^3 = 0,73$.

Схема 4. Чтобы иметь на выходе системы производительность Q , необходимо, чтобы работали два компрессора из трех, т.е. имеем систему «2 из 3-х».

Надежность системы: $P_c = 3 \cdot P^2 - 2 \cdot P^3 = 3 \cdot 0,9^2 - 2 \cdot 0,9^3 = 0,97$.

Вывод: самой надежной является компрессорная станция, представленная на схеме 2 с надежностью $P_c = 0,99$.

Лекция 4

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Требования к уровню надежности машин постоянно растут, и отыскание наиболее рациональных путей решения этой проблемы всегда актуально.

Существуют следующие *пути повышения надежности*, проводимые на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации машин.

1. *Повышение стойкости машин к внешним воздействиям.*

Это методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции и применения материалов с соответствующими свойствами.

Однако возможности сопротивления внешним воздействиям не безграничны. Практически невозможно обеспечить во всех механизмах только жидкостное трение и иметь неизнашивающиеся сопряжения, сложно создать материалы, которые не деформировались бы и не изменяли своих размеров при колебании температуры и т.д.

2. *Защита и изоляция машин от вредных воздействий.*

Это следующие методы – установка машины на фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, создание для машин специальных условий по температуре и влажности и др.

Однако возможности по изоляции машины от внешних воздействий также ограничены. Они требуют, как правило, существенных затрат, не всегда исключают основные причины, снижающие надежность машины. Кроме того, в машине имеются внутренние источники возмущений, влияния которых трудно избежать.

3. *Применение рациональных конструктивных решений.*

С позиций надежности оптимальной будет такая конструкция машины и ее элементов, когда с наименьшими затратами средств достигается наибольшая продолжительность работы отдельных узлов, механизмов и машины в целом при заданной безотказности и регламентированных затратах на ремонт и техническое обслуживание.

Конструкция должна быть также рациональной с точки зрения ее ремонтнопригодности и приспособленности к диагностированию.

4. *Применение автоматики.*

Применение самонастраивающихся и саморегулируемых машин, которые подобно живым организмам обладают функциями приспособления к изменившимся условиям работы и восстановления утраченной работоспособности, позволяет машине не только обладать способностью выполнять

заданную работу (например, обеспечивать ход технологического процесса), но и осуществлять свои функции длительное время, не опасаясь как внешних воздействий, так и процессов, происходящих в самой машине.

У этих машин в системы управления включаются, как правило, датчики с обратной связью, в результате чего машина может автоматически регулировать свои действия, учитывать реальную обстановку, изменять характер и режимы функционирования.

5. *Введение резерва.*

Рассмотрим подробнее последний путь повышения надежности машин.

На стадии проектирования сложных объектов для обеспечения требуемой надежности приходится во многих случаях как минимум дублировать отдельные элементы и даже отдельные системы, т.е. использовать резервирование.

Резервирование – метод повышения надежности объекта за счет введения избыточности. *Избыточность* – дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

В зависимости от *природы избыточности* резервирование бывает:

- структурное (аппаратное);
- информационное;
- временное.

Структурное резервирование заключается в том, что в минимально необходимый вариант системы, состоящей из основных элементов, вводятся дополнительные элементы, устройства или даже вместо одной системы предусматривается использование нескольких одинаковых систем.

Информационное резервирование предусматривает использование избыточной информации. Его простейшим примером является многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи.

Временное резервирование предусматривает использование избыточного времени. Возобновление прерванного в результате отказа функционирования системы происходит путем ее восстановления, если имеется определенный запас времени.

Рассмотрим структурное резервирование.

Существует два метода повышения надежности систем путем структурного резервирования:

1. *общее резервирование*, при котором резервируется система в целом;
2. *раздельное (поэлементное) резервирование*, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы.

Схемы общего и отдельного структурного резервирования представлены соответственно на рис. 1, а, б, где n – число последовательных элементов в цепи; m – число резервных цепей (при общем резервировании) или резервных элементов для каждого основного (при отдельном резервировании).

При $m = 1$ имеет место дублирование, а при $m = 2$ – троирование.

Обычно стремятся по возможности применять отдельное резервирование, т.к. при этом выигрыш в надежности часто достигается значительно меньшими затратами, чем при общем резервировании.

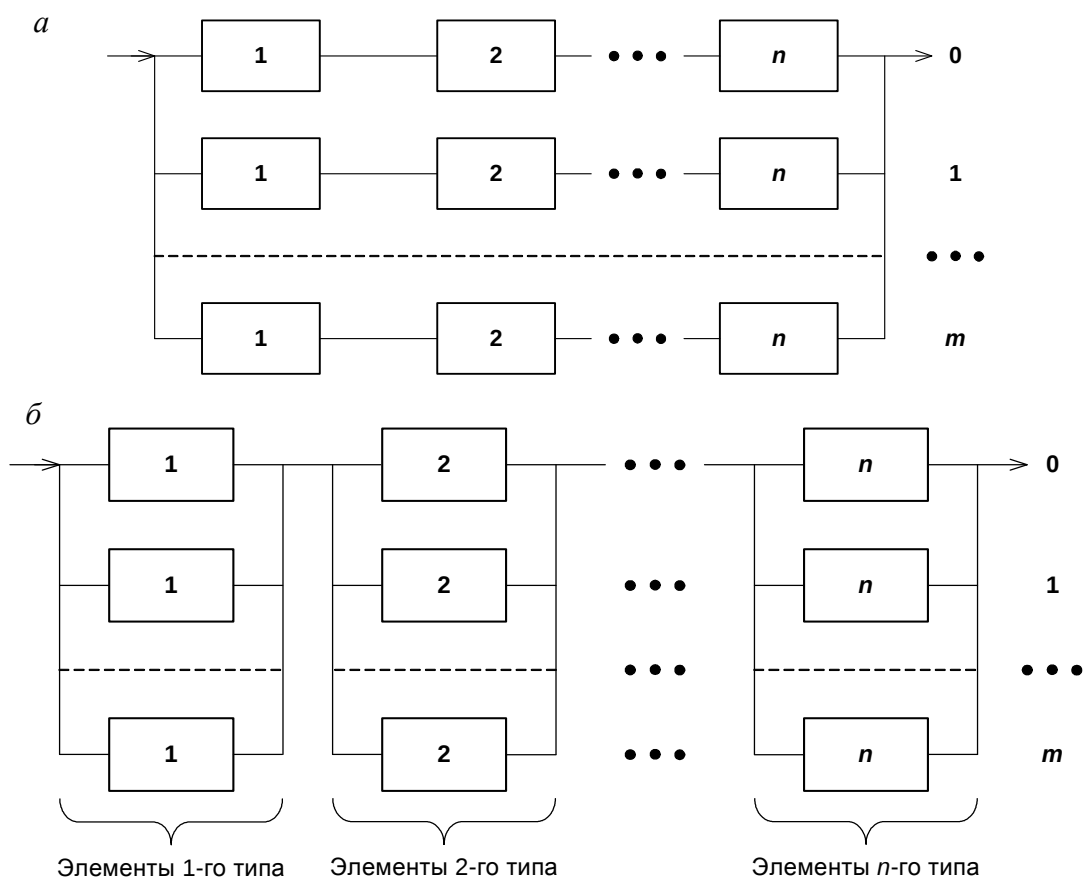


Рис. 1. Схема структурного резервирования: а – общего; б – отдельного

В зависимости от *способа включения резервных элементов* различают постоянное резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование.

Постоянное резервирование – это такое резервирование, при котором резервные элементы участвуют в работе объекта наравне с основными. В случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, поскольку он включается в работу одновременно с основным.

Резервирование замещением – это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного. При резервировании замещением необходимы контролирующие и переключающие устройства для обнаружения факта отказа основного элемента и переключения с основного на резервный.

Скользящее резервирование представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент.

В зависимости от *режима работы* резервных элементов различают нагруженный (горячий), облегченный (теплый) и ненагруженный (холодный) резерв.

Нагруженный резерв – такой резерв, когда резервные элементы работают в том же режиме нагрузки, что и основной элемент. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения в работу всей системы, и вероятность безотказной работы резервных элементов в этом случае не зависит от того, в какой момент времени они включаются в работу.

Облегченный резерв – такой резерв, когда резервные элементы работают в более слабом нагрузочном режиме, чем основной элемент. Поэтому, хотя ресурс резервных элементов также начинает расходоваться с момента включения всей системы в целом, интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента их включения вместо отказавших значительно ниже, чем в рабочих условиях. Этот вид резерва обычно размещается на агрегатах, работающих на холостом ходу, и, следовательно, в данном случае ресурс резервных элементов срабатывается меньше по сравнению с рабочими условиями, когда агрегаты несут нагрузку. Вероятность безотказной работы резервных элементов в случае этого вида резерва будет зависеть как от момента их включения в работу, так и от того, насколько отличаются законы распределения вероятности безотказной работы их в рабочем и резервном условиях.

Ненагруженный резерв – такой резерв, когда резервные элементы практически не несут никакой нагрузки. Резервные элементы начинают расходовать свой ресурс с момента их включения в работу вместо основных. Этим видом резерва служат обычно отключенные агрегаты.

На рис. 2 представлена зависимость вероятности безотказной работы от времени для различных типов резервирования для системы из одного основного элемента (1) и одного резервного (2).

Нагруженный резерв. При $0 < t < t_0$ функционируют оба элемента, и их вероятность безотказной работы уменьшается в одинаковом темпе. После отказа первого элемента при $t > t_0$ вероятность безотказной работы второго продолжает уменьшаться вдоль той же кривой.

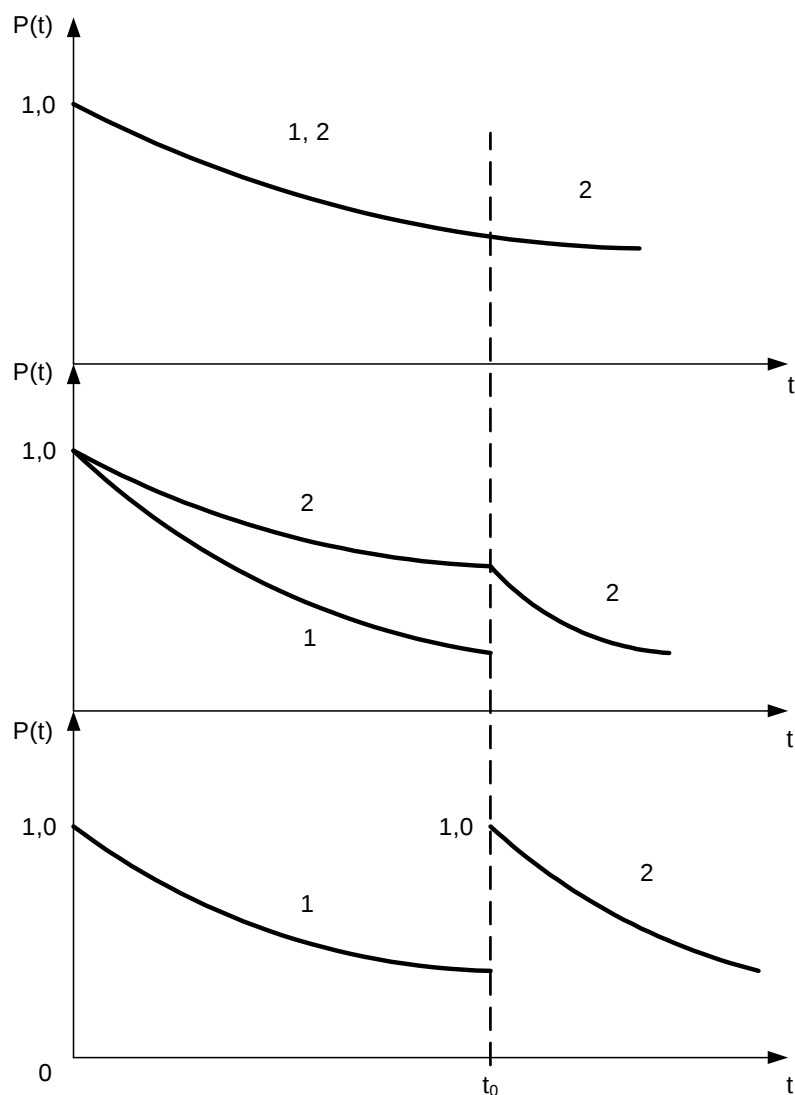


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы от времени для различных типов резервирования для системы из двух элементов (основного и резервного)

Облегченный резерв. При $0 < t < t_0$ функционируют оба элемента, но у основного (кривая 1) вероятность безотказной работы уменьшается быстрее, чем у резервного (кривая 2), работающего при пониженной нагрузке. После отказа основного элемента при $t > t_0$ резервный элемент начинает работать при полной нагрузке и его вероятность безотказной работы уменьшается по кривой 2.

Ненагруженный резерв. При $0 < t < t_0$ работает только основной элемент (кривая 1). После отказа основного элемента при $t > t_0$ работает только резервный элемент (кривая 2), Кривая 2 начинается от $t = t_0$.

Решим задачу определения числа резервных элементов для обеспечения заданной надежности системы.

Пример 1. Определить число резервных насосов, которые необходимо установить на насосной станции, состоящей из трех последовательно включенных насосов, чтобы вероятность ее безотказной работы $P_c(t)$ была равна 0,95, в то время как насосы характеризуются вероятностью безотказной работы $P_i(t) = 0,9$.

Расчет произвести для случая постоянного резервирования (общего и раздельного). Резерв считать нагруженным.

Для системы при постоянном общем резервировании

$$P_c(t) = 1 - (1 - P_i(t)^n)^{m+1}. \quad (1)$$

Логарифмируя выражение (1), получаем

$$\ln(1 - P_c(t)) = (m + 1) \cdot \ln(1 - P_i(t)^n). \quad (2)$$

Число резервных цепей (при $n = 3$)

$$m = \frac{\ln(1 - P_c(t))}{\ln(1 - P_i(t)^n)} - 1 = \frac{\ln(1 - 0,95)}{\ln(1 - 0,9^3)} - 1 = 2. \quad (3)$$

Следовательно, для обеспечения требуемой надежности необходимы 2 резервные цепи по 3 насоса в каждой, т.е. всего 6 насосов.

Для системы при постоянном раздельном резервировании

$$P_c(t) = \left\{ 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1} \right\}^n. \quad (4)$$

Представим формулу (4) в виде

$$\sqrt[n]{P_c(t)} = 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1}. \quad (5)$$

После логарифмирования получаем

$$m = \frac{\ln(1 - \sqrt[n]{P_c(t)})}{\ln(1 - P_i(t))} - 1 = \frac{\ln(1 - \sqrt[3]{0,95})}{\ln(1 - 0,9)} - 1 = 1, \quad (6)$$

т.е. каждый основной насос необходимо продублировать, а всего резервных насосов будет 3.

Таким образом, при отдельном резервировании в данном случае можно для обеспечения надежности использовать в 2 раза меньше резервных насосов.

Сравним схемы с отдельным и общим резервированием с точки зрения их надежности (рис. 3).

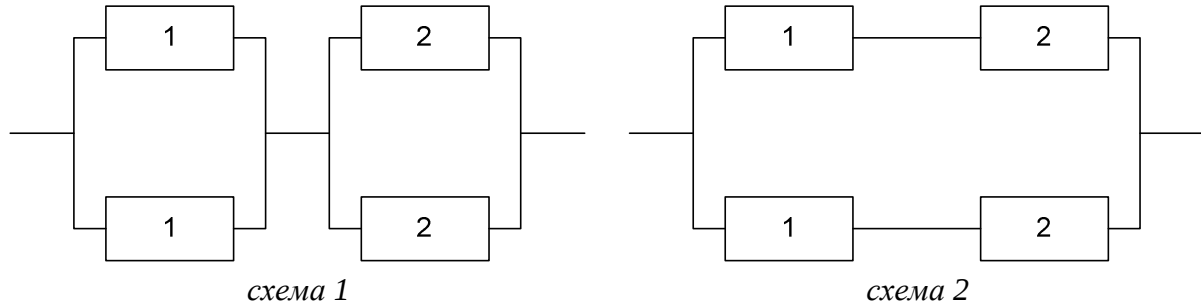


Рис. 3. Схемы с резервированием

Пусть элементы систем, представленных на схемах 1 и 2, будут иметь одинаковое значение показателя надежности, который обозначим P . Запишем уравнения для расчета надежности этих систем (нижний индекс 1 относится к элементам 1-й схемы, индекс 2 – к элементам 2-й схемы)

$$P_{1c} = \left[1 - (1 - P)^2 \right]^2; \quad (7)$$

$$P_{2c} = 1 - (1 - P^2)^2.$$

Упростим выражения (7)

$$P_{1c} = \left[1 - (1 - 2 \cdot P + P^2) \right]^2 = \left[P \cdot (2 - P) \right]^2 = P^2 \cdot (2 - P)^2; \quad (8)$$

$$P_{2c} = 1 - (1 - 2 \cdot P^2 + P^4) = P^2 \cdot (2 - P^2).$$

Рассмотрим отношение

$$\frac{P_{1c}}{P_{2c}} = \frac{P^2 \cdot (2 - P)^2}{P^2 \cdot (2 - P^2)} = \frac{(2 - P)^2}{2 - P^2}. \quad (9)$$

Рассмотрим отношение (9) в предельных случаях:

1. если $P \rightarrow 1$, то $\frac{P_{1c}}{P_{2c}} = 1$;

2. если $P \rightarrow 0$, то $\frac{P_{1c}}{P_{2c}} = \frac{4}{2} = 2$.

Таким образом, $1 < \frac{P_{1c}}{P_{2c}} < 2$. Следовательно, более надежна схема 1 (с отдельным резервированием).

Схема такого типа часто встречается в химической промышленности, например, так соединяют группы насосов или компрессоров низкого и высокого давления. В общем виде такая схема представлена на рис. 4.

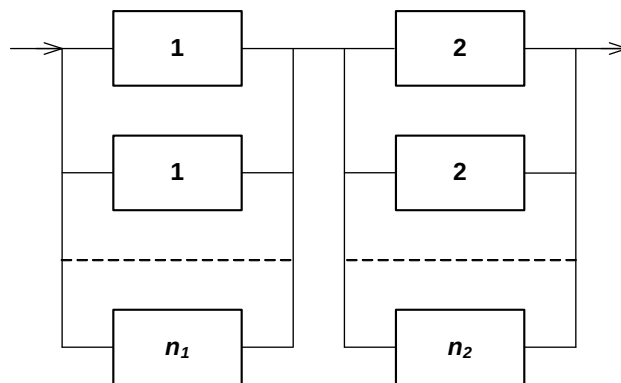


Рис. 4. Схема соединения групп агрегатов с отдельным резервированием

Оптимизируем эту схему, поставив следующие задачи:

- создать схему, обеспечивающую необходимый уровень надежности при минимальных затратах на ее создание;
- на выделенные средства построить схему наибольшей надежности.

Запишем выражение для расчета надежности схемы, представленной на рис.4,

$$P_c = \left[1 - (1 - P_1)^{n_1} \right] \cdot \left[1 - (1 - P_2)^{n_2} \right]. \quad (10)$$

В уравнении (10) два неизвестных: число элементов n_1 в первой и n_2 во второй группах.

Решить одно уравнение с двумя неизвестными можно только методом перебора. Составим таблицу в виде матрицы с различными комбинациями числа элементов в группах (табл. 1).

В табл. 1 по верхней строчке матрицы перечислено число элементов первой группы $n_1 = 1; n_1 = 2$; по левой крайней вертикальной строчке матрицы – число элементов второй группы $n_2 = 1; n_2 = 2$; рядом с этими строчками – графы, в которых указаны значения надежности групп.

Таблица 1

Матрица комбинаций

$n_2 \backslash n_1$		1	2
		P_1	$1 - (1 - P_1)^2$
1	P_2	$P_1 \cdot P_2$	$P_2 \cdot (1 - (1 - P_1)^2)$
2	$1 - (1 - P_2)^2$	$P_1 \cdot (1 - (1 - P_2)^2)$	$(1 - (1 - P_1)^2) \cdot (1 - (1 - P_2)^2)$

На пересечении этих данных, внутри матрицы, помещены показатели надежности сложной системы, т.е. произведение надежностей групп элементов системы. В табл. 1 заполнен только левый верхний угол матрицы, т.к. надежность всей системы будет меньше любого из показателей надежности группы элементов системы. Следовательно, если необходимо достичь заданное значение показателя надежности P_c системы, то имеет место соотношение $P_c < R_1$ и $P_c < R_2$, где

$$R_1 = 1 - (1 - P_1)^{n_1}; R_2 = 1 - (1 - P_2)^{n_2}; P_c = R_1 \cdot R_2.$$

Значит, все показатели, находящиеся в столбцах и строках матрицы, которым соответствуют значения надежности групп меньше требуемого значения надежности системы, заполнять не надо.

Пример 2. Необходимо создать компрессорную станцию, представляющую собой систему компрессоров, состоящую из группы компрессоров низкого давления и группы компрессоров высокого давления. Компрессоры низкого давления характеризуются параметром потока отказов ω_1 , компрессоры высокого давления – ω_2 .

1. Требуется определить необходимое число компрессоров первой и второй групп, чтобы вероятность безотказной работы за заданное время t не была ниже минимально допустимого значения $P_{c_{\min \text{ don}}}$. Резервирование считать упрощенно как нагруженное. Вариант выбрать по критерию минимальных затрат (по стоимости оборудования). Стоимость компрессора низкого давления – C_1 , компрессора высокого давления – C_2 .

Исходные данные:

$$\omega_1 = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}; \quad t = 10\,000 \text{ ч}; \quad C_1 = 1;$$

$$\omega_2 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}; \quad P_{c_{\min \text{ don}}} = 0,96; \quad C_2 = 3.$$

Обозначим n_1 и n_2 – число элементов в соответствующих группах.

Найдем числовые значения надежности компрессоров через 10 000 ч. Расчет проводим по экспоненциальному закону распределения наработки на отказ t .

$$P_1(t) = e^{-\omega_1 \cdot t} = e^{-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^4} = 0,8;$$

$$P_2(t) = e^{-\omega_2 \cdot t} = e^{-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10^4} = 0,9.$$

Проведем расчеты для отдельных групп при различном числе резервных элементов. Расчеты сведем в табл. 2.

Таблица 2

Надежность групп компрессоров

Число компрессоров в группе	Номера групп	
	1	2
1	$P_1 = 0,8$	$P_2 = 0,9$
2	$1 - (1 - P_1)^2 = 0,96$	$1 - (1 - P_2)^2 = 0,99$
3	$1 - (1 - P_1)^3 = 0,992$	$1 - (1 - P_2)^3 = 0,999$

Используя табл. 2, построим матрицу комбинаций (табл. 3).

Таблица 3

Матрица комбинаций

Группа 1 \ Группа 2		1	2	3
		0,8	0,96	0,992
1	0,9	—	—	—
2	0,99	—	0,95	0,98
3	0,999	—	0,96	0,99

В табл. 3 не нужно заполнять ячейки, отмеченные прочерком, т.к. один из сомножителей выражения общей надежности системы меньше заданного числа. Значит, мы не сможем достичь нужного показателя надежности в этих вариантах.

Табл. 3 показывает, что заданному условию $P_{c_{\min \text{ доп}}} \geq 0,96$ удовлетворяют два условия:

- $n_1 = 2; n_2 = 3;$
- $n_1 = 3; n_2 = 2.$

Из этих двух комбинаций мы должны выбрать оптимальную комбинацию по критерию наименьших затрат.

Полные затраты можно рассчитать так:

$$C_c = C_1 \cdot n_1 + C_2 \cdot n_2. \quad (11)$$

По уравнению (11) рассчитаем выбранные ранее комбинации

$$C_{c_1} = 1 \cdot 2 + 3 \cdot 3 = 11; \quad C_{c_2} = 1 \cdot 3 + 3 \cdot 2 = 9.$$

Т.к. $C_{c_2} < C_{c_1}$, то принимаем второй вариант. Кроме того, данный вариант обеспечивает более высокое значение вероятности безотказной работы.

2. Требуется определить необходимое число компрессоров первой и второй групп, обеспечивающих наибольшую надежность при затраченных фиксированных средствах. Выделенные средства составляют $C_c = 11$ денежных единиц.

Составим табл. 4, в которую запишем стоимости возможных комбинаций групп элементов.

Таблица 4

Стоимости возможных комбинаций групп элементов

n_2	n_1	1	2	3	4	5
1	1	4	5	6	7	8
2	2	7	8	9	10	11
3	3	10	11	12	13	14

Из табл. 4 видно, что имеются два варианта, соответствующие выделенным средствам:

- $n_1 = 5; n_2 = 2;$
- $n_1 = 2; n_2 = 3.$

Совместим табл. 3 и табл. 4 в табл. 5, в которой в виде дроби записаны две величины: надежность системы и ее стоимость.

Таблица 5

Надежность и стоимость возможных комбинаций групп элементов

n_2	n_1	1	2	3	4	5
1	1	0,72/4	0,86/5	0,89/6	0,9/7	0,9/8
2	2	0,79/7	0,95/8	0,98/9	0,99/10	0,99/11
3	3	0,8/10	0,96/11	0,99/12	0,99/13	0,99/14

Из табл. 5 видно, что более высокое значение показателя надежности имеет вариант: $n_1 = 5; n_2 = 2.$

Важной особенностью структурного резервирования является то, что в начальный период эксплуатации необязательно, чтобы были полностью смонтированы и подсоединены все резервные элементы.

В рассмотренном выше примере необходимо обеспечить показатель надежности выше 0,96 в течение 10 000 ч. Обеспечить такую надежность в течение 5 000 ч можно и при меньшем числе резервных элементов. Выясним, может ли установка проработать 5 000 ч с меньшим резервом, но при условии, что общая надежность не снизится и будет $\geq P_{\min \partial on} = 0,96$.

Найдем значения вероятности безотказной работы P_1 и P_2 для системы $n_1 = 3$ и $n_2 = 2$ в момент времени $t = 5\,000$ ч.

$$P_1 = e^{-\omega_1 \cdot t} = e^{-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 5000} = 0,9;$$

$$P_2 = e^{-\omega_2 \cdot t} = e^{-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 5000} = 0,95;$$

$$\begin{aligned} P_c &= [1 - (1 - P_1)^3] \cdot [1 - (1 - P_2)^2] = [1 - (1 - 0,9)^3] \cdot [1 - (1 - 0,95)^2] = \\ &= 0,999 \cdot 0,9975 = 0,9965. \end{aligned}$$

Таким образом, данную систему можно принять в работу при двух компрессорах в каждой группе на 5 000 ч работы, ее надежность не достигнет минимально допустимого значения.

Такие ситуации возможны в практике строительства предприятий, когда задержку поставки резервных агрегатов можно допустить.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что в рассмотренных примерах принято условие, что резерв нагруженный, а в действительности, как правило, имеет место ненагруженный резерв. В реальных условиях будет функционировать только один компрессор низкого давления и один компрессор высокого давления, резервные будут находиться в состоянии простоя либо ремонта.

Расчет ненагруженного резерва более сложен. Поэтому в расчетах принимают условие, что резерв нагруженный, но помнят при этом, что расчет приводит к заниженным значениям показателя надежности.

Рассмотренные выше методики и решения вполне могут быть использованы при выборе оптимальной схемы, т.к. если данный вариант имеет более высокий показатель надежности при нагруженном резерве, то в случае ненагруженного резерва этот вариант тоже будет иметь более высокий показатель.

Ремонтопригодность машин

Для обеспечения надежности машин большое значение имеет приспособленность машины для осуществления ремонтных и профилактических процедур, а также «человеческий фактор», т.е. способность человека выполнять функции по управлению машиной и ее техническому обслуживанию.

Ремонтопригодность изделия – это его свойство, которое заключается в приспособленности к обнаружению и устранению последствий отказов и повреждений путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

При конструировании машины на ее ремонтопригодность основное влияние оказывают следующие *факторы*:

1. общая компоновка машины с точки зрения доступности к ее узлам и механизмам для контроля их состояния, обслуживания и проведения ремонтных работ;
2. простота разборки и монтажа узлов и сопряжений, в первую очередь тех, которые могут входить в межремонтное обслуживание;
3. применение принципа агрегатирования, когда машина легко расчленяется на отдельные узлы, агрегаты и блоки, причем присоединение их к машине не требует применения специальных приемов;
4. широкое использование стандартных узлов, применение принципа унификации;
5. применение принципов автоматической подналадки и компенсации износа, саморегулирования параметров машин, автоматизация профилактических операций;
6. простота обнаружения отказов или повреждений за счет применения встроенных приборов, контролирующих выходные параметры машины, и систем по диагностике состояния машины;
7. возможность производить регулировку, замену износившихся элементов, осуществлять диагностику и другие работы простыми методами, без применения высококвалифицированной рабочей силы.

Ремонтопригодность машины в сильной степени зависит от ее сложности: числа деталей, механизмов и узлов в машине, ее габаритов и веса, энергетической оснащенности и других факторов.

На продолжительность и трудоемкость ремонтных и профилактических работ существенное влияние оказывает не только конструкция машины, но и технологические процессы, применяемые при ремонте машины, методы организации ремонта, его техническая оснащенность, квалифика-

ция ремонтников и другие организационно-технические факторы. Так, например, для замены поврежденного элемента или детали необходимо иметь *запасные части*, номенклатура которых отражала бы характер типичных повреждений, возникающих в машине. Их количество должно соответствовать потребности, исходя из сроков службы и методов ремонта машины.

Наличие запасных частей значительно сокращает время и стоимость ремонта и, как правило, полностью восстанавливает утраченную работоспособность, поскольку эти детали изготовлены в тех же условиях, что и установленные в машине, и обладают необходимыми показателями качества. Это дает большой экономический эффект, увеличивает межремонтный период, создает возможности для эксплуатации машин в разнообразных условиях.

Основными характеристиками ремонтпригодности машины могут служить следующие непосредственно связанные с надежностью показатели.

1. Продолжительность ремонтных и профилактических мероприятий, а также суммарное время, необходимое для восстановления утрачиваемой работоспособности машины, с учетом принятой системы ремонта. Эти данные являются одной из основных составляющих коэффициента технического использования.
2. Трудоемкость восстановления, выраженная в затратах средств на ремонт и техническое обслуживание с учетом всего комплекса мероприятий, предусмотренного системой ремонта.

Возможности по поддержанию и восстановлению утрачиваемой машиной работоспособности существенно зависят от «человеческого фактора», поскольку человек и машина становятся объединенными в единую систему. Работоспособность и надежность этой системы в сильной степени зависят как от показателей качества человека, так и от приспособленности машины к взаимодействию с человеком.

Качества человека характеризуются в первую очередь его *квалификацией* (обученностью управлять данной машиной) и *исполнительностью* (профессиональной ответственностью за выполнение порученного задания).

Машина, в свою очередь, должна учитывать физиологические и нервные возможности человека: возможность нести определенные нагрузки и перегрузки, воспринимать и передавать необходимую информацию, находиться в данной ситуации или условиях в нужное время и т.п.

Изучение и моделирование систем «человек – техника», исследование и классификация отказов машин по вине оператора, изучение меха-

низмов надежности человека как сложной кибернетической системы, создание адаптивных систем «человек – машина» способствуют повышению надежности машин, агрегатов и сложных комплексов при их эксплуатации.

Функционирование машины в экстремальных ситуациях

При эксплуатации машины внешние воздействия на нее, значительно превышающие уровень, установленный техническими условиями, могут привести к аварии, а в отдельных случаях и к катастрофе.

Экстремальные ситуации могут возникнуть и по вине самой машины (несовершенство конструкции) или из-за неправильных методов ее использования (влияние «человеческого фактора»).

Высокая надежность машины – одно из основных условий обеспечения ее *безопасности*, под которой следует понимать «свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды».

Причины возникновения экстремальных ситуаций, связанные с внешними воздействиями на машину, могут быть следствием попадания машины в зону высоких или низких температур, радиационных воздействий и других, как правило, редких событий. Внешние воздействия могут и не быть экстремальными, а лишь несколько превышать уровень, установленный ТУ, или они могут быть не учтены при проектировании машины.

Чем большие воздействия оказывает на машину среда, тем выше вероятность отказа, которая резко возрастает при работе изделия в не свойственной ему обстановке.

Поэтому при возникновении преждевременных отказов, особенно при тяжелых последствиях, часто создается конфликтная ситуация. Кто виноват в возникновении того или иного отказа? В табл. 6 представлены причины преждевременных отказов.

Методы обеспечения безопасности машин могут быть сведены к двум основным направлениям.

Таблица 6

Причины преждевременных отказов

Что является причиной преждевременного отказа	Кто виноват в возникновении отказа
Неправильный расчет ресурса изделия. Неправильно установлены технические условия (ТУ) на параметры изделия	Конструктор
Нарушение ТУ при изготовлении и испытании изделия	Технолог
Нарушение режимов и условий эксплуатации	Эксплуатационник
Допускаемая ТУ вероятность возникновения отказа	Никто

1. Создание машин, имеющих запас прочности и надежности тех элементов конструкции, которые могут стать причиной возникновения экстремальной ситуации.

В первую очередь необходимо рассмотреть те элементы, после отказа которых может произойти резкое изменение их состояния из-за лавинообразного развития процесса повреждения.

Примером может служить образование и развитие усталостных трещин в металлических конструкциях.

2. Создание специальных систем и устройств, локализирующих развитие неблагоприятных процессов, защищающих машину от вредных воздействий, предупреждающих о возможном наступлении экстремальных ситуаций, управляющих функционированием объекта в критических случаях. Для этой цели применяют контрольные и диагностические системы, которые оценивают значения, как выходных параметров системы, так и специально установленных диагностических признаков машины и окружающей среды. Сравнение уровня сигналов с заданными значениями, обработка информации и принятие решения о необходимых действиях для выхода из аварийной ситуации осуществляется при помощи ЭВМ.

Система обеспечивает включение той или иной защиты, изменение режимов работы машины, сигнализацию о возникшей ситуации, вырабатывает оптимальные решения для действия персонала. При возникновении или опасности возникновения аварийной ситуации особую роль играет «человеческий фактор». Управление сложными машинами, особенно в экстремальных ситуациях, требует использования предельных возможностей человека-оператора.

Требования к конструкции машины с учетом безопасности должны, в основном, заключаться в следующем: не должно быть аварий по вине самой машины; при возникновении аварий не должно быть человеческих жертв и должен быть обеспечен минимум материального ущерба и воздействий на окружающую среду.

Преимущества имеют машины с высоким уровнем надежности, эксплуатация которых осуществляется в строгом соответствии с техническими требованиями.

Перспективные направления проблемы надежности

1. *Разработка программ автоматизированных расчетов параметрической надежности.* Это направление опирается на физико-

вероятностные модели отказов, использует расчет на износ различных сопряжений, учитывает возможности унификации выходных параметров, применяет методы прогнозирования параметрической надежности машин.

2. *Создание базы данных по закономерностям процессов старения и, в первую очередь, изнашивания.* Эффективность результатов прогнозирования надежности непосредственно связана с накоплением исходных данных по закономерностям и численным значениям интенсивности процессов старения для различных материалов и условий эксплуатации.

3. *Применение испытательно-диагностических комплексов для автоматизированной оценки качества и надежности машин.* Использование программного метода испытаний и организация единого испытательно-вычислительного процесса для достоверной оценки параметрической надежности опытного образца дает гарантию обеспечения заданных технических характеристик машины.

4. *Расширение функций систем по управлению качеством продукции для решения задач надежности.* При производстве изделий должна быть создана подсистема управления надежностью, которая учитывает взаимосвязи параметров технологического процесса с показателями надежности изготавливаемых изделий.

5. *Разработка оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта машин.* Система ремонта и технического обслуживания машин должна быть построена так, чтобы с учетом конструктивных особенностей и методов эксплуатации машин было обеспечено восстановление ее работоспособности с минимальными затратами времени и средств.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нормирование надежности.
2. Нормируемый показатель надежности.
3. Какие показатели необходимо учитывать при выборе номенклатуры нормируемых показателей надежности?
4. Назовите периоды эксплуатации машин. Что происходит в эти периоды с работоспособностью машин?
5. Перечислите основные виды отказов. Приведите примеры.
6. Назовите классы надежности в зависимости от допустимых значений вероятности безотказной работы. Приведите примеры машин.
7. Как выявить нормируемый показатель надежности для характеристики объекта?
8. Какие данные необходимо иметь для построения математической модели функционирования объекта?
9. Какой показатель надежности принимается в качестве нормируемого при линейной зависимости «дохода» от времени?
10. Какой показатель надежности принимается в качестве нормируемого при скачкообразной зависимости «дохода» от времени?
11. Какой показатель надежности принимается в качестве нормируемого для ремонтируемых изделий?
12. Назовите показатели безотказности.
13. Назовите показатели долговечности.
14. Назовите показатели ремонтпригодности.
15. Назовите показатели сохраняемости.
16. Назовите комплексные показатели надежности.
17. Сложная система.
18. Факторы, отрицательно и положительно влияющие на надежность сложных систем.
19. Элемент системы. Его особенности.
20. Метод прямого перебора всех возможных состояний элементов.
21. Комбинаторно-аналитический метод.
22. Метод минимальных путей.
23. Метод минимальных сечений.
24. Назовите пути повышения надежности машин.
25. Резервирование. Виды резервирования.
26. Методы повышения надежности систем путем структурного резервирования.
27. Классификация структурного резервирования в зависимости от способа включения резервных элементов.
28. Виды резервирования в зависимости от режима работы резервных элементов.
29. Как определить оптимальное число резервных элементов в системе в случае общего резервирования?
30. Как определить оптимальное число резервных элементов в системе в случае раздельного резервирования?
31. Ремонтпригодность изделия. Факторы, влияющие на ремонтпригодность.
32. Как влияет «человеческий фактор» на восстановление утраченной машиной работоспособности?
33. Функционирование машин в экстремальных условиях.
34. Назовите методы обеспечения безопасности машин.
35. Перечислите перспективные направления проблем надежности.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задание 1

Четырехдвигательный самолет совершает полет длительностью t ч. Среднее время наработки одного двигателя на отказ T_{cp} . Самолет может продолжать полет с двумя исправными двигателями.

Определить:

- вероятность отказов двигателей за время полета t ;
- вероятность безотказной работы за 3, 5 и 7 ч полета.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для задания 1

№ варианта	t , ч	T_{cp} , ч	№ варианта	t , ч	T_{cp} , ч
1	8	8 000	6	8	10 000
2	9	9 000	7	9	11 000
3	10	10 000	8	12	12 000
4	11	14 000	9	11	13 000
5	12	15 000	10	10	14 000

Задание 2

В автоматизированном механическом цехе для обработки деталей из различных материалов установлено на токарных станках N резцов, стойкость которых (ресурс) $T_{p.n}$ мин. Число снятых резцов после различной наработки приведено в табл. 2.

Определить:

- плотность распределения вероятности отказов после фиксированной наработки и за ресурс;
- интенсивность отказов после установленной наработки и за ресурс;
- вероятность безотказной работы в каждый период фиксированной наработки и за ресурс;
- построить графики распределения $f(t), P(t), \lambda(t)$.

Таблица 2

Исходные данные для задания 2

№ вар.	N	Число снятых резцов после наработки t , мин.							
		5	10	15	20	25	30	35	40
1	300	15	45	75	115	135	160	185	200
2	500	25	50	75	130	175	240	295	350
3	700	35	75	130	175	240	295	350	400

Окончание табл. 2

4	900	75	130	175	240	295	350	450	630
5	1 000	55	125	195	310	450	530	650	700
6	800	35	55	125	195	310	400	470	560
7	600	25	35	55	125	195	310	400	500
8	400	15	25	35	55	75	125	195	260
9	200	10	15	25	35	55	75	115	135
10	100	7	10	15	25	35	45	55	75

Задание 3

На нефтеперерабатывающем заводе в технологических линиях было установлено N насосов, ресурс которых $T_{p.n}$ ч. В процессе эксплуатации после различной наработки было снято N_i насосов (табл. 3).

Определить:

- плотность вероятности отказов после фиксированной наработки и за весь ресурс;
- интенсивность отказов за период фиксированной наработки и за весь ресурс;
- вероятность безотказной работы в каждый период фиксированной наработки и за ресурс в целом;
- построить графики распределения $f(t), P(t), \lambda(t)$.

Таблица 3

Исходные данные для задания 3

№ вар.	N	Число снятых насосов N_i после наработки t , ч						
		1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000
1	200	10	23	45	65	80	105	123
2	350	45	65	80	105	145	175	215
3	300	23	45	65	80	105	145	175
4	400	65	80	105	145	175	215	255
5	500	80	105	145	175	215	255	315
6	600	105	145	175	215	255	315	385
7	700	145	175	215	255	315	385	450
8	650	85	105	155	205	265	345	400
9	550	35	85	105	155	205	265	350
10	450	25	55	85	105	155	205	305

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
2. Зубова, А. Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств / А. Ф. Зубова. – Л.: Машиностроение, 1971. – 184 с.
3. Елизаветин, М. А. Повышение надежности машин / М. А. Елизаветин. – М.: Машиностроение, 1973. – 431 с.
4. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
5. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении / А. И. Кубарев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
6. Шир, Я. Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шир, Ф. И. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1968. – 288 с.
7. Шубин, В. С. Надежность оборудования химических производств: учеб. пособие для вузов / В. С. Шубин. – М.: МИХМ, 1989. – 100 с.
8. Жилинский, И. Б. Основы надежности и долговечности: конспект лекций / И. Б. Жилинский. – М.: МИХМ, 1974. – 48 с.
9. Жилинский, И. Б. Примеры решения задач по расчету надежности оборудования химических производств / И. Б. Жилинский. – М.: МИХМ, 1987. – 80 с.
10. Хазов, Б. Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
11. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов. – М.: Высш. школа, 1988. – 237 с.
12. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 448 с.
13. Войнов, К. Н. Прогнозирование надежности механических систем / К. Н. Койнов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
14. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надежности / Т. А. Голинкевич. – М.: Высш. школа, 1977. – 160 с.
15. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний: методические указания. РД 50-699-90. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 12 с.
16. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения: рекомендации. Р 50-95-88. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 24 с.
17. Богданофф, Д. Ж. Вероятностные модели накопления повреждений / Д. Ж. Богданофф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.

18. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10-ти т. / Ред. совет: В. С. Авдеевский и др. – М.: Машиностроение, 1986.
19. Михлин, В. М. Прогнозирование технического состояния машин / В. М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 288 с.
20. Калур, А. Надежность и проектирование систем / А. Калур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
21. Баронс, П. П. Надежность и качество механических систем / П. П. Баронс, А. В. Звигурис, Н. К. Салениекс. – Рига: Авотс, 1982. – 86 с.
22. Канарчук, В. Е. Основы надежности машин / В. Е. Канарчук. – Киев: Наукова думка, 1982. – 248 с.
23. Переверзев, Е. С. Случайные процессы в параметрических моделях надежности / Е. С. Переверзев. – Киев: Наукова думка, 1987. – 240 с.
24. Хенли, Э. Дж. Надежность механических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
25. Завистовский, В. Э. Метод. указ. к УИР «Элементы теории надежности машин» / В. Э. Завистовский. – Новополоцк: НПИ, 1992. – 28 с.
26. Завистовский, В. Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем / В. Э. Завистовский // Вестник ПГУ: сер. С. Фундаментальные науки. – 2004. – Т. 1. – С. 12 – 27.
27. Завистовский, В. Э. Физика отказов и основы надежности машин: практикум / В. Э. Завистовский, О. Н. Жаркова. – Новополоцк: ПГУ, 2005. – 32 с.
28. Завистовский, В. Э. Физика отказов механических систем / В. Э. Завистовский, О. В. Холодилов, П. Н. Богданович. – Мн.: Техно-принт, 1999. – 212 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лекция 1. Нормирование надежности.....	4
Лекция 2. Структурный анализ систем технологического оборудования.....	21
Лекция 3. Расчет надежности сложных систем.....	34
Лекция 4. Повышение надежности машин	42
Контрольные вопросы	59
Задания для самостоятельного решения	60
Литература	62

Учебное издание

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по курсу

«Основы надежности и долговечности
химического оборудования»
для студентов специальности 1-36 07 01

Составители

ЖАРКОВА Ольга Николаевна
ЗАВИСТОВСКИЙ Владимир Эдуардович

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Дизайн обложки *И. С. Васильевой*

Подписано в печать 5.04.07. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,71. Уч.-изд. л. 3,57. Тираж 60 экз. Заказ 65.

Издатель и полиграфическое исполнение –
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30. 04. 04

ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29