



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Надежность технических систем

2018

Большинство ТС – сложные (состоят из отдельных деталей, узлов, агрегатов и т.п.)

С позиций надежности ТС обладает отрицательными и положительными свойствами.

Факторы, отрицательно влияющие на надежность:

- большое число элементов, отказ каждого может привести к отказу всей системы;
- сложность оценки работоспособности из-за уникальности либо недостаточности статистических данных;
- элементы систем одинакового предназначения имеют незначительные вариации своих свойств, что сказывается на выходных параметрах системы.



Факторы, положительно влияющие на надежность:

- самоорганизация/саморегулирование – способность системы найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;
- возможность восстановления работоспособности по частям без ремонта всей системы;
- не все элементы системы одинаково влияют на надежность сложной системы.

Анализ работоспособности сложной системы – изучение ее структуры и взаимосвязей, определяющих ее надежное функционирование:

- ТС расчленяют на элементы для рассмотрения их функций (параметров и характеристик) и взаимосвязей с другими элементами системы;
- элемент не расчленяется на составные части, и показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом.

Все элементы системы разделяют на группы:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы:

- деформация ограждающего кожуха машины,
- изменение окраски поверхности и т. п.

Отказы этих элементов могут рассматриваться изолированно от системы.



2. Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый период времени практически не изменяется:

- корпусные детали,
- малонагруженные элементы с большим запасом прочности.

3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время остановок, не влияющих на его эффективность:

- замена режущего инструмента на станке,
- регулировка холостого хода карбюратора автомобильного двигателя.

4. Элементы, отказ которых приводит к отказам системы

Данные элементы подлежат анализу надежности.

Надежность ТС определяют ограниченное число элементов.

Для их выявления:

- составляются модели надежности – устанавливают связь между подсистемами (элементами) и их влияние на работу всей системы;
- рассматривается структурная схема надежности – определяют функциональную взаимосвязь между работой элементов в определенной последовательности.



Исследование структуры

Выявление слабых мест в конструкции

Разработка конструктивных мер по устранению подобных мест

Проведение резервирования для обеспечения заданного уровня надежности системы



По принципу организации
взаимосвязей

последовательные

параллельные

со смешанным
соединением

Структурная схема надежности ТС с последовательным соединением элементов

Отказ одного элемента вызывает отказ всей системы.

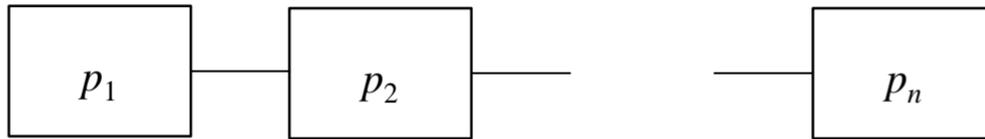


Рис. 1. Структурная схема ТС с последовательным соединением

Большинство приводов машин построены по данной схеме.

Если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, электродвигатель и т.д., то весь привод перестанет функционировать.

Т.к. отказ любого элемента такой системы приводит к отказу системы, вероятность безотказной работы системы определяется как произведение вероятностей независимых событий A

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i),$$

т.е.

$$P = \prod_{i=1}^n p_i$$

p_i – надежность подсистем или элементов

Сложные ТС из элементов высокой надежности могут обладать низкой надежностью из-за большого числа элементов.

Например

Узел состоит из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет $P_i = 0,99$, то вероятность безотказной работы узла будет

$$P(t) = (0,99)^{50} = 0,55.$$

Пример

Определить надежность автомобиля, если известны надежности:

- системы зажигания $p_1 = 0,99$;
- системы питания топливом и смазкой $p_2 = 0,999$;
- системы охлаждения $p_3 = 0,998$;
- двигателя $p_4 = 0,985$;
- ходовой части $p_5 = 0,997$.

Р е ш е н и е. Известно, что отказ любой подсистемы приводит к отказу автомобиля.

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 = 0,99 \cdot 0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,985 \cdot 0,997 = 0,979.$$

Структурные схемы надежности ТС с параллельным соединением элементов

Отказ ТС возможен в случае, когда отказывают все ее элементы.

Такое соединение можно назвать *резервированием*.

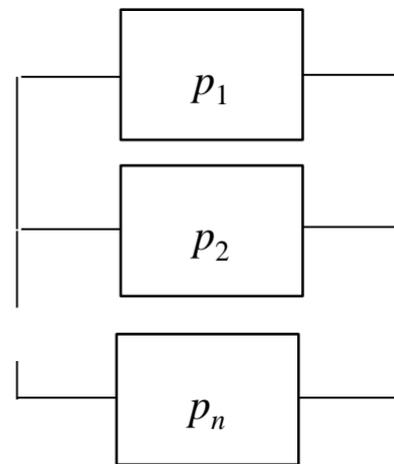


Рис. 2. Структурная схема ТС с параллельным соединением



Резерв – аппаратура:

- обладающая характеристиками основной;
- исправная, готовая к включению в любой момент времени

Резервирование:

- увеличение стоимости;
- увеличение надежности.

Наиболее выгодно – резервирование отдельных элементов, непосредственно влияющих на выполнение основных функций.



СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ





Примеры резервирования

В машиностроении на заводах уникальные станки основного производства стараются иметь как минимум два экземпляра

В транспортных машинах – двойная/тройная система тормозов.

В грузовых автомашинах – двойные шины на задних колесах.

В пассажирских самолетах – 4 двигателя, и несколько электрических машин.

Запасные деталей на складах, запасных колес на автомашинах.

Для системы с параллельным соединением с надежностью $p(t)$ и соответственно вероятностью отказа $q(t)=1-p(t)$:

- вероятность отказа системы с n элементов:

$$Q=[q(t)]^n,$$

- вероятность безотказной работы

$$P(t)=1-[q(t)]^n.$$

Структурные схемы надежности с частично-параллельным резервированием

В чем отличие?

Системы, для которых необходимо работоспособность нескольких элементов.

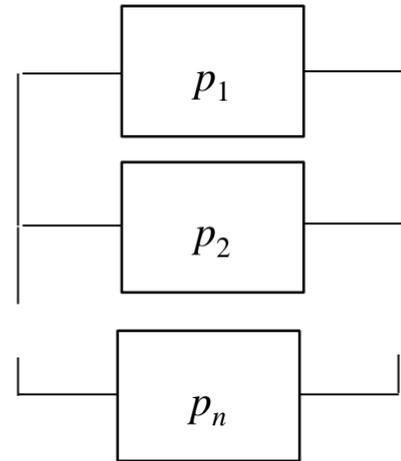


Рис. 3. Структурная схема ТС с
частично-параллельным
резервированием

Пример. Система воспламенения ракетного двигателя

Имеется n отдельных воспламенителей, соединенных параллельно.

Энергии одного воспламенителя недостаточно для воспламенения горючего.

Для уменьшения $Q(t)$ воспламенение происходит при отказе нескольких воспламенителей.

В действительности будет какая-то вероятность P того, что при m исправных воспламенителях произойдет воспламенение горючего.



Пусть $p(t)$ – вероятность исправной работы отдельного воспламенителя, тогда вероятность P иметь m исправных воспламенителей из общего числа n (биномиальное распределение):

$$P(t) = C_n^m \cdot p^m(t) \cdot q^{n-m}(t),$$

C_n^m – число сочетаний из n элементов по m

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

Можно принять при j воспламенителей горючее воспламеняется, при $j-1$ воспламенителей – нет.

В этом частном случае вероятность безотказной работы всей системы

$$P(t) = \sum_{m=j}^n C_n^m \cdot p^m(t) \cdot q^{n-m}(t),$$

j – число исправных элементов, при котором обеспечивается работоспособность системы.

При $j=1$ – система параллельна, иначе – частично-параллельна

Структурные схемы надежности ТС с параллельно-последовательным соединением элементов

Широкое применение в проектировании нашли
мостиковые схемы.

Надежность схемы определяют из соотношения вида

$$P(t) = 5p(t)q(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t).$$

Здесь все элементы также имеют одинаковую надежность.

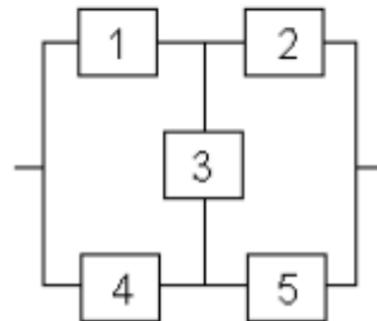


Рис. 4. Мостиковая схема

Различают схемы надежности с резервированием:

- поканальным

$$P = [1 - (1 - p_{11}p_{12}\dots p_{1n}) \cdot (1 - p_{21}p_{22}\dots p_{2n}) \cdot \dots \cdot (1 - p_{k1}p_{k2}\dots p_{kn})]$$

$$P = [1 - (1 - p_1p_2\dots p_n)^k]$$

$$P = 1 - (1 - p^n)^k$$

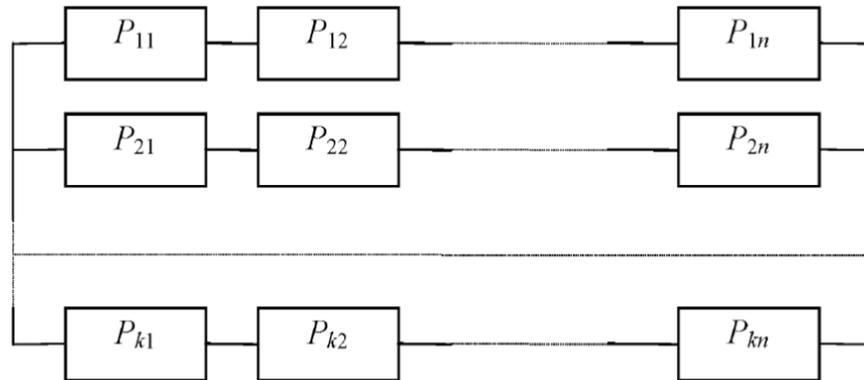


Рис. 5. Поканальное резервирование

- ПОЭЛЕМЕНТНЫМ

$$P = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21}) \dots (1 - p_{k1})] \cdot [1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22}) \dots (1 - p_{k2})] \cdot \dots$$

$$\cdot [1 - (1 - p_{1n})(1 - p_{2n}) \dots (1 - p_{kn})]$$

$$P = [1 - (1 - p_1)^k] \cdot [1 - (1 - p_2)^k] \cdot \dots \cdot [1 - (1 - p_n)^k]$$

$$P = [1 - (1 - p)^k]^n$$

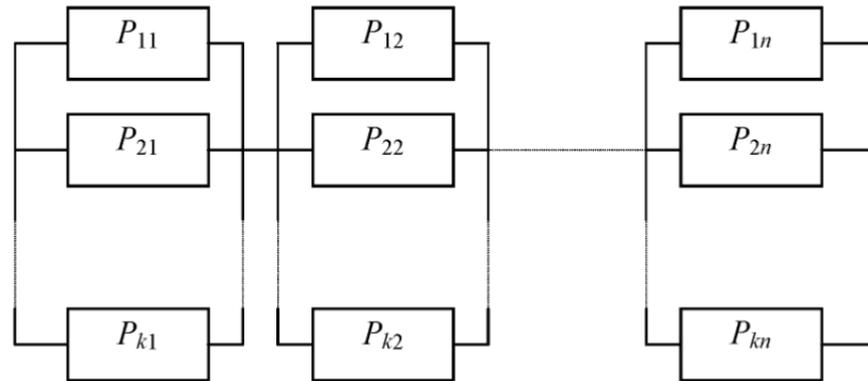


Рис. 6. Поэлементное резервирование 25



Структурная схема с поэлементным резервированием имеет более высокую надежность по сравнению с поканальным резервированием.

Пример. Определить надежность системы при надежности ее элементов:

$$p_1=0,99; p_2=0,98; p_3=0,9; p_4=0,95; p_5=0,9; p_6=0,9; p_7=0,8; p_8=0,75; p_9=0,7.$$

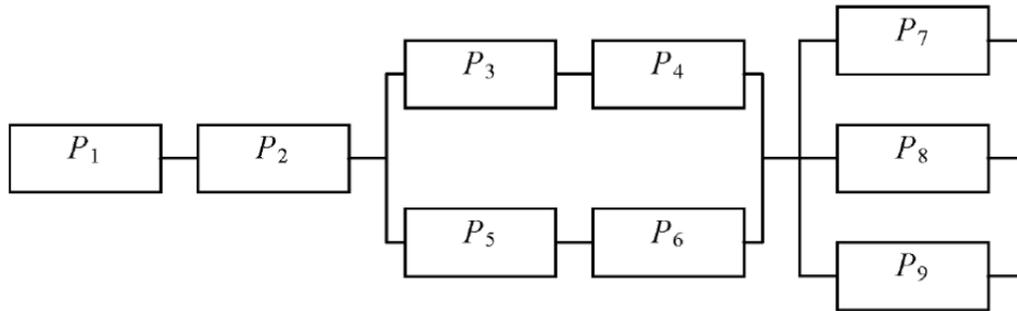


Рис. 7. Структурная схема системы



Р е ш е н и е. При расчете надежности воспользуемся формулами как для последовательного, так и для параллельного соединения элементов:

$$P = p_1 p_2 [1 - (1 - p_3 p_4)(1 - p_5 p_6)] \cdot [1 - (1 - p_7)(1 - p_8)(1 - p_9)] = \\ = 0,99 \cdot 0,98 \cdot [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,95)(1 - 0,9 \cdot 0,9)] \cdot [1 - (1 - 0,8)(1 - 0,75)(1 - 0,7)] = 0,927.$$

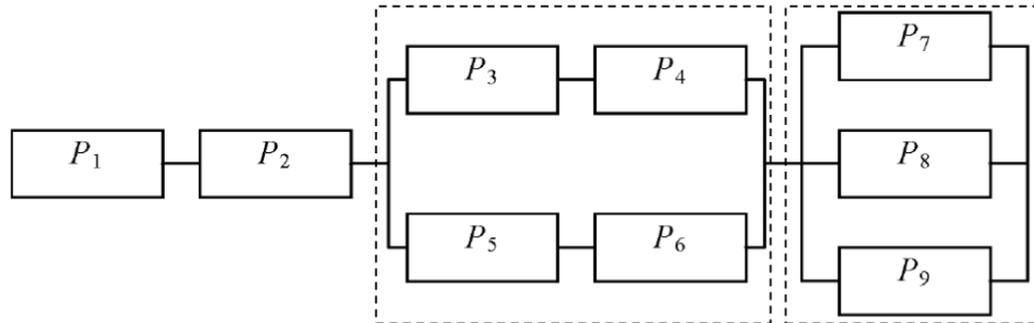


Рис. 8. Структурная схема системы



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Надежность технических систем

2018