



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Московский институт электроники и
математики им. А.Н. Тихонова

СВЯЗЬ НАДЕЖНОСТИ С УПРАВЛЕНИЕМ КАЧЕСТВОМ ПРОЕКТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Преподаватели:
к.т.н., доц. Полесский С.Н.

Москва, 2024



- 1 ● Показатели и свойства надежности
- 2 ● Виды состояний ЭС
- 3 ● Отказы ЭС
- 4 ● Временные понятия теории надежности

Введение



Одной из групп показателей качества ЭС является группа показателей надежности. Надежность характеризуется следующими показателями (количественными характеристиками одного или нескольких свойств, составляющих надежность ЭС):



- **расчетный показатель надежности** - показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом;



- **экспериментальный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний;



- **эксплуатационный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации;



- **экстраполированный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Показатели надежности



Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения ЭС и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. Все показатели надежности, приведенные далее, определены как вероятностные характеристики. Их статистические аналоги определяют методами математической статистики.



Показатели и свойства надежности



Безотказность - свойство ЭС непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Безотказность характеризуется следующими показателями:

- **вероятность безотказной работы** - вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ ЭС не возникнет. Вероятность безотказной работы $P(t)$ ЭС на интервале от 0 до t включительно определяют как:
$$P(t) = P\{\tau > t\}$$
- **гамма-процентная наработка до отказа**
- **средняя наработка до отказа** - математическое ожидание наработки ЭС до первого отказа. Средняя наработка до отказа связана с вероятностью безотказной работы соотношением: $T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt$.
- средняя наработка на отказ
- **интенсивность отказов** - условная плотность вероятности возникновения отказа ЭС, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Интенсивность отказов ($\lambda(t)$) определяют по формуле: $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{d(t)}$.
- **параметр потока отказов**
- **осредненный параметр потока отказов**

Показатели и свойства надежности



Ремонтопригодность - свойство ЭС, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность характеризуется следующими показателями:

- **вероятность восстановления** - вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния ЭС не превысит заданное значение;
- **гамма-процентное время восстановления** - время, в течение которого восстановление работоспособности ЭС будет осуществлено с вероятностью, выраженной в процентах;
- **среднее время восстановления** - математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния ЭС после отказа;
- **интенсивность восстановления** - условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния ЭС, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено;
- **средняя трудоемкость восстановления** - математическое ожидание трудоемкости восстановления ЭС после отказа.

Показатели и свойства надежности

Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t включительно определяем $P(t) = P\{\tau > t\}$ (1)

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки t . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром v , то вместо (1) имеем формулу

$$P(t) = P\{v_*(t_1) < v(t_1) < v_{**}(t_1); 0 \leq t_1 \leq t\}$$

где V_* и V_{**} - предельные по условиям работоспособности значения параметров (эти значения, вообще, могут изменяться во времени).

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$F(t) = 1 - P(t); f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}$$



Показатели и свойства надежности

Наряду с понятием "вероятность безотказной работы" часто используют понятие "вероятность отказа", которое определяется следующим образом: это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность отказа на отрезке от 0 до t определяют по формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t).$$

Точечные статистические оценки для вероятности безотказной работы $\hat{P}(t)$ от 0 до t и для функции распределения наработки до отказа $\hat{F}(t)$ даются формулами: $\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}$; $\hat{F}(t) = \frac{n(t)}{N}$,

- где N - число объектов, работоспособных в начальный момент времени;
- $n(t)$ - число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .
- Для получения достоверных оценок объем выборки N должен быть достаточно велик [2, 3, 7].

Показатели и свойства надежности

Среднюю наработку до отказа T_1 вычисляют по формуле:

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt,$$

- где $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа,
- $f(t)$ - плотность распределения наработки до отказа.

С учетом $F(t) = 1 - P(t); f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}$.

T_1 выражается через вероятность безотказной работы:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Статистическая оценка для средней наработки до отказа дается формулой

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j. (*)$$

- Здесь N - число работоспособных объектов при $t = 0$
- τ_j - наработка до первого отказа каждого из объектов.

Формула (*) соответствует плану испытаний, при котором все объекты испытываются до отказа [2, 3, 7].

Показатели и свойства надежности

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяют по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$$

Для высоконадежных систем $P(t) \approx 1$, так что интенсивность отказов приблизительно равна плотности распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка для интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$ имеет вид $\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t}$,

- где N - число объектов, работоспособных в начальный момент времени;
- $n(t)$ - число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Показатели и свойства надежности



Долговечность - свойство ЭС сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность характеризуется следующими показателями:

- **гамма-процентный ресурс** - суммарная наработка, в течение которой ЭС не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах;
- **средний ресурс** - математическое ожидание ресурса;
- **гамма-процентный срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой ЭС не достигнет предельного состояния с вероятностью гамма, выраженной в процентах;
- **средний срок службы** - математическое ожидание срока службы.



Показатели и свойства надежности



Сохраняемость - свойство ЭС сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования. Сохраняемость характеризуется следующими показателями:

- **гамма-процентный срок сохраняемости** - срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью, выраженной в процентах;
- **средний срок сохраняемости** - математическое ожидание срока сохраняемости.



Показатели и свойства надежности

- "Гамма-процентная наработка до отказа", "Гамма-процентный ресурс", "Гамма-процентный срок службы", "Гамма-процентное время восстановления", "Гамма-процентный срок сохраняемости" определяют как корни t_γ уравнения

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (*)$$

где

- $F(t)$ - функция распределения наработки до отк (службы).

В частности, гамма-процентную наработку до отказа t_γ определяют из уравнения

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100},$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы.

- Как видно из формулы (*), гамма-процентные показатели равны квантилям соответствующих распределений. Если вероятности, отвечающие этим квантилям, выражают в процентах, то для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99; 99,5% и т.д. Тогда вероятность возникновения отказа на отрезке $[0;t]$ будет составлять 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 и т.д. Задаваемые значения γ для критических отказов должны быть весьма близки к 100%, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями. Для прогнозирования потребности в запасных частях, ремонтных мощностях, а также для расчета пополнения и обновления парков машин, приборов и установок могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях γ , например при $\gamma = 50\%$, что приближенно соответствует средним значениям.

Показатели и свойства надежности



Все вышеприведенные показатели относятся к единичным показателям надежности, т.к. характеризуют только одно из свойств, составляющих надежность ЭС. Кроме единичных показателей используются и комплексные показатели надежности, характеризующие несколько свойств, составляющих надежность ЭС. К ним относятся:

- **коэффициент готовности** - вероятность того, что ЭС окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение ЭС по назначению не предусматривается. Стационарное значение коэффициента готовности определяют по формуле:

$$K_2 = \frac{T}{T + T_e},$$

где

K_2 - коэффициент готовности;

T – средняя наработка на отказ;

T_e – среднее время восстановления.

- **коэффициент оперативной готовности**
- **коэффициент технического использования**
- **коэффициент сохранения эффективности**



Показатели и свойства надежности

- Коэффициент оперативной готовности K_{OG} - 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 эксплуатации.

$$K_{OG}(t_0) = K_G \cdot P(t_0) = K_G \cdot e^{-\lambda t_0}$$

- Коэффициент технического обслуживания - отношение суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом.

$$k_{ТИ} = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_{восст} + t_{ТО}}$$

где

- t_{cp} - средняя наработка до отказа, ч;
- $t_{восст}$ - среднее время восстановления после отказа, ч;
- $t_{ТО}$ - среднее время технического обслуживания и планового ремонта, ч.

Виды состояний ЭС



- **исправное состояние** - состояние ЭС, при котором оно соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации);



- **неисправное состояние** - состояние ЭС, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

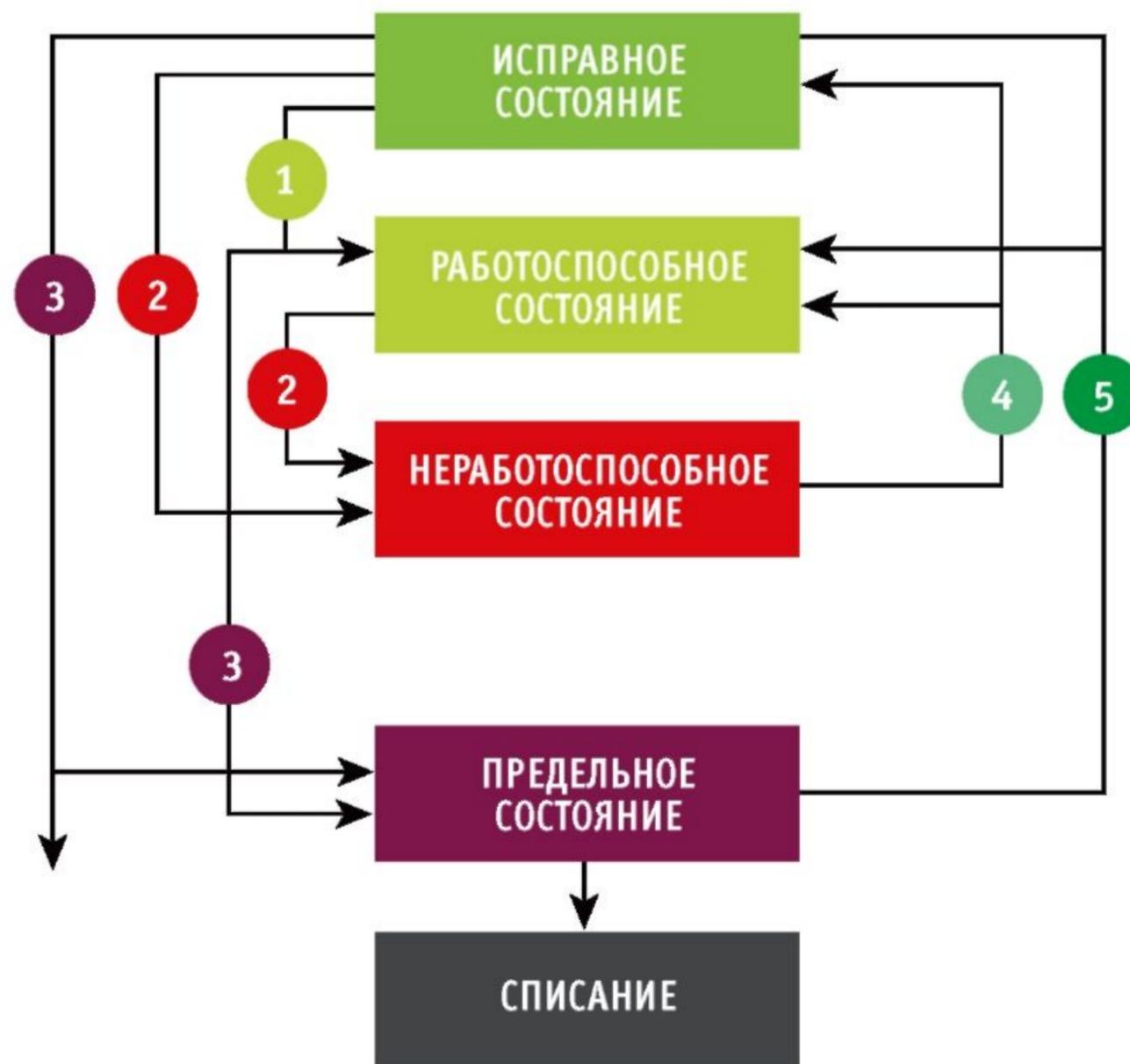


- **неработоспособное состояние** - состояние ЭС, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической в (или) конструкторской (проектной) документации. Для сложных ЭС возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых ЭС способно частично выполнять требуемые функции;



- **предельное состояние** - состояние ЭС, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Критерием предельного состояния ЭС является признак (или совокупность признаков), установленный нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же ЭС могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

Диаграмма состояний ЭС



Отказы ЭС



В основе методов теории надежности лежат методы теории вероятностей и математической статистики. Однако если теория вероятностей оперирует со случайными событиями, то в теории надежности используется понятие «отказа».

- **Отказ** - это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния ЭС.
- **Критерием** отказа является признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния ЭС, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.
- **Причинами** отказа являются явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа ЭС.
- **Последствиями** отказа являются явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа ЭС.
- **Совокупность** признаков, характеризующих последствия отказа называют критичностью отказа.

Виды отказов ЭС



- **Независимый отказ** - отказ, не обусловленный другими отказами;
- **зависимый отказ** - отказ, обусловленный другими отказами;
- **внезапный отказ** - отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров ЭС;
- **постепенный отказ** - отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров ЭС;
- **перемежающийся отказ** - многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера;
- **явный отказ** - отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке ЭС к применению или в процессе его применения по назначению;
- **скрытый отказ** - отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики;

Виды отказов ЭС



- **Конструктивный отказ** - отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования ЭС;
- **производственный отказ** - отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта ЭС, выполняемого на ремонтном предприятии;
- **эксплуатационный отказ** - отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации ЭС;
- **деградационный отказ** - отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации ЭС

Виды отказов ЭС



Отказы ЭС



Временные понятия теории надежности



Коренным отличием группы показателей надежности от остальных групп показателей качества ЭС является то, что она характеризует динамику изменения качества во времени. Для этого в теории надежности используют следующие временные понятия:

- **наработка** - продолжительность или объем работы ЭС. Нарработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов);
- **наработка до отказа** - наработка ЭС от начала эксплуатации до возникновения первого отказа;
- **наработка между отказами** - наработка ЭС от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа;
- **время восстановления** - продолжительность восстановления работоспособного состояния ЭС;
- **ресурс** - суммарная наработка ЭС от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние;
- **срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации ЭС или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние;

Временные понятия теории надежности



- **Срок сохраняемости** - календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования ЭС, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность ЭС выполнять заданные функции. По истечении срока сохраняемости ЭС должно соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на ЭС;
- **остаточный ресурс** - суммарная наработка ЭС от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Аналогичными являются понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения;
- **назначенный ресурс** - суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация ЭС должна быть прекращена независимо от его технического состояния;
- **назначенный срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация ЭС должна быть прекращена независимо от его технического состояния;
- **назначенный срок хранения** - календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение ЭС должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

- По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) ЭС должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией – направление в ремонт, списание, утилизация, проверка и установление нового назначенного срока и т.д.
- Приведенные выше понятия, термины и определения, составляют лишь часть той терминологии, которая принята в теории надежности. Более подробную информацию можно найти в ГОСТ 27.002 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. А также ГОСТ 27.002-2015.





НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

<https://busedu.hse.ru/catalog/210564713.html>

Телефон: +7 (926) 563-70-04
Электронная почта: spolessky@hse.ru

Адрес: 123458, Москва, Таллинская, 34